

ISSN 1993-0135

ХВОЙНЫЕ

БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ



2023

Том XLI
Номер 5

<http://www.sibsau.ru>

Красноярск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLI
№ 5

Красноярск
2023

ХВОЙНЫЕ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Теоретический и научно-практический журнал

Том XLI, № 5

Журнал основан в 1962 г.
(до 2002 г. носил название «Лиственница»).

Выходит 6 раз в год

Главный редактор

Братилова Наталья Петровна, д.с.-х.н. профессор

Ответственный секретарь

Коротков Александр Анатольевич, к.с.-х.н., доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Авдеева Елена Владимировна, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Алашкевич Юрий Давыдович, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Бабич Николай Алексеевич, д.с.-х.н., профессор (САФУ, Архангельск)
Бессчетнов Владимир Петрович, д.б.н., профессор (НГСХА, Нижний Новгород)
Верховец Сергей Владимирович, к.с.-х.н., доцент (Директор Проектного офиса
НОЦ МУ «Енисейская Сибирь», Красноярск)
Выводцев Николай Васильевич, д.с.-х.н., профессор (Тихоокеанский государственный университет,
Хабаровск)
Ермолин Владимир Николаевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Залесов Сергей Вениаминович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Иванов Валерий Александрович, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Кобаяси Рёсукэ, к.с.-х.н. (Центр полевых биосферных исследований Севера, Университет Хоккайдо)
Казаков Яков Владимирович, д.т.н. (САФУ, Архангельск)
Крутовский Константин Валерьевич, профессор (Техасский агромеchanический университет, США)
Кузнецов Борис Николаевич, д.х.н., профессор (ИХХТ СО РАН, Красноярск)
Матвеева Римма Никитична, д.с.-х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Нагимов Зуфар Ягфарович, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Нимц Петер, профессор (Институт строительных материалов и физики древесины (IfB)
Высшей швейцарской технической школы (ETH), Цюрих, Швейцария)
Огурцов Виктор Владимирович, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Онучин Александр Александрович, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Пен Роберт Зусьевич, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Прохоров Валерий Николаевич, д.б.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси
(Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, Минск, Беларусь)
Рязанова Татьяна Васильевна, д.т.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Сафин Руслан Рушанович, д.т.н., профессор (Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань)
Селиховкин Андрей Витимович, д.б.н., профессор (СПбЛТА им. Кирова, Санкт-Петербург)
Стороженко Владимир Григорьевич, д.б.н. (Институт лесоведения РАН, Москва)
Субоч Георгий Анатольевич, д.х.н., профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Суховольский Владислав Григорьевич, д.б.н., профессор (ИЛ СО РАН, Красноярск)
Усольцев Владимир Андреевич, д.с.-х.н., профессор (УГЛТУ, Екатеринбург)
Шевелев Сергей Леонидович, д.с.-х.н. профессор (СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск)
Якубов Харис Галиулович, д.б.н., профессор (МГУ, Москва)

CONIFERS of the BOREAL AREA

Theoretical and Applied Research Journal

Volume XLI, № 5

The journal was founded in 1962
(Prior to 2002 it had the title «Larch»).

Issued 6 times a year

Editor-In-Chief

Dr. Natalia P. Bratilova, Professor

Executive secretary

PhD. Aleksandr A. Korotkov, Associate Professor

EDITORIAL BOARD:

Avdeeva Elena V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Alashkevich Yuri D., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Babich Nikolay A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)

Besschetnov Vladimir P., Dr. Sc. in Biology, Professor (Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod)

Ermolin Vladimir N., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Ivanov Valery A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Kobayashi Ryosuke, Cand. Sc. in Agriculture, North Field Biosphere Research Center (Hokkaido University)

Kazakov Yakov V., Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor (Northern Arctic Federal University, Arkhangelsk)

Krutovsky Konstantin V., Professor (Texas A&M University, College Station, USA)

Kuznetsov Boris N., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Institute of Chemistry and Chemical Technology, Krasnoyarsk)

Matveeva Rimma N., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Nagimov Zufar Ya., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)

Niemz Peter, Professor (Institute for Building Materials and Wood Physics (IfB) at Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland)

Ogurtsov Victor V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Onuchin Alexandr A., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)

Pen Robert Z., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Prokhorov Valery V., Dr. Sc. in Biology, Professor, Associate Member of the National Academy of Sciences of Belarus (Institute of experimental botany of NAS of Belarus, Minsk, Belarus)

Ryazanova Tatyana V., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Safin Ruslan R., Dr. Sc. in Engineering, Professor (Kazan National Research Technological University, Kazan)

Selikhovkin Andrey V., Dr. Sc. in Biology, Professor (Saint-Petersburg State Forest-Technical Academy)

Shevelev Sergei L., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Storochenko Vladimir G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Institute of Forest Sciences, Moscow)

Suboch Georgii A., Dr. Sc. in Chemistry, Professor (Reshetnev University, Krasnoyarsk)

Soukhovolsky Vladislav G., Dr. Sc. in Biology, Professor (Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk)

Verkhovets Sergei V., Cand. Sc. in Agriculture, Docent (Director of the Project Office of the REC MU "Yenisey Siberia", Krasnoyarsk)

Vyvodtsev Nikolay V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Pacific National University, Khabarovsk)

Usoltsev Vladimir A., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)

Zalesov Sergey V., Dr. Sc. in Agriculture, Professor (Ural State Forestry University, Ekaterinburg)

Yakubov Haris H. Dr. Sc. in Biology, Professor (Moscow State University, Moscow)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-70531 от 25 июля 2017 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Certificate of Registration as a Mass Media Resource.
Certificate: PI No. FC77-70531, dated 25 July 2017,
given by The Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media

Статьи в журнале публикуются бесплатно после обязательного рецензирования
и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.hbz.sibsau.ru).

Журнал выходит 6 раз в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки
(<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала (<https://hbz.sibsau.ru/>)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала
«Хвойные бореальной зоны» ссылка обязательна

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М. Ф. Решетнева)

Адрес учредителя и издателя

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева,
Российская Федерация, 660037, Красноярск,
проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31

Адрес редакции

Российская Федерация, 660049, Красноярск, просп. Мира, 82, каб. ц-01а
Редакция журнала «Хвойные бореальной зоны»
Тел. (391) 266-03-96, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Address: Editorial office of the journal “Conifers of the Boreal Area”
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation.
Department of Forest Plantation
Phone: (391) 266-03-96, e-mail: hbz@sibsau.ru, www.hbz.sibsau.ru

Ответственный редактор А. А. Коротков.
Корректор П. С. Бороздов. Оригинал-макет и верстка Л. В. Звонаревой.

Подписано в печать 20.10.2023. Дата выхода в свет 28.11.2023. Формат 70×108/8.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 700 экз.
Заказ . С 857/23. Цена свободная.

Редакционно-издательский отдел СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660037, Красноярский край, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: rio@mail.sibsau.ru. Тел. (391) 291-90-96.

Отпечатано в редакционно-издательском центре СибГУ им. М. Ф. Решетнева.
660049, Красноярский край, г. Красноярск, просп. Мира, 82. Тел. (391) 222-73-28.

Содержание

Артемьев О. С., Вайс А. А. К юбилею Сергея Леонидовича Шевелёва	377
---	-----

БИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ, ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Коновалова Д. А., Пономарев Д. Д., Братилова Н. П., Коротков А. А., Мантулина А. В. Выращивание сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на экспериментальных субстратах	379
Чичкарев А. С., Маленко А. А. Рост и продуктивность сосново-лиственничных культур в условиях степи Юго-Западной Сибири	384
Иванов В. А., Зверева Д. В., Иванова Г. А., Бакшеева Е. О. Антропогенная пожарная опасность лесов среднесибирского подтаежно-лесостепного района	390
Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М., Лисотова Е. В., Суслина М. А. О состоянии пигментного аппарата хвойных в условиях урбанизированной среды города Красноярска	399
Шевелев С. Л., Михайлов П. В. Связь между густотой и относительной полнотой в еловых древостоях Енисейского края	406
Воронин В. И., Сизых А. П., Осолков В. А., Гриценюк А. П., Мориц Р. С. Современная структурно-динамическая организация и тенденции развития лесов предгорий хребта Хамар-Дабан (Юго-Западное Забайкалье)	412
Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В. П. Высота древостоев ели (род <i>Picea</i>) как характеристика их продуктивности: климатические аспекты	419

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Ермолин В. Н., Баяндин М. А., Намятов А. В., Баяндина М. М. Влияние термомеханической активации на свойства древесных плит без связующих	425
Долматов С. Н., Колесников П. Г. Совершенствование технологии подготовки почвы отвальной вспашкой при лесовосстановлении	431

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Еременко О. Н., Кох Ж. А. Экстрагирование жмыха <i>Oxyccoccus palustris</i> как ресурсосберегающая технология в получении биологически активных веществ	440
--	-----

Авторская ссылка	445
------------------------	-----

Contents

Artemyev O. S., Vais A. A. To the anniversary of Sergey Leonidovich Shevelev	377
---	-----

BIOLOGY AND ECOLOGY, FORESTRY

Konovalova D. A., Ponomarev D. D., Bratilova N. P., Korotkov A. A., Mantulina A. V. Growing seedlings of <i>pinus sibirica</i> du tour with a closed root system on experimental substrates	379
Chichkarev A. S., Malenko A. A. Growth and productivity of pine and larch crops in the steppe of Southwestern Siberia	384
Ivanov V. A., Zvereva D. V., Ivanova G. A., Baksheeva E. O. Anthropogenic fire hazard of forests in the central siberian subtaiga-forest-steppe region	390
Suntsova L. N., Inshakov E. M., Lisotova E. V., Suslina M. A. On the state of the pigment apparatus of conifers in the urbanized environment of Krasnoyarsk	399
Shevelev S. L., Mikhaylov P. V. Correlation between stocking and relative density in spruce stands of the Yenisei ridge	406
Voronin V. I., Sizykh A. P., Oskolkov V. A., Gritsenyuk A. P., Moritz R. S. Modern structural-dynamic organization and trends in the development of forests in the foothills of the Khamar-Daban ridge (South-Western Trans-Baikal)	412
Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Chasovskikh V. P. Height of spruce stands (genus <i>Picea</i>) as a characteristic of their productivity: climatic aspects	419

TECHNOLOGY OF HARVESTING AND MECHANICAL PROCESSING OF WOOD

Ermolin V. N., Bayandin M. A., Namyatov A. V., Bayandina M. M. The effect of thermomechanical activation on the properties of wood slabs without binders	425
Dolmatov S. N., Kolesnikov P. G. Improvement of the technology of soil preparation by slow powing during forest reforestation	431

CHEMICAL PROCESSING TECHNOGY

Eremenko O. N., Koch Zh. A. Extraction of <i>Oxycoccus palustris</i> cake as a resource-saving technology for obtaining biologically active substances	440
Author's link	446



К ЮБИЛЕЮ СЕРГЕЯ ЛЕОНИДОВИЧА ШЕВЕЛЁВА

19 июля 2023 г. исполнилось 75 лет со дня рождения известного российского учёного в области лесной таксации, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Сергея Леонидовича Шевелёва.

Сергей Леонидович родился в г. Ачинске Красноярского края. В 1966 г. окончил Ачинскую железнодорожную среднюю школу № 12 и пошёл по стопам своих родителей, поступив на лесохозяйственный факультет Сибирского технологического института (СибТИ) в г. Красноярске. В тот период на факультете велась активная научная деятельность, студенты постоянно участвовали в полевых экспедициях во всех уголках огромной страны СССР.

Сергей Леонидович активно включился в эту работу и на протяжении трех лет участвовал в экспедициях по Дальнему Востоку – в Приморском и Хабаровском краях, Амурской области. Руководил научной работой известный таксатор, исследователь сибирских лесов, профессор Э. Н. Фалалеев. Как заведующий кафедрой лесной таксации и руководитель он оказал большое влияние на формирование научного и преподавательского мировоззрения С. Л. Шевелёва.

После окончания в 1971 г. лесохозяйственного факультета СибТИ Сергей Леонидович продолжил научную работу на кафедре таксации в должности младшего научного сотрудника, а затем и ассистента. Результатом исследований стала разработка сорти-

ментных и товарных таблиц для твердолиственных пород Дальнего Востока по первым Государственным стандартам и защита в 1977 г. в диссертационном совете СибТИ кандидатской диссертации на тему «Возрастная структура, развитие и качественное состояние простой субформации дуба монгольского Среднего Приамурья».

Через три года после защиты кандидатской диссертации Сергею Леонидовичу присвоено ученое звание доцента. Он продолжает работать на кафедре, занимаясь научной и преподавательской деятельностью.

В 1993 г. С. Л. Шевелёв избирается заведующим кафедрой лесной таксации и лесоустройства. В этот период начинается обобщение накопленных данных по изучению лиственных пород Средней Сибири и разработке новой многоцелевой системы организации лесопользования в лиственных лесах. Комплексное исследование послужило основой докторской диссертации Сергея Леонидовича: «Многоцелевое лесопользование в лиственных лесах Средней Сибири», которая была успешно защищена в 1998 году.

Большое внимание после защиты докторской диссертации Сергей Леонидович уделяет разработке нормативной базы, которую можно использовать как арендаторами, так и работниками лесного хозяйства и студентами. Издается «Лесотаксационный справочник для южно-таёжных лесов Средней Сибири»

(Составители: С. Л. Шевелёв, В. В. Кузьмичев, Н. В. Павлов, А. С. Смольянов. М. : ВНИИЛМ, 2002. 166 с.) и «Справочник таксатора: учебно-справочное пособие для студентов, предназначенное для выполнения расчётных работ, дипломного и курсового проектирования» (Авторы: С. Л. Шевелев, В. В. Кузьмичёв, Н. В. Павлов, А. С. Смольянов. Красноярск : СибГТУ, 2004. 172 с.).

Дальнейшая работа Сергея Леонидовича связана с подготовкой учебных материалов по таксации леса.

Сергей Леонидович большое внимание уделяет подготовке аспирантов, подготовке и защите их кандидатских диссертаций. Под научным руководством С. Л. Шевелева подготовлены и успешно защищены 9 кандидатских диссертаций.

Большая консультационная помощь оказана С. Л. Шевелёвым в качестве научного консультанта при подготовке и защите докторской диссертации О. С. Артемьева на тему «Методические основы таксации городских насаждений с применением материалов дистанционных съёмок», Красноярск: СибГТУ, 2004.

Нельзя не отметить педагогические способности С. Л. Шевелева. С самого начала работы на кафедре он преподаёт лекционный курс по дисциплине «Так-

сация леса». Ежегодно под руководством Сергея Леонидовича защищаются дипломные работы и магистерские диссертации. Многие из его учеников работают в лесных учреждениях, организациях и предприятиях Сибири.

С. Л. Шевелёв – автор и соавтор более 200 научных и учебно-методических работ, в том числе 6 монографий, 5 справочников, 8 учебных пособий, 2 тематических карт, статьи в лесной энциклопедии, патентов на изобретения. Кроме этого Сергей Леонидович выполняет административную научную деятельность: является членом диссертационного совета, входит в редакционную коллегию журнала «Хвойные бореальной зоны».

С. Л. Шевелёв продолжает научные исследования лесов Сибири. Интересы его изысканий лежат в области изучения закономерностей строения, роста, развития, качественного состояния лесов Средней Сибири и организация хозяйства в них.

В свободное от работы время Сергей Леонидович проводит время на своей любимой даче. При этом он много путешествует, собирает грибы и ловит рыбу.

О. С. Артемьев, А. А. Вайс.

Коллектив кафедры лесной таксации, лесоустройства и геодезии Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, редколлегия журнала «Хвойные бореальной зоны» поздравляют Сергея Леонидовича с юбилеем и желают крепкого сибирского здоровья, новых успехов в научной и педагогической деятельности!

ВЫРАЩИВАНИЕ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СУБСТРАТАХ

Д. А. Коновалова, Д. Д. Пономарев, Н. П. Братилова, А. А. Коротков, А. В. Мантулина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nbratilova@yandex.ru

Изучен вопрос выращивания сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на экспериментальных смесях на основе торфа. Основным компонентом субстрата был использован торф местного происхождения, добываемый в Козульском районе Красноярского края. Торф смешивали с опилками, вермикулитом, перлитом в разных пропорциях. В ряде экспериментальных смесей в качестве основного компонента вместо торфа был использован кокосовый субстрат. В качестве контрольного субстрата использовали торф производства компании ООО «ВЕЛТОРФ» по рецепту № 19с/1.

Проведенные исследования за ростом сеянцев сосны кедровой сибирской, выращиваемых с закрытой корневой системой в кассетах с различным составом субстратов позволили сделать ряд выводов: при использовании чистых торфов, целесообразно применение удобрений; полноценной заменой торфяным субстратам может служить кокосовый субстрат при условии смешивания его с вермикулитом в пропорции 50/50 %; имеет смысл обратить внимание на торфы местного происхождения для снижения себестоимости затрат.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, сеянцы, закрытая корневая система, субстрат, торф, кокосовый субстрат, перлит, вермикулит.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 379–383

GROWING SEEDLINGS OF *PINUS SIBIRICA* DU TOUR WITH A CLOSED ROOT SYSTEM ON EXPERIMENTAL SUBSTRATES

D. A. Konovalova, D. D. Ponomarev, N. P. Bratilova, A. A. Korotkov, A. V. Mantulina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: nbratilova@yandex.ru

*The issue of growing *Pinus sibirica* Du Tour seedlings with a closed root system on experimental mixtures based on peat has been studied. The main component of the substrate was peat of local origin, mined in the Kozulsky district of the Krasnoyarsk Krai. Peat was mixed with sawdust, vermiculite, and perlite in different proportions. In a number of experimental mixtures, coconut substrate was used as the main component instead of peat. Peat produced by VELTORF LLC was used as a control substrate according to recipe No. 19c/1.*

*Conducted studies of the growth of *Pinus sibirica* Du Tour seedlings grown with a closed root system in cassettes with different compositions of substrates allowed us to draw a number of conclusions: when using clean peat, it is advisable to use fertilizers; Coconut substrate can serve as a complete replacement for peat substrates, if mixed with vermiculite in a 50/50% ratio; It makes sense to pay attention to peats of local origin to reduce costs.*

Keywords: *Pinus sibirica*, seedlings, closed root system, substrate, peat, coconut substrate, perlite, vermiculite.

ВВЕДЕНИЕ

Использование посадочного материала с закрытой корневой системой – перспективное направление в лесокультурном производстве [1; 2].

Современные объемы лесовосстановления требуют решения проблемы по увеличению сроков посадки с сохранением возможной приживаемости. Что

в свою очередь позволяет сделать применение посадочного материала с закрытой корневой системой.

Применение посадочного материала с закрытой корневой системой имеет ряд преимуществ перед традиционными в отечественном лесокультурном производстве сеянцами и саженцами: сеянцы с закрытой корневой системой хорошо переносят транспор-

тировку, позволяют продлить протяженность лесокультурного сезона и, по мнению ряда исследователей, лучше приживаются в неблагоприятных лесорастительных условиях [3].

В настоящее время идет активный поиск удешевления выращивания растений с закрытой корневой системой и выработка ресурсосберегающей технологий.

При создании лесных культур сосны кедровой сибирской посадочным материалом с закрытой корневой системой необходимо подобрать наиболее продуктивный вид субстрата [2; 4].

Передовые технологии в тепличном хозяйстве базируются на особенностях применяемого субстрата и оптимизации режима питания. Выращивание сеянцев древесных пород в закрытом грунте осуществляется преимущественно на субстрате в виде торфа верхового типа болот [6]. Основой создания наиболее продуктивного питательного субстрата для посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой является верховой торф фрезерной заготовки [1].

Считается, что качественная основа для создания питательного субстрата представляет собой смесь из 60–70-процентного торфа и различных добавок, используемых для поддержки физико-химических свойств питательной среды для выращиваемых сеянцев [9].

Е. В. Титов [7] достаточно подробно описал технику выращивания сеянцев кедра сибирского с закрытой корневой системой. Такое выращивание сеянцев предполагает использование торфяных, пластиковых и других подготовленных под рассадку контейнерах высотой не менее 8 см и объемом 200–300 см³. В середине апреля готовят субстрат из смеси торфа и суглинка (1:1) с добавлением в него удобрений, из расчета на ведро смеси (10 л): суперфосфата гранулированного – 50 г, калийной соли – 25, доломитовой извести – 250 г. Им заполняют контейнеры, которые устанавливают на грунт в теплице.

Д. И. Мухортов и А. В. Антропова [5] в своей работе изложили результаты работ по изучению агрофизических свойств различных корнезакрывающих субстратов, проанализировав их влияние на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной, выращиваемой в контейнерах в качестве посадочного материала для лесовосстановительных работ. Результаты их исследований подтвердили, что на рост и развитие посадочного материала сосны обыкновенной с закрытой корневой системой в большей степени оказывают влияние агрофизические свойства субстрата, чем его агрохимические свойства. Регрессионный анализ зависимости биометрических параметров сеянцев от водно-физических свойств субстрата выявил обратную связь влияния массы сухого вещества от плотности. Наибольшее влияние плотность сложения субстрата оказывает на диаметр корневой шейки и массу сухого вещества сеянцев. Введение агроперлита в субстрат оказывает влияние на изменение его агрофизических свойств. С увеличением доли агроперлита плотность сложения субстрата увеличивается на 55 %, плотность твердой фазы на 9 %, что связано с повышением водоудерживающей способности субстрата.

Увеличивается число исследований по подбору оптимальных составов субстратов для полноценной замены торфу. Одним из подобных субстратов считается кокосовое волокно, характеризующееся катионообменной способностью и оптимальным соотношением воздуха и влаги [8].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлись сеянцы сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour), выращиваемые с закрытой корневой системой в кассетах Plantek-81 на экспериментальных составах субстратов в теплице, предоставленной СибГУ им. М. Ф. Решетнева по договору с ООО «Красноярский лесопитомник».

Семена собраны в Северо-Енисейском лесничестве, простратифицированы в зимних траншеях. В июне 2022 г. семена высеяны в кассеты с параметрами 38,5×38,5×8,0 см.

В качестве контрольного субстрата использовали торф производства компании ООО «ВЕЛТОРФ» по рецепту № 19с/1. Данная торфо-смесь в своем составе содержит фрезерный торф (50 %), резной торф (30 %), известняковую муку, агроперлит (20 %), смачивающий реагент (рН водный – 4,0–4,5) и Pg Mix (1 кг/м³) [10].

В экспериментальных смесях на основе торфа в качестве основного компонента субстрата использовался торф местного происхождения, предоставленный компанией ООО «КрасКИП», добываемый в Козульском районе Красноярского края. Торф смешивали с опилками, вермикулитом, перлитом в разных пропорциях. В ряде экспериментальных смесей в качестве основного компонента вместо торфа был использован кокосовый субстрат (табл. 1).

В данной работе приведены результаты роста сеянцев, выращиваемых без внесения удобрений и с использованием удобрения АгроМастер 18.18.18+3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе наблюдений за ростом сеянцев сосны кедровой сибирской установлено, что средняя высота сеянцев, выращиваемых без использования удобрений, к 18 августа 2022 г. составила 3,02±0,02 см. В зависимости от варианта опыта этот показатель равнялся от 2,6±0,09 см до 3,43±0,07 см. Уровень изменчивости показателя высоты – средний (табл. 2).

Лучший рост среди изученных вариантов наблюдался у сеянцев, выращиваемых на кокосовом субстрате с добавлением вермикулита в пропорции 50/50 (вариант 9). Различия с большинством других вариантов достоверны при уровне вероятности 95 %.

Хорошим ростом в высоту характеризовались также сеянцы в вариантах под номерами 5 (торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением опилок и вермикулита в пропорции 50/25/25 %) и 6 (торф ООО «КрасКИП» с опилками и вермикулитом в пропорции 33,3/33,3/33,3).

Отставали в росте сеянцы, выращиваемые на субстратах под номерами 16 (торф ООО «КрасКИП» с добавлением опилок и перлита в пропорции 50/25/25 %)

и 10 (кокосовый субстрат с добавлением перлита и вермикулита в равных пропорциях).

Следующая серия экспериментов включала в себя определение роли удобрения АгроМастер 18.18.18+3 при выращивании сеянцев сосны кедровой сибирской на разных субстратах.

Выявлено, что к 18.08.2022 средняя высота сеянцев, при выращивании которых использовалось удобрение, составила $3,01 \pm 0,02$ см. В зависимости от состава субстрата данный показатель был равен от $2,81 \pm 0,06$ см до $3,33 \pm 0,08$ см (табл. 3).

Таблица 1
Экспериментальные варианты субстратов

Номер варианта	Субстрат	Пропорции смеси, %
1	Торфо-смесь по рецепту № 19с/1 производства компании ООО «ВЕЛТОРФ» с добавлением агроперлита (контроль)	80/20
2	Торф производства компании ООО «КрасКИП»	100
3	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением вермикулита	50/50
4	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением опилок	50/50
5	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением опилок и вермикулита	50/25/25
6	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением опилок и вермикулита	33,3/33,3/33,3
7	Кокосовый субстрат без добавок	100
8	Кокосовый субстрат с добавлением перлита	50/50
9	Кокосовый субстрат с добавлением вермикулита	50/50
10	Кокосовый субстрат с добавлением перлита и вермикулита	33,3/33,3/33,3
11	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением перлита	50/50
12	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением перлита и вермикулита	33,3/33,3/33,3
13	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением кокосового субстрата	50/50
14	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением опилок и перлита	33,3/33,3/33,3
15	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением опилок, перлита и вермикулита	25/25/25/25
16	Торф производства компании ООО «КрасКИП» с добавлением опилок и перлита	50/25/25

Таблица 2
Высота сеянцев сосны кедровой сибирской, выращиваемых без внесения удобрений, см

Обозначение варианта субстрата	$\bar{x}$	$\pm m$	$\pm \sigma$	$V, \%$	$P, \%$	t_{Φ} (при $t_{05} = 1,96$)
1	2,74	0,07	0,41	14,9	2,7	6,83
2	2,93	0,08	0,56	19,3	2,7	4,81
3	3,08	0,09	0,57	18,5	2,9	3,10
4	3,16	0,06	0,44	13,8	2,0	2,94
5	3,27	0,07	0,52	16,0	2,2	1,56
6	3,23	0,06	0,37	11,6	1,8	2,20
7	2,78	0,09	0,53	19,2	3,1	5,87
8	2,75	0,06	0,39	14,1	2,2	7,37
9	3,43	0,07	0,53	15,4	2,0	–
10	2,70	0,05	0,33	12,2	1,8	8,51
11	2,90	0,06	0,46	15,9	2,2	5,65
12	3,16	0,07	0,49	15,5	2,2	2,77
13	2,96	0,10	0,54	18,2	3,4	3,76
14	3,23	0,07	0,50	15,3	2,1	2,00
15	2,91	0,06	0,42	14,3	2,1	5,68
16	2,60	0,09	0,49	18,9	3,6	7,09
Среднее	3,02	0,02	0,53	17,4	0,7	4,38

Следует отметить, что обработка кассет, заполненных экспериментальными питательными смесями, удобрением АгроМастер 18.18.18+3 в большинстве вариантов не оказало существенного влияния на рост сеянцев.

Однако при использовании торфо-смеси производства компании ООО «ВЕЛТОРФ» с добавлением агроперлита (контрольный вариант 1) и торфа производства компании ООО «КрасКИП» (вариант 2) в результате внесения удобрения высота сеянцев сосны

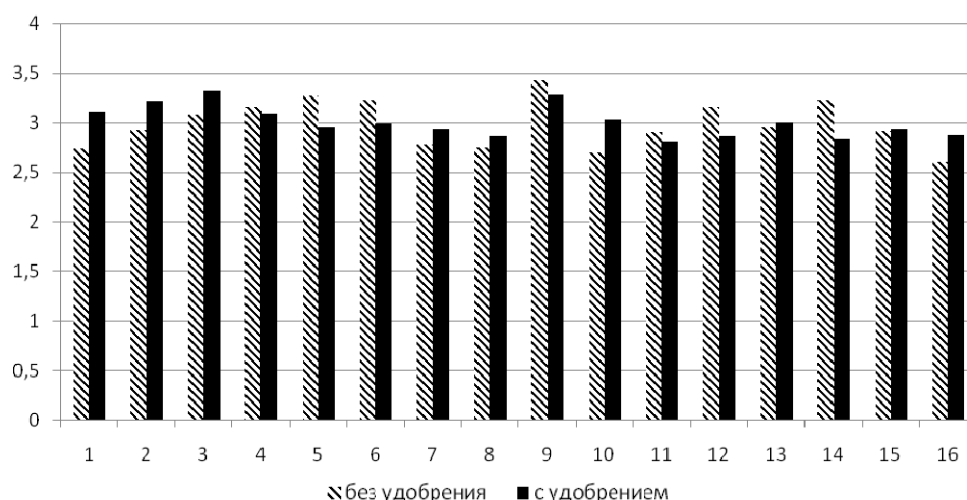
кедровой сибирской достоверно увеличилась. В первом варианте высота составила $3,11 \pm 0,05$ см против $2,74 \pm 0,07$ см. Во втором – высота сеянцев равнялась $3,22 \pm 0,08$ см в сравнении с $2,93 \pm 0,08$ см. Различия достоверны ($t_{\phi} = 4,30$ и $2,56$ соответственно, что больше t_{05}) (см. рисунок).

Внесение удобрения положительно сказалось также на высоте сеянцев, выращиваемых на субстратах в вариантах 3, 10 и 16.

Таблица 3

Высота сеянцев сосны кедровой сибирской, выращиваемых с использованием удобрения, см

Обозначение варианта субстрата	$\bar{x}$	$\pm m$	$\pm \sigma$	$V, \%$	$P, \%$	t_{ϕ} (при $t_{05} = 1,96$)
1	3,11	0,05	0,39	12,6	1,7	2,33
2	3,22	0,08	0,50	15,5	2,4	0,99
3	3,33	0,08	0,49	14,8	2,3	–
4	3,10	0,04	0,30	9,6	1,3	2,65
5	2,96	0,05	0,38	12,8	1,8	3,96
6	2,99	0,05	0,39	13,1	1,8	3,59
7	2,94	0,05	0,37	12,7	1,8	4,15
8	2,87	0,08	0,51	17,8	2,7	4,14
9	3,28	0,06	0,38	11,7	1,7	0,51
10	3,03	0,05	0,39	12,9	1,8	3,21
11	2,81	0,06	0,40	14,3	2,1	5,38
12	2,87	0,06	0,39	13,6	2,1	4,71
13	3,00	0,06	0,46	15,3	2,1	3,32
14	2,83	0,08	0,49	17,3	2,7	4,61
15	2,94	0,05	0,34	11,4	1,8	4,11
16	2,88	0,06	0,42	14,6	2,0	4,59
Среднее	3,01	0,02	0,44	14,5	0,5	3,27



Высота сеянцев сосны кедровой сибирской с ЗКС, выращиваемых на субстратах разного состава в двух вариантах: без удобрений и с внесением удобрения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования за ростом сеянцев сосны кедровой сибирской, выращиваемых с закрытой корневой системой в кассетах с различным составом субстратов позволили сделать ряд выводов:

- полноценной заменой торфяным субстратам может служить кокосовый субстрат при условии смешивания его с вермикулитом в пропорции 50/50 %;
- при использовании для выращивания сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой сис-

темой торфяной смеси производства компании ООО «ВЕЛТОРФ» и чистого торфа производства компании ООО «КрасКИП» целесообразно проведение обработки удобрения АгроМастер 18.18.18+3;

– при выращивании посадочного материала с закрытой корневой системой на торфяных смесях имеет смысл обратить внимание на торфы местного происхождения для снижения себестоимости затрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бабков А. В. Агротехнология выращивания посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой // Лесное и охотничье хозяйство. 2013. № 10. С. 9–13.

2. Братилова Н. П., Коротков А. А., Коновалова Д. А. Влияние субстрата на рост и развитие сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 5. С. 347–352.

3. Иващенко Н. Н., Лугинина Л. И. Выращивание сеянцев сосны обыкновенной в закрытом грунте / Нижний Новгород : НГТУ Успехи современной науки, 2017. Т. 1, № 8. С. 151–154.

4. Коновалова Д. А., Братилова Н. П., Коротков А. А. Рост и развитие сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на субстратах с разным составом // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений : материалы XXV Международ. науч. конф (19 апр. 2022 г., Красноярск). Красноярск, 2022. С. 55–57.

5. Мухортов Д. И., Антропова А. В. Рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной в контейнерах при использовании субстратов различной плотности сложения // Лесные экосистемы в условиях изменения климата, биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг : международный сборник научных статей (9 нояб. 2019 г., Йошкар-Ола). Йошкар-Ола : ПГТУ, 2019. С. 42–53.

6. Соколовский И. В., Домасевич А. А. Изменение реакции среды сепарированного верхового торфа // Труды БГТУ. Минск : БГТУ, 2016. № 1. С. 144–147.

7. Титов Е. В. Кедр. М. : Колос, 2007. 152 с.

8. Шахар Йоси, Шалмон Эли Структура кокосового субстрата – ключ к его качеству // ГАВРИШ, 2011. № 3. С. 26–28.

9. Якимов Н. И., Юренин А. В., Артемчук О. Ю. Использование нового водорастворимого удобрения для выращивания сеянцев сосны с закрытой корневой системой // Лесное хозяйство. 2012. № 1. С. 213–214.

10.Рецепт № 19с /1 – Великие Луки, 2008 – . – URL: https://veltorf.com/ru/recipes/13_13/.

REFERENCES

1. Babkov A. V. Agrotekhnologiya vyrashchivaniya posadochnogo materiala khvoynykh porod s zakrytoy kornevoy sistemoy // Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo, 2013. № 10. S. 9–13.

2. Bratilova N. P., Korotkov A. A., Konvalova D. A. Vliyaniye substrata na rost i razvitiye seyantsev sosny kedrovoy sibirskoy s zakrytoy kornevoy sistemoy // Khvoynyye boreal'noy zony. 2022. T. 40, № 5. S. 347–352.

3. Ivashchenko N. N., Luginina L. I. Vyrashchivaniye seyantsev sosny obyknovennoy v zakrytom grunte. Nizhniy Novgorod : NGATU Uspekhi sovremennoy nauki, 2017. T. 1, № 8. S. 151–154.

4. Konvalova D. A., Bratilova N. P., Korotkov A. A. Rost i razvitiye seyantsev sosny kedrovoy sibirskoy s zakrytoy kornevoy sistemoy na substratakh s raznym sostavom // Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy : materialy XXV Mezhdunar. nauch. konf (19 apr. 2022 g., Krasnoyarsk). Krasnoyarsk, 2022. S. 55–57.

5. Mukhortov D. I., Antropova A. V. Rost i razvitiye seyantsev sosny obyknovennoy v konteynerakh pri ispol'zovanii substratov razlichnoy plotnosti slozheniya // Lesnyye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata, biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyy monitoring : Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh statey (9 noyab. 2019 g., Yoshkar-Ola). Yoshkar-Ola : PGU, 2019. S. 42–53.

6. Sokolovskiy I. V., Domasevich A. A. Izmeneniye reaktsii sredy separirovannogo verkhovogo torfa // Trudy BGTU. Minsk : BGTU, 2016, № 1. S. 144–147.

7. Titov Ye. V. Kedr. Moskva : Kolos, 2007. 52 s.

8. Shakhar Yosi, Shalmon Eli. Struktura kokosovogo substrata – klyuch k yego kachestvu // GAVRISH, 2011. № 3. S. 26–28.

9. Yakimov N. I., Yurenin A. V., Artemchuk O. Yu. Ispol'zovaniye novogo vodorastvorimogo udobreniya dlya vyrashchivaniya seyantsev sosny s zakrytoy kornevoy sistemoy // Lesnoye khozyaystvo, 2012. № 1. S. 213–214.

10.Retsept № 19s /1 – Velikiye Luki, 2008 – . – URL: https://veltorf.com/ru/recipes/13_13/.

© Коновалова Д. А., Пономарев Д. Д.,
Братилова Н. П., Коротков А. А.,
Мантулина А. В., 2023

Поступила в редакцию 25.07.2023
Принята к печати 02.10.2023

РОСТ И ПРОДУКТИВНОСТЬ СОСНОВО-ЛИСТВЕНИЧНЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ СТЕПИ ЮГО-ЗАПАДНОЙ СИБИРИ*

А. С. Чичкарев, А. А. Маленко

Алтайский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 656049, г. Барнаул, просп. Красноармейский, 98

Приводятся данные об особенностях роста и продуктивности 36-летних сосново-лиственничных культур на дерново-подзолистых слабодерновых супесчаных почвах (I категория лесопригодности), в условиях степи юго-западной Сибири. Лиственница до 23-летнего возраста по диаметру и до 14–15 лет в высоту имеет лучшие показатели роста, чем сосна, затем лидерство в росте переходит к сосне. Преобладание объемного показателя у сосны наступает в возрасте 28–30 лет, а более интенсивное увеличение прироста по объему происходит с 20 летнего возраста культур. В сложившихся лесорастительных условиях местная сосна обыкновенная по сохранности и таксационным показателям превосходит лиственницу сибирскую алтайской формы. Запас сырораствующей древесины сосны составил 281 м³/га, или 75,4 % от общего. Выявленные особенности совместного произрастания двух пород в лесных культурах следует учитывать при создании новых посадок.

Ключевые слова: лесопригодная почва, сосна, лиственница, культуры, рост, продуктивность, таксационные показатели.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 384–389

GROWTH AND PRODUCTIVITY OF PINE AND LARCH CROPS IN THE STEPPE OF SOUTHWESTERN SIBERIA

A. S. Chichkarev, A. A. Malenko

Altai State Agricultural University
98, Krasnoarmeyskiy Prospekt, Barnaul, Altai Krai, 656049, Russian Federation

Data are presented on the characteristics of growth and productivity of 36-year-old pine-larch crops on sod-podzolic weak-soddy sandy loam soils (I category of forest suitability), in the steppe of southwestern Siberia. Larch has better growth rates than pine up to 23 years of age in diameter and up to 14–15 years in height. Then the leadership in growth goes to pine. The predominance of the volumetric indicator in pine occurs at the age of 28–30 years, and a more intensive increase in volume growth occurs from the age of 20 years. In the current forest conditions, local Scots pine is superior to Siberian larch of the Altai form in terms of preservation and taxation indicators. The supply of damp-growing pine wood amounted to 281 m³/ha, or 75.4 % of the total. The identified features of the joint growth of two species in forest plantations should be taken into account when creating new plantings.

Keywords: forest-suitable soil, pine, larch, forestry crops, growth, forest productivity, taxational specifications of growing stock.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих и хозяйственно-ценных древесных пород, имеет большое научное значение, при обосновании ряда лесохозяйственных мероприятий связанных с ведением лесного хозяйства на современном уровне. Это актуально для степной зоны Алтайского края, где произрастает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), которая сформировалась здесь как степной экотип, обладающий большой биологической пластичностью, позволяющий ей произрастать в самых экстремальных экологических условиях [1]. Од-

нако такое положение не исключает возможность широкого внедрения в лесокультурное производство лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.), которая в естественном ареале растет быстрее сосны и превосходит другие породы за пределами ареала, являясь высокопродуктивным лесобразователем [2–7]. В естественном виде лиственница сибирская в ленточных борах занимает небольшие участки в наиболее благоприятных условиях Алеусского бора. Искусственные насаждения лиственницы в борах встречаются редко, а имеющиеся посадки уступают сосне в сохранности, росте и продуктивности [2]. Многолетний положи-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-34-90038.

тельный опыт достигнут лесоводами Алтая при создании государственных лесных полос с участием лиственницы в Кулундинской степи [9; 10].

Цель работы: Изучить особенности роста и продуктивности сосны и лиственницы в культурах на лесопригодных почвах Чупинского бора, расположенного в условиях степи.

Объектом исследований служили 36-летние сосново-лиственничные культуры сплошного типа, расположенные в степной части левобережье р. Порозиха, удаленные от ее русла на расстоянии 1,5–2 км. Рельеф слабо всхолмленный, положение пробы относительно рельефа – слабо покатое. Почва под культурами подготовлена плужными бороздами на глубину 35–40 см по схеме 2,5×0,7 м, направление рядов на юго-запад. Посадка весенняя механизированная с помощью МЛЮ-1. Посадочным материалом служили сеянцы сосны обыкновенной и лиственницы сибирской 2-летнего возраста, выращенные в питомнике лесничества из семян сосны местной репродукции и лиственницы Алтайской формы.

В работе использованы апробированные методики, применяемые в лесокультурном производстве [11], метод пробных площадей (ПП) [12] и рекомендации [13]. Изучение почвенного покрова выполнено на полнопрофильных почвенных разрезах, охватывающих все генетические горизонты. Описание морфологического строения профиля почв, отбор образцов для изучения физико-химических свойств почв проведены общепринятыми методами [14–20]. Таксационные показатели определяли общепринятыми в лесном хозяйстве методами [21], расчет запаса древесины проводился по объемным таблицам для сосновых и лиственничных древостоев Западной Сибири [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что почва под лесными культурами характеризуется как дерново-подзолистая слабодерновая супесчаная.

A_0 0–5 см – лесная подстилка, обильно пронизан корнями, опад хвои, мох, рыхлый;

A_1 5–10 см – гумусово-элювиальный горизонт, серый, супесчаный, уплотненный, сухой, комковатая структура, обильно пронизан корнями, переход постепенный;

A_1A_2 15–25 см – переходный горизонт, белесовато-серый, супесчаный, уплотненный, сухой, зачатки структуры, обильно пронизан корнями, переход постепенный;

A_2 25–35 см – элювиальный горизонт, белесовато-серый, песчаный, уплотненный, увлажненный, зачатки структуры, крупные корни, переход постепенный;

A_2B 35–42 см – белесовато-желтый, песчаный, уплотненный, увлажненный, зачатки структуры, переход постепенный;

B 42–90 см – серовато-желтый, песчаный, уплотненный, влажный, бесструктурный, переход постепенный;

BC 90–140 см – буровато-желтый, песчаный, уплотненный, влажный, бесструктурный, переход постепенный;

$C > 140$ см – желтовато-бурый, влажный, бесструктурный, песчаный.

Вскипание от 10 % HCl в профиле не отмечается. Почва по содержанию гумуса характеризуется как слабогумусированная (4,1 %). Реакция почвенного раствора в верхнем горизонте слабокислая, вниз по профилю изменяется до слабощелочной.

На ход роста сосново-лиственничных культур по диаметру, в высоту и др. таксационным показателям оказывают влияние климатические, физические и агрохимические свойства почв, густота, происхождение древостоев и прочие факторы [5].

Для аппроксимации средних диаметров лесных культур сосны и лиственницы (рис. 1) была выбрана функция Теразаки (1) [23], которая имеет следующий вид:

$$Y = ae^{-b/x}. \quad (1)$$

где Y – искомый таксационный показатель, см; x – средний возраст древостоя, лет; e – постоянная Эйлера; a , b , – коэффициенты уравнения.

Коэффициенты уравнений, описывающие ход роста по диаметру сосновых древостоев (рис. 1) приведены в табл. 1. Коэффициенты уравнений достоверны на 5%-ном уровне значимости.

Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что до 23-летнего возраста средний диаметр лиственницы превышает значение среднего диаметра сосны в культурах, однако после указанного возраста, сосна опережает лиственницу по этому показателю. Причиной различий в ходе роста по диаметру двух пород, по видимому, связано с почвенно-климатическими условиями, которые являются более благоприятными для роста местной сосны.

Таблица 1
Характеристика уравнений хода роста по диаметру исследуемых древостоев

Древесная порода	Значения коэффициентов		Коэффициент детерминации (R^2)
	a	b	
Сосна	17,28	9,01	0,982
Лиственница	14,81	5,38	0,990

Средняя ошибка аппроксимации полученных уравнений довольно высокая. Возможно, это объясняется значительной неоднородностью полевых данных. Следовательно, при составлении таблиц хода роста будет необходимо ввести дополнительный критерий отнесения древостоев к одному естественному ряду роста и развития.

Для аппроксимации значений средних высот в лесных культурах сосны и лиственницы (рис. 2) также была выбрана функция Теразаки (1) [23].

Коэффициенты уравнений, описывающих ход роста по средней высоте сосны и лиственницы при совместном произрастании в культурах (рис. 2) приведены в табл. 2. Коэффициенты уравнений достоверны на 5%-ном уровне значимости.

Данные рис. 2 показывают на схожую ситуацию, которая имела место со средними диаметрами, однако линия тренда с преобладанием роста сосны в сравнении с лиственницей в высоту начинается в возрасте 14–15 лет. То есть интенсивный рост сосны в высоту в сравнении с лиственницей, начинает проявляться раньше, чем по диаметру. Сходство закономерностей в ходе роста древостоев по диаметру и высоте объясняется очень тесной связью между этими таксационными показателями.

Таблица 2
Характеристика уравнений зависимости средних высот древостоев от их возраста

Древесные породы	Значения коэффициента		Коэффициент детерминации (R^2)
	a	b	
Сосна	31,16	23,40	0,977
Лиственница	22,27	18,8	0,981

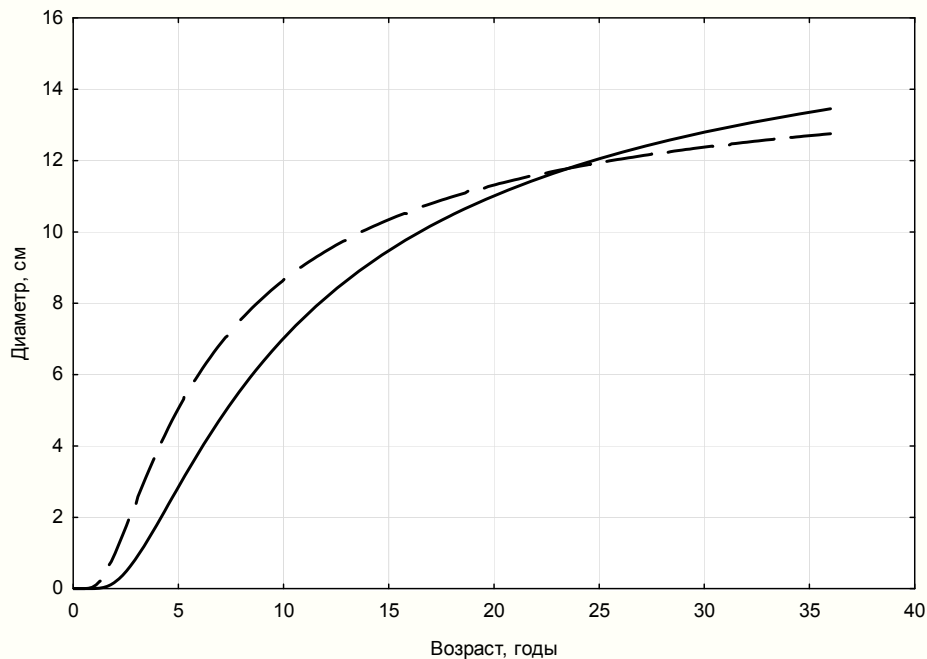


Рис. 1. Ход роста древостоев по диаметру:
сосна – сплошная линия; лиственница – пунктирная линия

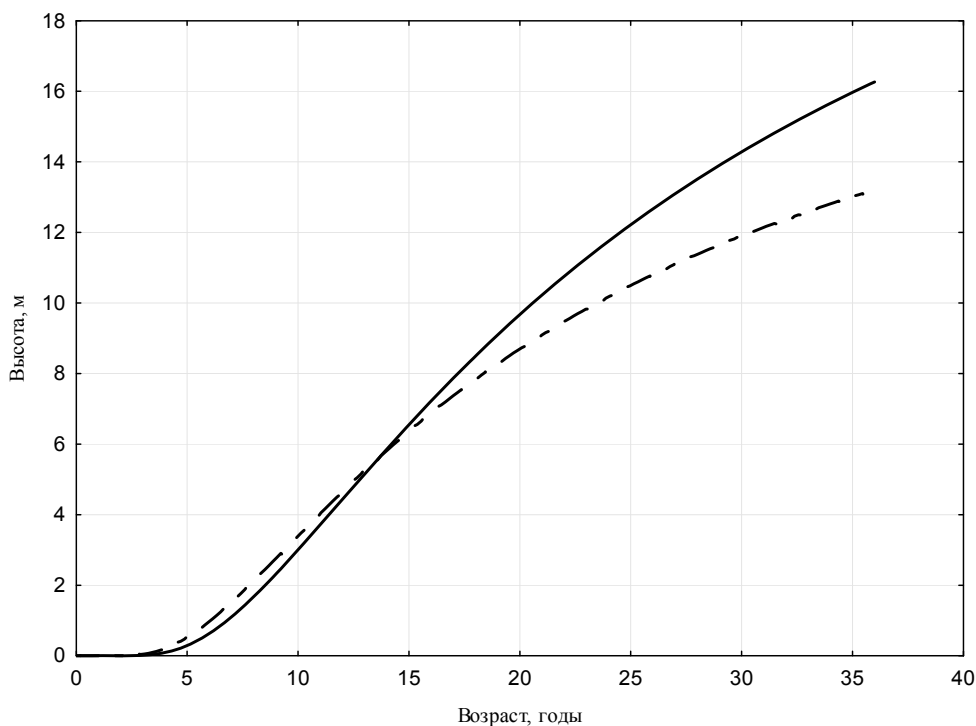


Рис. 2. Ход роста сосновых древостоев по средней высоте:
сосна – сплошная линия; лиственница – пунктирная линия

Таким образом, ход роста культур сосны в высоту на протяжении первого и второго классов возраста происходит по Ia классу бонитета, а лиственницы – соответствует верхней границе I класса бонитета.

По данным замеров модельных деревьев сосны и лиственницы в исследуемых культурах построены пирамидальные графики (рис. 3), которые отражают рост по диаметру, высоте и объему стволов двух исследуемых пород.

Данные табл. 3 подтверждают отмеченные выше возрастные изменения в росте по диаметру и высоте, которые повлекли изменение объемов стволов деревьев двух пород. Преобладание объемного показателя у сосны перед лиственницей происходит в возрасте 28–30 лет. При этом более интенсивное увели-

чение прироста по объему у сосны происходит с 20 летнего возраста культур.

В 36-летнем возрасте сосна и лиственница при совместном произрастании в режиме самоизреживания имели сильно различимые показатели сохранности (табл. 4), которые составили: у сосны – 37,9 %, лиственницы – 18,3 % по числу стволов. В сложившихся лесорастительных условиях в одновозрастном смешанном древостое сосна имеет значительно лучшие таксационные показатели, чем лиственница. Запас сырораствующей древесины сосны составил 281 м³/га, или 75,4 % от общего. Запасы сухостойного леса представлены преимущественно сосной (98 %), средний диаметр сухостойных деревьев которой составил 50 % от растущих деревьев.

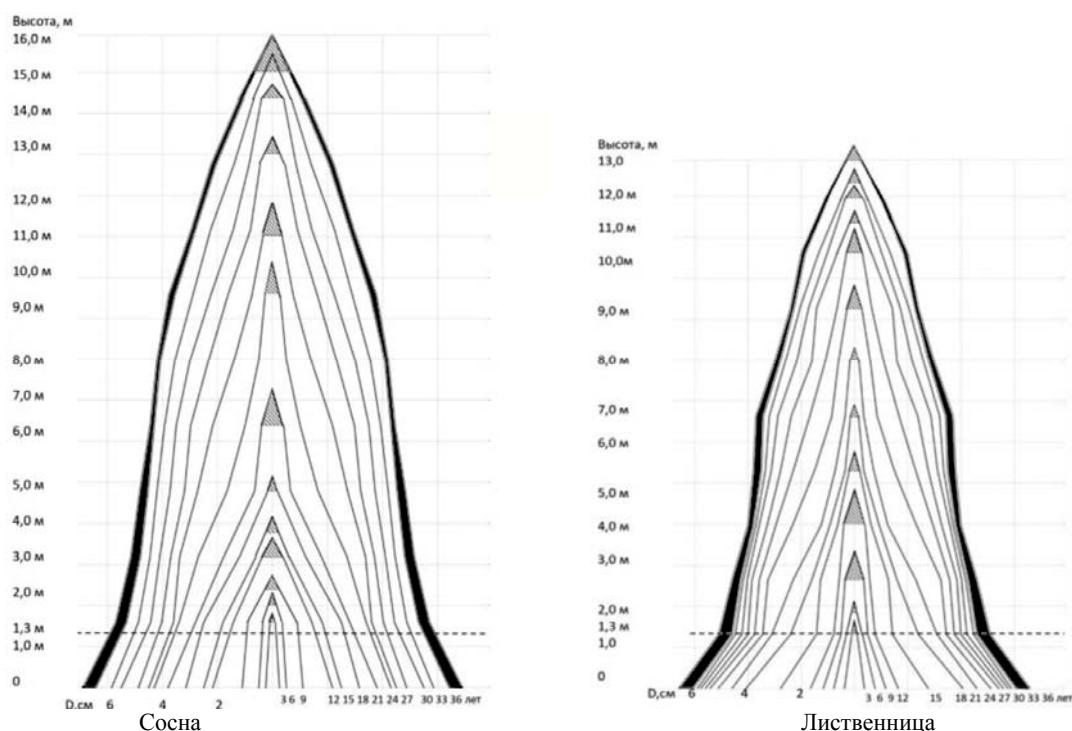


Рис. 3. Ход роста сосново-лиственничных культур

Таблица 3
Изменение таксационных показателей сосны и лиственницы с возрастом

Возраст, лет	Исследуемые показатели							
	Сосна				Лиственница			
	высота, м	диаметр, см	объем, м ³	прирост по объему, мм	высота, м	диаметр, см	объем, м ³	прирост по объему, мм
3	2,2	1,03	0,001	–	2,15	1,52	0,002	–
6	2,7	2,15	0,004	0,003	3,3	2,13	0,005	0,003
9	3,6	4,27	0,021	0,017	4,85	3,12	0,015	0,01
12	4,2	4,99	0,033	0,012	5,7	5,32	0,051	0,036
15	5,1	6,2	0,062	0,029	6,95	7,83	0,134	0,083
18	7,2	7,47	0,126	0,064	8,2	8,8	0,2	0,066
21	10,3	8,4	0,228	0,102	9,8	9,8	0,296	0,096
24	11,8	8,88	0,292	0,064	11,2	10,35	0,377	0,081
27	13,3	9,61	0,386	0,094	11,6	10,6	0,41	0,033
30	14,7	10,87	0,546	0,16	12,2	10,93	0,458	0,048
33	15,4	11,53	0,643	0,097	12,7	11,24	0,504	0,046
36	15,98	12,69	0,809	0,166	13,25	11,67	0,567	0,063

Таблица 4
Таксационные показатели сосново-лиственничных культур

Порода	Возраст, лет	Густота, тыс.шт./га	Средние		Класс бонитета	Полнота		Запас, м ³ /га		Средний прирост, м ³ /га
			диаметр, см	высота, м		абсолютная, м ² /га	относительная	сырора-стущий	сухостоя	
С	36	2,16	14,6	17,2	Ia	35,95	1,0	281,7	18,4	7,8
Л-ца	36	1,04	11,6	15,6	I	10,49	0,3	91,8	0,3	2,6
Общее	—	3,2	—	—	—	46,44	—	373,5	18,7	—

Небольшая густота и запас сухостоя лиственницы в возрасте исследований указывает на интенсивный отмирание семян этой породы еще на стадии приживаемости, на что указывал А. А. Маленко [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рост и продуктивность сосны и лиственницы при совместном произрастании в культурах на дерново-подзолистых слабодерновых супесчаных почвах, отнесенных к I категории лесопригодности, в условиях степи юго-западной Сибири имеют большие различия. Лиственница до 23-летнего возраста по диаметру и до 14–15 лет в высоту имеет лучшие показатели роста, чем сосна. По истечении отмеченных возрастных периодов лидерство в росте по диаметру и высоте переходит к сосне. Преобладание объемного показателя у сосны перед лиственницей происходит в возрасте 28–30 лет, а более интенсивное увеличение прироста по объему у сосны происходит с 20 летнего возраста культур. В сложившихся лесорастительных условиях местная сосна обыкновенная по сохранности и таксационным показателям превосходит лиственницу сибирскую алтайской формы. Запас сырораствующей древесины сосны составил 281 м³/га, или 75,4 % от общего. Выявленные особенности совместного произрастания двух пород в лесных культурах следует учитывать при создании новых посадок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Правдин Л. Ф. Сосна обыкновенная. М. : Наука, 1964. 192 с.
2. Маленко А. А. Рост и продуктивность искусственных насаждений в ленточных борах Западной Сибири : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 2012. 40 с.
3. Яблоков А.С. Культура лиственницы и уход за насаждениями. М. : Гослесбумиздат, 1934. 128 с.
4. Тимофеев В. П. Лиственница в культуре. М.-Л., 1947. 295 с.
5. Мелехов И. С. Лесоведение : учебник. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1980. 408 с.
6. Тимофеев В. П. Основы лесовыращивания лиственницы: Опыт выращивания лесных культур лиственницы в РСФСР. М. : Лесн. пром-сть, 1976. С. 6–60.
7. Тимофеев В. П. Лиственница в культуре. М. : Лесн. пром-сть, 1981. 162 с.
8. Федотов И. А. Рост и продуктивность культур лиственницы сибирской на юго-востоке Европейской части СССР : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Саратов, 1956. 18 с.

9. Основы полезащитного лесоразведения / А. П. Симоненко, Я. Н. Ишутин, Е. Г. Парамонов, Т. И. Симоненко. Барнаул : Дельта, 2005. 284 с.

10. Ключников М. В., Парамонов Е. Г. Формирование лиственничных экосистем в условиях современного антропогенного воздействия. Проблемы степного лесоразведения. Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2009. 243 с.

11. Огиевский В. В., Хиров А. А. Обследование и исследование лесных культур. М. : Лесн. пром-сть, 1964. 50 с.

12. ОСТ 56-69–83 Пробные площади лесоустроительные, метод закладки. 59 с.

13. Основы фитомониторинга : учебное пособие / Н. П. Бунькова, С. В. Залесов, Е. А. Зотеева, А. Г. Матасумова. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2011. 89 с.

14. Классификация и диагностика почв СССР. М. : Колос, 1977. 224 с.

15. Общесоюзная инструкция по почвенным исследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований. М. : Колос, 1973. 94 с.

16. ГОСТ 12536–2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

17. ГОСТ 26423–85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки.

18. ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества.

19. ГОСТ 26212–2021. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО.

20. ГОСТ 17.4.4.01. Охрана природы. Почвы. Методы определения емкости катионного обмена.

21. Анучин Н. П. Лесная таксация. М. : Лесн. пром-ость, 1977. 512 с.

22. Сортиментные и товарные таблицы для древостоев Западной и Восточной Сибири / Э. Н. Фалалеев [и др.]. Красноярск, 1991. 146 с.

23. Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск : Наука, 1977. 157 с.

REFERENCES

1. Pravdin L. F. Sosna obyknovennaya. M. : Nauka, 1964. 192 s.
2. Malenko A. A. Rost i produktivnost' iskusstvennykh nasazhdeniy v lentochnykh borakh Zapadnoy Sibiri : avtoref. dis. ... d-ra s.-kh. nauk. Ekaterinburg, 2012. 40 s.
3. Yablokov A.S. Kul'tura listvennitsy i ukhod za nasazhdeniyami. M. : Goslesbumizdat, 1934. 128 s.

4. Timofeyev V. P. Listvennitsa v kul'ture. M.-L., 1947. 295 s.
5. Melekhov I. S. Lesovedeniye : uchebnik. M. : MGTU im. N. E. Bauman, 1980. 408 s.
6. Timofeyev V. P. Osnovy lesovyrashchivaniya listvennitsy: Opyt vyrashchivaniya lesnykh kul'tur listvennitsy v RSFSR. M. : Lesn. prom-st', 1976. S. 6–60.
7. Timofeyev V. P. Listvennitsa v kul'ture. M. : Lesn. prom-st', 1981. 162 s.
8. Fedotov I. A. Rost i produktivnost' kul'tur listvennitsy sibirskoy na yugo-vostoke Evropeyskoy chasti SSSR : avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk. Saratov, 1956. 18 s.
9. Osnovy polezashchitnogo lesorazvedeniya / A. P. Simonenko, Ya. N. Ish-htin, E. G. Paramonov, T. I. Simonenko. Barnaul : Del'ta, 2005. 284 s.
10. Klyuchnikov M. V., Paramonov E. G. Formirovaniye listvennichnykh ekosistem v usloviyakh sovremennogo antropogennogo vozdeystviya. Problemy stepnogo lesorazvedeniya. Barnaul : Izd-vo Alt. Un-ta, 2009. 243 s.
11. Ogiyevskiy V. V., Khironov A. A. Obsledovaniye i issledovaniye lesnykh kul'tur. M. : Lesn. prom-st', 1964. 50 s.
12. OST 56-69-83 Probnyye ploshchadi lesoustroitel'nyye, metod zakladki. 59 s.
13. Osnovy fitomonitoringa : uchebnoye posobiye / N. P. Bun'kova, S. V. Zalesov, E. A. Zoteyeva, A. G. Magasumova. Ekaterinburg : Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2011. 89 s.
14. Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR. M. : Kolos, 1977. 224 s.
15. Obshchesoyuznaya instruktsiya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnykh poch-vennykh kart zemlepol'zovaniy. M. : Kolos, 1973. 94 s.
16. GOST 12536-2014. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava.
17. GOST 26423-85. Pochvy. Metody opredeleniya udel'noy elektricheskoy provodimosti, pH i plotnogo ostatka vodnoy vytyazhki.
18. GOST 26213-2021. Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva.
19. GOST 26212-2021. Pochvy. Opredeleniye gidroliticheskoy kislotnosti po metodu Kappena v modi-fikatsii TsINAO.
20. GOST 17.4.4.01. Okhrana prirody. Pochvy. Metody opredeleniya emkosti kationnogo obmena.
21. Anuchin N. P. Lesnaya taksatsiya. M. : Lesn. prom-ost', 1977. 512 s.
22. Sortimentnyye i tovarnyye tablitsy dlya drevostoyev Zapadnoy i Vostochnoy Sibiri / E. N. Falaleyev [i dr.]. Krasnoyarsk, 1991. 146 s.
23. Kuz'michev V. V. Zakonomernosti rosta drevostoyev. Novosibirsk : Nauka, 1977. 157 s.

© Чичкарев А. С., Маленко А. А., 2023

Поступила в редакцию 11.08.2023
Принята к печати 02.10.2023

АНТРОПОГЕННАЯ ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЛЕСОВ СРЕДНЕСИБИРСКОГО ПОДТАЕЖНО-ЛЕСОСТЕПНОГО РАЙОНА

В. А. Иванов^{1,2}, Д. В. Зверева², Г. А. Иванова¹, Е. О. Бакшеева²

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

Для оценки антропогенной пожарной опасности лесов среднесибирского подтаежно-лесостепного района мы попытались выявить причины лесных пожаров и основные районы их возникновения на данной территории, а также горимость лесов, пожарные пики и другие факторы и закономерности.

Самые распространенные и разрушительные последствия приносит антропогенный фактор, доля пожаров от молний и жаркой засушливой погоды не так велика. С увеличением численности населения и освоением новых территорий, строительством дорог и жилых домов рекреационная нагрузка возрастает.

Абсолютное большинство природных пожаров, наносящих большой экологический ущерб, возникает по вине человека. Одним из первых врагов леса является огонь. Вред от лесных пожаров – это не только погибшие или поврежденные пламенем деревья, в ослабленных огнем насаждениях развиваются очаги вредных лесных насекомых, эрозийные процессы, происходит смыв органических веществ из почвы. Пожары уничтожают кормовую базу для жителей леса, зверей и птиц. Высокая степень хозяйственной, промышленной и рекреационной освоенности тайги определяет высокую степень антропогенной пожарности лесов.

Нужно заметить, что в лесничествах Красноярского края с высокой степенью освоенности имеется возможность и необходимость применения мероприятий по снижению антропогенной, природной пожарной опасности, противопожарному устройству, способствующих повышению оперативности тушения пожаров.

Необходимость комплексных мероприятий важна для уменьшения и исключения недобросовестного использования лесных территорий. Большой пласт мероприятий должен отводиться на противопожарную пропаганду и агитацию местного населения.

Был проведен анализ причины возникновения загораний и условий, формирующих возможные риски антропогенной пожароопасности, что поможет планированию комплексных профилактических противопожарных мероприятий и позволит снизить показатель частоты возникновения пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, пожароопасность, антропогенная нагрузка, Среднесибирский подтаежно-лесостепной район.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 390–398

ANTHROPOGENIC FIRE HAZARD OF FORESTS IN THE CENTRAL SIBERIAN SUBTAIGA-FOREST-STEPPE REGION

V. A. Ivanov^{1,2}, D. V. Zvereva², G. A. Ivanova¹, E. O. Baksheeva²

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

To assess the anthropogenic fire hazard of forests in the Central Siberian subtaiga-forest-steppe region, we tried to identify the causes of forest fires and the main areas of their occurrence in this territory, as well as forest fire, fire peaks and other factors and patterns.

The most common and destructive consequences are caused by the anthropogenic factor; the share of fires caused by lightning and hot, dry weather is not so large. With the increase in population and the development of new territories, the construction of roads and residential buildings, the recreational load increases.

The vast majority of natural fires that cause great environmental damage occur due to human fault. One of the first enemies of the forest is fire. Damage from forest fires is not only trees that are killed or damaged by fire; in fire-damaged plantings, pockets of harmful forest insects develop, erosion processes occur, and organic matter is washed away from the soil. Fires destroy the food supply for forest inhabitants, animals and birds. The high degree of economic, industrial and recreational development of the taiga determines the high degree of anthropogenic fire in forests.

It should be noted that in forest districts of the Krasnoyarsk Krai with a high degree of development, there is the possibility and necessity of using measures to reduce anthropogenic and natural fire hazards, fire-fighting devices that help increase the efficiency of fire extinguishing.

The need for comprehensive measures is important to reduce and eliminate unfair use of forest areas. A large portion of activities should be allocated to fire prevention propaganda and agitation of the local population.

An analysis was carried out of the causes of fires and the conditions that create possible risks of anthropogenic fire hazard, which will help plan comprehensive fire prevention activities and will reduce the frequency of fires.

Keywords: forest fires, fire hazard, anthropogenic load, Central Siberian subtaiga-forest-steppe region.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно на территории Российской Федерации возникают тысячи лесных пожаров. Экономический и экологический ущерб, который наносят лесные пожары, огромен. В последние десятилетия наметилась тенденция к возрастанию количества и площади лесных пожаров. Это связано не только с изменением климата и увеличением грозоактивности, но и в большей мере с активным ростом освоения лесных территорий и связанной с этим деятельностью населения [1]. Соответственно, увеличивается и количество лесных пожаров по антропогенным причинам.

В последние десятилетия на территории Сибири также увеличилось количество лесных пожаров, и в два раза возросли площади лесов, пройденных пожарами [2].

По определению Н. П. Курбатского, «антропогенная пожарная опасность – это пожарная опасность охраняемой территории, обусловленная появлением источников огня в связи с деятельностью людей и относящаяся к многолетнему периоду» [4]. Н. П. Курбатский (1964) [3] установил связь частоты пожаров от плотности населения. Некоторые проблемы закономерностей возникновения пожаров по вине человека и их профилактики рассмотрены в работах Г. А. Мокеева [5], А. Д. Вакурова [6], Н. П. Курбатского и П. А. Цветкова [7], П. Н. Львова и А. И. Орлова [8], Ю. А. Андреева [9].

Вопрос возникновения лесных пожаров по антропогенным причинам наиболее глубоко исследован Г. П. Телицыным (1988) на Дальнем Востоке, где в более в 80 % случаев основной причиной пожаров является деятельность человека [10]. Антропогенное происхождение пожаров подтверждается уменьшением их количества по мере удаления от населенных пунктов и дорог. Им был уточнен характер ранее выявленной Н. П. Курбатским [3] зависимости частоты пожаров от плотности населения, получены коэффициенты, отражающие пожарную опасность населения для леса, предложены математические модели для определения вероятности возникновения пожаров в зависимости от расстояния до точечных и линейных объектов. Но при этом им практически не учитывался социально – демографический состав виновников возникновения пожаров, а величина плотности населения, чаще всего используемая для определения уровня антропогенной пожарной опасности в лесу, приводит к усреднённой оценке пространственного распределения пожаров.

Частота пожаров помимо плотности населения зависит также от погодных условий, коэффициента пожарной опасности территории по лесорастительным

условиям, степени посещаемости лесов населением. Установлено, что количество лесных пожаров зависит от количества населенных пунктов, и численности жителей в них. Крупные пожары, как правило, происходят в более удаленных местах. Анализ полученных автором корреляций показывает, что с уменьшением плотности населения уменьшается и зависимость числа лесных пожаров от этого показателя [10; 11].

В тоже время, приведенные авторами методы расчета частоты появления антропогенных источников огня и возникновения пожаров в лесу не лишены недостатков. Величина плотности населения, используемая чаще всего, приводит к усреднению оценки пространственного распределения лесных пожаров. К тому же определение частоты пожаров, не учитывает лесорастительные и погодные условия, что еще больше искажает действительность.

С целью оценки антропогенной пожарной опасности лесов среднесибирского подтаежно-лесостепного района мы попытались выявить причины лесных пожаров и основные районы их возникновения на данной территории, а также горимость лесов, пожарные максимумы и другие факторы и закономерности. Установление истинных причин возникновения загораний и условий, формирующих возможные риски антропогенной пожароопасности, поможет планированию комплексных профилактических противопожарных мероприятий и позволит снизить показатель частоты возникновения пожаров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для анализа горимости лесов Среднесибирского подтаежно-лесостепного района Красноярского края были использованы данные о лесных пожарах за 2000–2020 гг. а также сведения о погоде по данным «ИСДМ-Рослесхоз» [12].

Фактические характеристики горимости, такие как количество и частота пожаров, показатель горимости территорий вычислялись по методике М. А. Софронова [13]. Стандартными методами для характеристики горимости вычислялись относительные показатели:

частота возникновения пожаров (v):

$$v = n_i \times \frac{10^5}{S}, \quad (1)$$

где n_i – число пожаров в i -м кластере, приведенное к общей площади рассматриваемой территории (S) и нормированное на 10^5 га; относительная площадь пожаров за сезон (γ),

$$\gamma = S_{\Pi} * 10^5 / S, \quad (2)$$

где S_{Π} – суммарная площадь пожаров за пожароопасный сезон; S – общая площадь охраняемых лесов;

Для оценки лесной территории по фактической горимости за анализируемый период принята шкала оценки степени горимости лесов, разработанная М. А. Софроновым [13] (табл. 1).

Определение коэффициента пожарной опасности населения для леса проводилась по методике Г. П. Телицына [14]. Согласно этой методике, определение пожарной опасности для леса от населения рассчитывали по формуле

$$K = \Pi / C * D * S * \sqrt{P}, \quad (3)$$

где K – коэффициент пожарной опасности населения для леса; Π – годовое количество лесных пожаров, возникающих по вине человека на территории лесничества, пожаров/год; C – коэффициент природной пожарной опасности территории; D – сумма дней с III – V классами пожарной опасности по условиям погоды за сезон; S – охраняемая от пожаров площадь, млн га; P – плотность населения, чел./км².

Природная пожарная опасность территории обычно определяется по шкале И. С. Мелехова [15]. Но данная шкала не дает представления о доли территории, переходящей в пожароопасное состояние при соответствующем классе пожарной опасности по условиям погоды, и не может применяться в математических расчетах в связи с дискретностью ее показателей. Для этого используют коэффициент природной пожарной опасности лесных участков [16], который определяется как доля длительности пребывания участка в пожароопасном состоянии от продолжительности пожароопасного сезона. Связь классов природной

пожарной опасности по шкале И. С. Мелехова [15] с коэффициентом природной пожарной опасности (C), приведена в табл. 2.

Индекс сезонности месяца (I_{sm}) рассчитывался по методике Певцовой Т. А. (2015) по формуле

$$I_{sm} = \Pi_m / \Pi_s, \quad (4)$$

где Π_m – количество возникших лесных пожаров за месяц; Π_s – среднемесячное количество пожаров за пожароопасный сезон.

Коэффициент значимости дней недели по числу возникших пожаров (I_{dw}) рассчитывается по формуле

$$I_{dw} = \Pi_d / \Pi_w, \quad (5)$$

где Π_d – количество возникших лесных пожаров за день недели; Π_w – среднее количество пожаров в день в пожароопасном сезоне.

Вероятность возникновения числа пожаров в день вычисляется при помощи закона Пуассона по формуле

$$Pm = \lambda m / m!, \quad (6)$$

где Pm – вероятность возникновения пожаров; λ – определяется как среднее число пожаров в день для каждого класса пожарной опасности (КПО) и вычисляется путем нахождения отношения числа пожаров, возникших при определенном КПО, к числу дней того же КПО; m – среднее число пожаров в календарный день пожароопасного сезона.

Нахождение среднего числа пожаров в день проводится по всем КПО, следовательно, для каждого класса пожарной опасности находится свое значение вероятности возникновения пожаров.

Таблица 1
Шкала оценки степени горимости лесов

Средняя абсолютная горимость		Фактическая горимость (классы)
Частота пожаров на 100 тыс. га, за сезон	Относительная площадь пожаров за сезон, га/100 тыс. га %	
Менее 0,5	Менее 10	Низкая
0,6–2,0	11–30	Умеренная
2,1–7,0	31–100	Повышенная
7,1–20,0	101–300	Высокая
Более 20,1	Более 301	Очень высокая

Таблица 2
Зависимость коэффициент природной пожарной опасности лесной территории от среднего класса природной пожарной опасности (по Г. П. Телицыну, Т. В. Костыриной, 1976)

Средний класс природной пожарной опасности	I	I,5	II	II,5	III	III,5	IV	IV,5	V
Коэффициент природной пожарной опасности лесной территории (C)	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,45	0,3	0,2	0,1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Источники огня вызывающие пожары подразделяются на природные (грозовые), антропогенные и неуставленные. В северных районах пожары возникают в основном от гроз, а в центральных и южных районах края – по вине человека. Для эффективной организации охраны лесов необходимо знание пожарной опасности населения для леса.

На территории Красноярского края выделено 7 лесных районов, на территории которых ежегодно возникают лесные пожары. Самая высокая антропогенная пожарная опасность наблюдается в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе за сезон, где регистрируется, в среднем, до 160 пожаров или 15 % от общего количества пожаров в крае. Общая площадь лесного района 3,45 млн га и в него включены 15 лесничеств. На территории района расположено 8

городов и 629 сельских населенных пунктов [17]. Транспортная сеть развита хорошо – 4,2 км/тыс. га [18]. Лесистость территории по лесничествам варьирует от 11,3 % в Назаровском лесничестве до 78,8 % в Красноярском лесничестве. На территории района наиболее распространены насаждения разнотравной группы типов леса. Из древесных пород широко представлены светлохвойные породы, в меньшей степени береза и осина.

На территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района за период 2000–2020 годы по данным «ИСДМ-Рослесхоз» зарегистрировано 3300 пожаров растительности на площади свыше 76 тыс. га с варьированием от 38 до 290 пожаров в год. За период исследования возникали в основном низовые пожары (91,5 %), верховых зарегистрировано – 3,9 %, а почвенных – 4,6 % от общего количества. Годовая площадь пожаров в лесном районе по пожароопасным сезонам варьировала от 200 га в 2000 году до 16 тыс. га в 2017 г. В среднем пройденная пожарами площадь за один пожароопасный сезон составляет 3,6 тыс. га. В последнее десятилетие наблюдается рост числа и

площади пожаров. Так за пожароопасный сезон в период с 2001 по 2010 гг. в среднем зарегистрировано 94 пожара на площади 3,3 тыс.га, а в период с 2011 по 2020 гг. – 230 пожаров на площади 6,3 тыс. га (рис. 1).

Из анализа статистических данных следует, что основными виновниками пожаров являются люди и их деятельность (рис. 2). Наибольшее количество пожаров возникает по вине местного населения – до 48,7 % от общего количества. От гроз в среднем ежегодно регистрируют 2,3 % пожаров. По вине прочих организаций возникает за сезон 14,5 %. Настораживает большое количество пожаров, причины возникновения которых не были установлены – 22,3 %. Такое количество пожаров с неустановленными причинами вряд ли можно отнести к загораниям от молний, в виду того, что нет совпадения пожарной зрелости лесных участков с грозовой активностью в пожароопасном сезоне на территории исследования. По мнению Н. П. Курбатского (1964) выявление причин и тем более виновников лесных пожаров затруднительно и этим можно объяснить большой процент пожаров, причины которых не установлены [3].

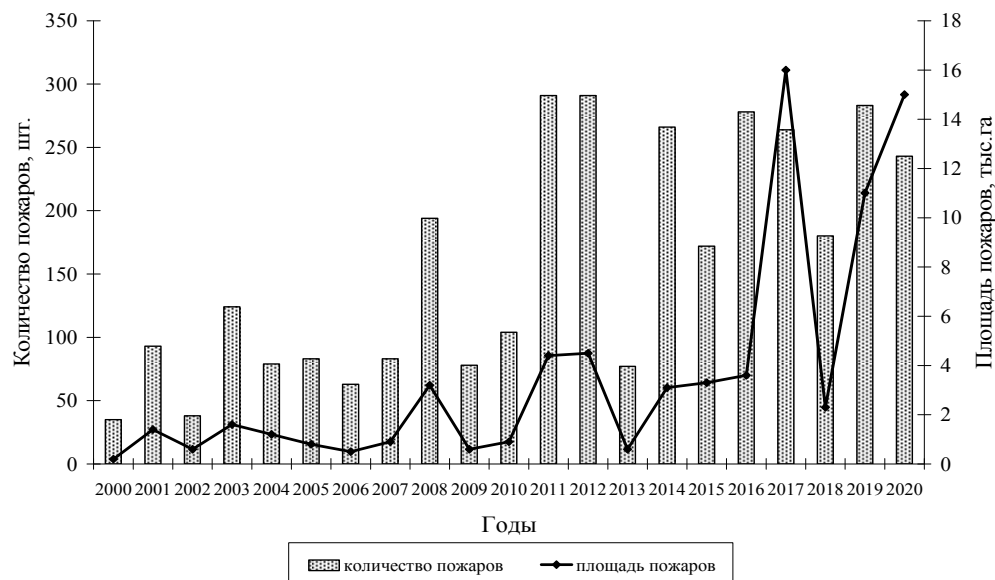


Рис. 1. Динамика горимости лесов Среднесибирского подтаежно-лесостепного района за 2000–2020 гг.

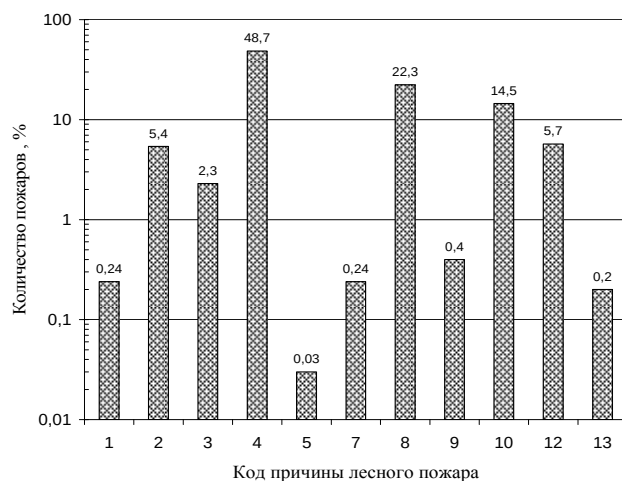


Рис. 2. Причины возникновения лесных пожаров

1 – по вине лиц, использующих леса; 2 – от выжиганий сухой травянистой растительности; 3 – от гроз; 4 – по вине населения; 5 – от сжигания порубочных остатков; 6 – по вине экспедиций, проводящих изыскательские работы в лесу; 7 – от железных дорог МПС; 8 – по невыясненным причинам; 9 – от линий электропередач; 10 – по вине прочих организаций; 11 – лесной пожар перешедший через границу субъекта РФ или госграницу РФ; 12 – лесной пожар перешел с земель иных категорий; 13 – от линейных объектов (ЛЭП, Ж/Д, и авто дорог, трубопроводов и иных линейных объектов)

Таблица 3

Оценка фактической горимости лесов по лесничествам

Наименование лесничества	Возникло пожаров, шт. на 100 тыс. га за сезон	Общая площадь пожаров, га на 100 тыс. га за сезон	Средняя площадь одного пожара, га	Фактическая горимость	
				по числу случаев	по площади
Ачинское	0,84	11,5	13,5	умеренная	умеренная
Боготольское	4,27	72,6	17	повышенная	повышенная
Большемуртинское	6,41	100,2	15,6	повышенная	высокая
Большеулуйское	1,05	76,4	73	низкая	повышенная
Дзержинское	11,28	271,1	24	высокая	высокая
Емельяновское	6,4	224,2	34,9	повышенная	высокая
Иланское	8,75	126,7	14,5	высокая	высокая
Канское	10,17	92,8	9,1	высокая	повышенная
Козульское	0,23	2,1	9	низкая	низкая
Назаровское	6,2	43,6	7	повышенная	повышенная
Ужурское	11,77	124,5	10,6	высокая	высокая
Шарыповское	25,26	335,1	13,3	очень высокая	очень высокая

Резкое увеличение горимости лесов Среднесибирского подтаежно-лесостепного района связано, по нашему мнению, не только с возрастанием напряженности пожароопасных сезонов и ростом населения, но и в связи с переходом определения пожарной опасности по условиям погоды от показателя ПВ-1, дифференцировано учитывающего осадки, на показатель В.Г. Нестерова, которые регламентируют работу лесопожарных служб.

Несмотря на относительную однородность территории по природным условиям и характеру растительности, горимость лесов по лесничествам лесного района также варьирует в широких пределах (табл. 3).

Лесные пожары возникают на территориях всех лесничеств Среднесибирского подтаежно-лесостепного района. По показателям относительной горимости выделяется Шарыповское лесничество, что объясняется доступностью его лесного фонда, вследствие хорошо развитой дорожной сети, и высоким классом пожарной опасности в весенний период. Необходимо отметить, что и наибольшее число пожаров с неустановленными причинами фиксируется также в Шарыповском лесничестве – 44,8 %.

К территориям с наименьшей горимостью можно отнести лесничества, где частота пожаров ниже в 2 раз по сравнению с наиболее горимыми территориями, например, Козульское лесничество, и занимают они около 28 % площади лесного района.

Антропогенная пожарная опасность в лесах оценивается по плотности пожаров, возникающих по вине человека. Ранее Н. П. Курбатским (1964) установлена тесная корреляционная связь между плотностью населения и частотой лесных пожаров (коэффициент корреляции 0,84), а также отсутствие связи относительной горимости с плотностью населения [3]. Связи плотности населения с частотой пожаров, а также плотности населения с относительной горимостью для Среднесибирского подтаежно-лесостепного района не выявлено (коэффициент корреляции, 0,05 и 0,004). Это можно объяснить наличием у населения большого количества автотранспорта, что позволяет ему свободно перемещаться по территории района.

Фактический пожароопасный сезон в лесном районе начинается в первой декаде апреля практически сразу после схода снежного покрова и заканчивается в середине октября. В весенний период пожары возникают при низком комплексном показателе по условиям погоды. Для пожароопасного сезона является характерным весенне-летний максимум (апрель, май, июнь), во время которого регистрируется до 88,6 % пожаров. Причем количество возникших пожаров по этим месяцам распределено неравномерно. Основное количество пожаров (53,5 %) и наибольшая их площадь (45,4 %) приходится на май, однако на территории района пожары возникают в течение всего пожароопасного сезона.

Такую высокую горимость в весенние месяцы П. А. Цветков (2018) объясняет большим количеством отдыхающих в лесах, наличием сухой прошлогодней травы и опада [19]. Но также самовольное сжигание стерни на полях нередко становится причиной лесных пожаров. Сокращение количества пожаров и пройденных ими площадей в летние месяцы связано с разрастанием живого напочвенного покрова, препятствующего возгоранию и распространению горения за счет высокого влагосодержания [20; 19].

В осенний период сокращение числа пожаров обусловлено наступлением дождливой погоды. Например, на территории Емельяновского, Красноярского и Сухобузимского лесничеств в пожароопасном сезоне сумма дней с III–V классом пожарной опасности по условиям погоды составляет в среднем за апрель, май, июнь – 32 дня, а за август, сентябрь и октябрь всего лишь 12 дней.

Для прогнозирования процессов сезонного характера используются различные индексы сезонности [21]. Индекс сезонности характеризует долю возникших лесных пожаров за месяц относительно среднемесячного количества пожаров за пожароопасный сезон. Индекс сезонности показывает лучшее время для проведения противопожарной пропаганды и предупредительных мероприятий по охране лесов от пожаров. В случае его снижения относительно средней многолетней величины для рассматриваемого лесничества можно судить об эффективности работы

лесной охраны [14]. В табл. 4. приведен индекс сезонности месяца, по числу пожаров, возникающих по вине населения, на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района.

Знание распределения возникновения пожаров по дням недели имеет важное практическое значение [7]. Известно, что население наиболее часто посещает леса в выходные дни. Наши исследования показывают, что на территории Среднесибирского подтаежно-лесостепного района распределение лесных пожаров, возникших по антропогенным причинам, по дням недели изменяется не значительно, коэффициент варьирования равен 16,0 %. Напряженность пожарной опасности сохраняется в течение всех дней недели (табл. 5).

Распределение антропогенных лесных пожаров по дням недели по лесничествам изменяются в более широких пределах: например в Красноярском лесничестве коэффициент варьирования – 9,2 %, а в Дзержинском – 52,6 %. Коэффициенты значимости дней недели показывают, что наименьшее отклонение от среднего уровня количества пожаров регистрируется в четверг (93,2 %), а наибольшее в субботу (116,8 %).

Распределение пожаров по дням недели зависит от социально экономических условий [9]. Вычисленный Г. П. Телицыным (1989) коэффициент значимости дней недели по числу возникающих пожаров на Дальнем Востоке, выявил зависимость этих коэффициентов от плотности населения [14]. Установлена высокая корреляция между плотностью населения и коэффициентом значимости воскресенья. Ранее в Нижнеангарском лесном районе Ю. А. Андреев (1999) данной связи не обнаружил [9].

Для Среднесибирского подтаежно-лесостепного района связи коэффициента значимости воскресенья с плотностью населения также не выявлено, но установлена сильная связь ($r = 0,83$) между коэффициентом значимости субботы и плотностью населения. Коэффициент корреляции связи плотности населения с коэффициентом значимости с другими днями недели колеблется от – 0,24 до 0,36, что указывает на отсутствие связи. Опрос жителей Емельяновского лесничества показал, что население посещает лес в основном с целью отдыха (47,7 %) и сбора грибов и ягод (36,4 %) в свободное от работы время. Отдыхающие, как правило, в пятницу вечером на личном транспорте выезжают в лес, а возвращаются во второй половине воскресенья, следовательно, наибольшее количество источников огня в лесу присутствует в субботу.

Как известно, работа лесопожарных служб в течение пожароопасного сезона регламентируется в зависимости от классов пожарной опасности по условиям погоды. На основе этого показателя устанавливается кратность наземного и авиационного патрулирования, дежурство на пожарных наблюдательных пунктах и другие мероприятия, связанные с обнаружением и тушением пожаров. В табл. 6 показано среднее многолетнее распределение количества пожаров в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды. Анализ данных выявил, что пожары могут возникать при любом классе пожарной опасности погоды, а в дни с III–V классами возникает более 60 % пожаров. Это свидетельствует, что напряженность по условиям погоды вне зависимости от класса пожарной опасности сохраняется в течение всего весенне-летнего пожароопасного периода.

Таблица 4

Индекс сезонности месяца по числу лесных пожаров в долях единицы (среднее 2000–2020 гг.)

Лесничество	Индекс сезонности месяца по числу пожаров						
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Ачинское	1,25	5	0,535	0	0,178	0	0
Боготольское	1,416	4,083	1,166	0,166	0,166	0	0
Большемуртинское	1,132	3,883	1,226	0,534	0,17	0,094	0
Дзержинское	0,975	3,475	1,097	0,503	0,731	0,167	0,045
Емельяново	1,526	4,087	1,105	0,175	0,052	0,035	0,017
Иланское	1,597	3,816	1,272	0,147	0,088	0,059	0,029
Канское	1,44	3,37	1,44	0,33	0	0,17	0,25
Красноярское	1,073	3,107	1,468	0,847	0,169	0,112	0,225
Козульское	0	7	0	0	0	0	0
Назаровское	0,5	5,5	1	0	0	0	0
Сухобузимское	1,83	3,66	1,33	0,166	0	0	0
Шарыповское	3,34	3,03	0,52	0	0	0,1	0
Ужурское	1,25	4,35	1,4	0	0	0	0
Среднее по району	1,33	4,18	1,04	0,22	0,12	0,06	0,05

Таблица 5

Распределение лесных пожаров по дням недели в Среднесибирском подтаежно-лесостепном районе (среднее за 2000–2020 гг.)

Показатель	Дни недели						
	пн.	вт.	ср.	чт.	пт.	сб.	вс.
Количество пожаров, %	13,2	14,2	13,4	12,9	15,3	15,7	15,3
Коэффициент значимости дней недели по числу пожаров	0,94	0,98	0,95	0,93	0,98	1,16	1,06

В настоящее время регламентирование работ не учитывает ожидаемого суточного количества лесных пожаров на охраняемой территории, и в результате этого может быть запланировано недостаточное количество сил и средств для тушения пожаров, что приведет к увеличению их площади. Для улучшения обнаружения лесных пожаров в районе исследования в табл. 7 приведено ожидаемое суточное число пожаров в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды и дня недели, рассчитанное нами по методике Г. П. Телицына (1989) [14].

Пространственное распределение антропогенных пожаров и их удаленность от населенных пунктов и путей транспорта приведены в табл. 8. Из приведенных данных следует, что с удалением от населенных пунктов и путей транспорта количество пожаров сокращается, что согласуется с данными Ю. А. Андреева (1999) о том, что в пяти километровой зоне от населенных пунктов и дорог возникает более 60 % пожаров [9].

Средне взвешенное расстояние от пожаров до ближайших населенных пунктов в среднем по лесному району составляет 6,9 км, а от пожаров до дороги – 6 км. Выявлена связь частоты пожаров, возникших на расстоянии до 1 км от населенного пункта, и плотностью населения (коэффициент корреляции $r = 0,57$). При дальнейшем увеличении расстояния от населенного пункта связь между частотой возникновения

пожаров и плотностью населения уменьшается. Это объясняется тем, что количество источников огня, которые могут вызвать пожар, сокращается [3].

Пожарная опасность территории оценивается по лесорастительным и погодным условиям, а также по наличию источников огня. Для оценки антропогенной пожарной опасности для леса Г. П. Телицын (1989) предложил использовать коэффициент пожарной опасности населения для леса [14]. Данный коэффициент определяется по годовому количеству пожаров, возникших по вине человека, природной пожарной опасности территории, напряженности пожароопасного сезона, охраняемой площади района и плотности населения. Этот коэффициент отражает посещаемость леса населением и уровень недисциплинированности обращения с огнем посетителей леса.

Коэффициент пожарной опасности населения для леса в лесном районе по лесничествам приведен в табл. 9. Связь числа пожаров с полученными коэффициентами пожарной опасности населения для леса в целом по лесному району выражается коэффициентом корреляции $+ 0,76$. Повышенный коэффициент пожарной опасности (более 0,1) показывает о необходимости усиления противопожарной пропаганды и проведения других предупредительных мероприятий на территории лесничества. В большинстве европейских стран этот показатель составляет 0,1.

Таблица 6
Среднее многолетнее распределение лесных пожаров по классам пожарной опасности по условиям погоды (2000–2020 гг.)

Показатели	Классы пожарной опасности по условиям погоды					За сезон
	I	II	III	IV	V	
Количество дней, шт.	45	50	37	9	1	142
Количество пожаров, шт.	22	32	50	24	6	134
Среднее количество пожаров в день, шт.	0,5	0,6	1,3	2,7	6,0	0,9
Вероятность числа пожаров в день, %	0,5	0,7	1,4	3,0	6,7	1,0

Таблица 7
Ожидаемое суточное количество лесных пожаров в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды и дня недели

Класс пожарной опасности по условиям погоды (КПО)	Дни недели						
	пн.	вт.	ср.	чт.	пт.	сб.	вс.
I	0	0	0	0	0	1	0
II	1	1	1	1	1	1	1
III	1	1	1	1	1	1	1
IV	1	1	1	1	1	1	1
V	1	2	1	1	2	2	2

Таблица 8
Распределение антропогенных пожаров по удаленности от населенных пунктов и путей транспорта, %

Показатель	Расстояние, км				
	0–5,0	5,1–10,0	10,1–15,0	15,1–20,0	Более 20
От населенного пункта	64,9	22,5	6,7	3,1	2,8
От путей транспорта	87,9	6,7	2,8	0,9	1,7

Таблица 9

Показатели пожарной опасности лесничеств Среднесибирского подтаежно-лесостепного района (среднее за 2000–2020 гг.)

Лесничество	Показатели					
	Плотность населения, чел./км ² (P)	Охраняемая площадь, млн га (S)	Коэффициент природной пожарной опасности (с)	Сумма дней с III–V классом КПО в год, (д)	Годовое количество пожаров от населения, шт. (п)	Коэффициент пожарной опасности населения для леса (К)
Ачинское	5,7	0,23	0,45	60	1,91	0,12
Боготольское	3,2	0,14	0,6	60	3,91	0,46
Большеулуйское	2,8	0,09	0,45	79	0,3	0,05
Большемуртинское	2,6	0,56	0,7	79	24,4	0,47
Дзержинское	3,6	0,33	0,7	78	25,8	0,75
Емельяновское	7,2	0,41	0,6	61	20,9	0,50
Иланское	6,3	0,26	0,6	80	16,0	0,51
Канское	5,9	0,23	0,7	80	11,8	0,38
Козульское	3,0	0,42	0,45	48	0,6	0,04
Красноярское	7,2	0,19	0,6	61	6,7	0,36
Назаровское	5,1	0,06	0,6	79	1,0	0,15
Сухобузимское	3,5	0,22	0,6	63	13,0	0,83
Шарыповское	3,2	0,07	0,9	61	9,0	0,36
Ужурское	7,6	0,19	0,6	61	5,0	0,35

Низкий коэффициент пожарной опасности населения для леса в Козульском лесничестве обусловлен тем, что его большая часть насаждений расположено на водоразделе, где наблюдается наименьшее количество дней с III–V классами по условиям погоды в год, а максимум посещаемости леса приурочен к осеннему периоду для заготовки шишек сосны кедровой сибирской, когда пожарная опасность по условиям погоды отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамика горимости Среднесибирского подтаежно-лесостепного района имеет положительную тенденцию. Так, средняя площадь пожара в период с 2011 по 2020 гг. увеличилась в 2,2 раза по сравнению с периодом с 2000 по 2010 гг. Анализ горимости показал неравномерное распределение фактической горимости насаждений лесного фонда по территории (лесничествам) лесного района. На территории района возникают все виды пожаров, основное количество приходится на низовые (91 %).

Пики горимости приходятся на апрель, май и июнь, причем наиболее горимыми, как по количеству, так и по пройденной огнем площади, являются Дзержинское, Иланское, Ужурское и Шарыповское лесничества. Изменение числа лесных пожаров в течение пожароопасного сезона связано, в основном, с фенологическим состоянием лесной растительности. Динамика погодных условий по месяцам весеннее – летнего пожароопасного периода мало отличается друг от друга за исключением осеннего

Анализ причин возникновения пожаров показывает высокий уровень антропогенной составляющей. Из-за грозовой деятельности в районе возникает в среднем 2,3 % пожаров от общего числа.

В тоже время связи между плотностью населения и частотой пожаров в районе исследований не выявлено (коэффициент корреляции – 0,05). Наибольшее количество возникающих пожаров, привязка которых осуществлялась по наименьшему расстоянию до населенных пунктов и от путей транспорта, происходит

на расстоянии до 5 км. Расстояние или удаленность возгораний от населенных пунктов и путей транспорта дают возможность конкретизировать маршруты наземного патрулирования.

Расчет ожидаемого суточного количества лесных пожаров в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды и дня недели дает возможность использовать их в прогностических целях при планировании маршрутов патрулирования. В связи с высокой горимостью лесов Среднесибирского подтаежно – лесостепного района, необходимо усиление профилактических мероприятий лесопожарных служб и обеспечение своевременного обнаружения и тушения лесных пожаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Coldammer J. G. International Seminar of Forest Fire Prevention and Control in Warsaw // Fire Management Notes, 1982. Т. 43, № 3. Р. 18–21.
2. Иванов В. А., Пономарев Е. И., Иванова Г. А., Мальканова А. В. Грозы и лесные пожары в современных климатических условиях Средней Сибири // Гидрология и климатология. 2023. № 7. С. 102–113.
3. Курбатский Н. П. Проблема лесных пожаров // Возникновение лесных пожаров. М. : Наука, 1964. С. 5–60.
4. Курбатский Н. П. Терминология лесной пирологии // Вопросы лесной пирологии. Красноярск : ИЛИД, 1972. С. 171–231.
5. Мокеев Г. А. К вопросу планирования противопожарных мероприятий в лесах СССР // Вестник с.-х. науки. 1958. № 5. С. 28–33.
6. Вакуров А. Д. Лесные пожары на Севере. М. : Наука, 1975.
7. Курбатский Н. П., Цветков П. А. Охрана лесов от пожаров в районах интенсивного освоения (на примере КАТЭКа). Красноярск : ИЛИД, 1986. 149 с.
8. Львов Н. П., Орлов А. И. Профилактика лесных пожаров. М. : Лесная пром-сть, 1984. 116 с.
9. Андреев Ю. А. Население и лесные пожары в Нижнем Приангарье. Красноярск, 1999. 94 с.

10. Телицын Г. П. Лесные пожары, их предупреждение и тушение в Хабаровском крае. Хабаровск, 1988. 95 с.

11. Телицын Г. П. Пожарная опасность в лесах восточной части зоны БАМ и мероприятия по совершенствованию охраны их от пожаров // Лесное хозяйство восточной части зоны БАМ. Хабаровск : ДальНИИЛХ, 1981. С. 21–25.

12. ИСДМ-Рослесхоз – Открытые данные [Электронный ресурс]. URL: https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml (дата обращения: 11.08.2022).

13. Софронов М. А., Волокитина А. В. Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск : Наука, 1990. 204 с.

14. Телицын Г. П. Определение пожарной опасности на лесной территории. Хабаровск : ДальНИИЛХ. 1989. 23 с.

15. Мелехов И. С. Природа леса и лесные пожары. Архангельск : ОГИЗ, 1947. 60 с.

16. Телицын Г. П., Костырина Т. В. Опыт комплексной оценки пожарной опасности территории по погодным и лесорастительным условиям // Повышение продуктивности лесов Дальнего Востока. Хабаровск : ДальНИИЛХ. 1976. С. 90–97.

17. Демографический ежегодник Красноярского края. Красноярск, 2020 Дата фактической публикации: 25.12.2020.

18. Еналеева-Бандура И. М., Ковалев Р. Н., Баранов А. Н., Шишоркин Н. Н. Модели и методы эколого-экономической оценки продуктивности лесных территорий с учетом уровня развития транспортной сети / СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. 160 с.

19. Цветков П. А., Путинцева А. Е. Горимость пригородных сосняков рекреационного значения г. Красноярска // Сибирский лесной журнал. 2018. № 4. С. 76–80.

20. Курбатский Н. П., Иванова Г. А. Пожароопасность сосняков лесостепи и пути ее снижения. Красноярск, 1987. 113 с.

21. Певцова Т. А., Рябухина Е. А., Гущина О. А. Вычисление индекса сезонности // Вестник Мордовского университета. 2015. Т. 25, № 4. С. 18–36. DOI: 10.15507/0236-2910.025.201504.018.

REFERENCES

1. Coldammer J. G. International Seminar of Forest Fire Prevention and Control in Warsaw // Fire Management Notes, 1982. Т. 43, № 3. Р. 18–21.

2. Ivanov V. A., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Mal'kanova A. V. Grozy i lesnyye pozhary v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh Sredney Sibiri // Gidrologiya i klimatologiya. 2023. № 7. S. 102–113.

3. Kurbatskiy N. P. Problema lesnykh pozharov // Vozniknoveniye lesnykh pozharov. М. : Nauka, 1964. S. 5–60.

4. Kurbatskiy N. P. Terminologiya lesnoy pirolologii // Voprosy lesnoy pirolologii. Krasnoyarsk : ILiD, 1972. S. 171–231.

5. Mokeyev G. A. K voprosu planirovaniya protivopozharnykh meropriyatiy v lesakh SSSR// Vestnik s.-kh. nauki. 1958. № 5. S. 28–33.

6. Vakurov A. D. Lesnyye pozhary na Severe. М. : Nauka, 1975.

7. Kurbatskiy N. P., Tsvetkov P. A. Okhrana lesov ot pozharov v rayonakh intensivnogo osvoiniya (na primere KAT-EKa). Krasnoyarsk : ILiD, 1986. 149 s.

8. L'vov N. P., Orlov A. I. Profilaktika lesnykh pozharov. М. : Lesnaya prom-st', 1984. 116 s.

9. Andreyev Yu. A. Naseleniye i lesnyye pozhary v Nizhnem Priangar'ye. Krasnoyarsk, 1999. 94 s.

10. Telitsyn G. P. Lesnyye pozhary, ikh preduprezhdeniye i tusheniye v Khabarovskom kraye. Khabarovsk, 1988. 95 s.

11. Telitsyn G. P. Pozharnaya opasnost' v lesakh vostochnoy chasti zony BAM i meropriyatiya po sovershenstvovaniyu okhrany ikh ot pozharov // Lesnoye khozyaystvo vostochnoy chasti zony BAM. Khabarovsk : Dal'NIILKh, 1981. S. 21–25.

12. ISDM-Rosleskhoz – Otkrytyye dannyye [Elektronnyy resurs]. URL: https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml (data obrashcheniya: 11.08.2022).

13. Sofronov M. A., Volokitina A. V. Pirologicheskoye rayonirovaniye v tayezhnoy zone. Novosibirsk : Nauka, 1990. 204 s.

14. Telitsyn G. P. Opredeleniye pozharnoy opasnosti na lesnoy territorii. Khabarovsk : Dal'NIILKh. 1989. 23 s.

15. Melekhov I. S. Priroda lesa i lesnyye pozhary. Arkhangel'sk : OGIZ, 1947. 60 s.

16. Telitsyn G. P., Kostyrina T. V. Opyt kompleksnoy otsenki pozharnoy opasnosti territorii po pogodnym i lesorastitel'nym usloviyam // Povysheniye produktivnosti lesov Dal'nego Vostoka. Khabarovsk : Dal'NIILKh. 1976. S. 90–97.

17. Demograficheskiy ezhegodnik Krasnoyarskogo kraya. Krasnoyarsk, 2020 Data fakticheskoy publikatsii: 25.12.2020.

18. Enaleyeva-Bandura I. M., Kovalev R. N., Baranov A. N., Shishorkin N. N. Modeli i metody ekologo-ekonomicheskoy otsenki produktivnosti lesnykh territoriy s uchetoм urovnya razvitiya transportnoy seti / SibGU im. M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2022. 160 s.

19. Tsvetkov P. A., Putintseva A. E. Gorimost' prigorodnykh sosnyakov rekreatsionnogo znacheniya g. Krasnoyarska // Sibirskiy lesnoy zhurnal. 2018. № 4. S. 76–80.

20. Kurbatskiy N. P., Ivanova G. A. Pozharoopasnost' sosnyakov lesostepi i puti ee snizheniya. Krasnoyarsk, 1987. 113 s.

21. Pevtsova T. A., Ryabukhina E. A., Gushchina O. A. Vychisleniye indeksa sezonnosti // Vestnik Mordovskogo universiteta. 2015. Т. 25, № 4. S. 18–36. DOI: 10.15507/0236-2910.025.201504.018.

© Иванов В. А., Зверева Д. В.,
Иванова Г. А., Бакшеева Е. О., 2023

О СОСТОЯНИИ ПИГМЕНТНОГО АППАРАТА ХВОЙНЫХ В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

Л. Н. Сунцова, Е. М. Иншаков, Е. В. Лисотова, М. А. Суслина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Insuntsova@mail.ru

Окружающая среда каждого индустриального города имеет свои особенности экологических и антропогенных факторов, ограничивающих рост и развитие растительности. Растения, обладая высокой пластичностью, способны адаптироваться к негативным факторам среды, в том числе за счет трансформации ассимиляционного аппарата. Показателем, характеризующим ассимиляционную активность растений, является содержание фотосинтетических пигментов, а адаптивные реакции проявляются в изменении соотношения между содержанием хлорофиллов и других пигментов, участвующих в процессе фотосинтеза.

Для понимания механизмов физиолого-биохимической адаптации *Picea obovata*, *Picea pungens* и *Larix sibirica* к условиям урбанизированной среды нами проведены исследования, характеризующие особенности изменения содержания пигментов фотосинтеза в хвое растений, произрастающих в различных экологических условиях г. Красноярска: в магистральных посадках и парковой зоне. Сравнительный анализ содержания пигментов в хвое *Picea obovata*, *Picea pungens* и *Larix sibirica* не выявил видовых отличий. Установлена специфичность ответной реакции фотосинтетического аппарата хвойных на степень загрязнения среды обитания. У насаждений парковой зоны снижалась масса хлорофилла *a*, в то время как его доля в пигментных комплексах оставалась на уровне контроля. Масса хлорофилла *b* уменьшалась в меньшей степени, а его доля в пигментных комплексах даже возрастала. Более существенное, относительно зеленых пигментов, падение концентрации каротиноидов сопровождалось уменьшением их доли в структуре фотосистем. В условиях магистральных посадок снижалась как масса, так и доля хлорофиллов в составе светособирающего комплекса. Дегградация хлорофиллов в большей мере затрагивает фонд хлорофилла *b*. В меньшей степени снижался фонд каротиноидов, что сопровождалось повышением его вклада в составе фотосистем. Изменение соотношения между содержанием хлорофиллов и каротиноидов, по-видимому, отражает специфику работы адаптационных механизмов в условиях различной степени загрязнения среды.

Ключевые слова: *Picea obovata*, *Picea pungens*, *Larix sibirica*, пигменты, хвоя, техногенная среда, адаптация.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 399–405

ON THE STATE OF THE PIGMENT APPARATUS OF CONIFERS IN THE URBANIZED ENVIRONMENT OF KRASNOYARSK

L. N. Suntsova, E. M. Inshakov, E. V. Lisotova, M. A. Suslina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Insuntsova@mail.ru

The environment of each industrial city has its own characteristics of environmental and anthropogenic factors that limit the growth and development of vegetation. Plants, having high plasticity, are able to adapt to negative environmental factors, including through the transformation of the assimilation apparatus. The indicator characterizing the assimilation activity of plants is the content of photosynthetic pigments, and adaptive reactions are manifested in a change in the ratio between the content of chlorophylls and other pigments involved in the process of photosynthesis. To understand the mechanisms of physiological and biochemical adaptation of *Picea obovata*, *Picea pungens* and *Larix sibirica* to the conditions of an urbanized environment, we conducted studies characterizing the features of changes in the content of photosynthetic pigments in the conifers of plants growing in various environmental conditions of Krasnoyarsk: in roadside plantings and park area. Comparative analysis of the pigment content in the conifer *Picea obovata*, *Picea pungens* and *Larix sibirica* revealed no species differences. The specificity of the reaction of the photosynthetic apparatus of conifers to the degree of pollution of the habitat has been established. The mass of chlorophyll *a* decreased in the plantings of the park zone, while its share in the pigment complexes remained at the control level. The mass of chlorophyll *b* decreased to a lesser extent, and its share in pigment complexes even

increased. A more significant drop in the concentration of carotenoids, relative to green pigments, was accompanied by a decrease in their share in the structure of photosystems. Under conditions of roadside plantings, both the mass and the proportion of chlorophylls in the light-harvesting complex decreased. The degradation of chlorophylls affects the chlorophyll *b* fund to a greater extent. To a lesser extent, the carotenoid stock decreased, which was accompanied by an increase in its contribution to the composition of photosystems. The change in the ratio between the content of chlorophylls and carotenoids, apparently, reflects the specifics of the adaptation mechanisms in conditions of varying degrees of environmental pollution.

Keywords: *Picea obovata*, *Picea pungens*, *Larix sibirica*, pigments, needles, technogenic environment, adaptation.

ВВЕДЕНИЕ

Растения урбанизированной среды имеют своеобразные, особенные условия произрастания и выживания, которые не могут не сказаться на основном процессе их жизнедеятельности – фотосинтезе. Вредные газы нарушают световую и темновую стадии фотосинтеза, воздействуют на состояние хлорофилла, активность ферментов, электрон-транспортную цепь [8; 11]. Высокие концентрации токсикантов и продолжительность их действия сопровождаются переходом процессов жизнедеятельности на другой уровень. Первым звеном на биохимическом уровне, на которое воздействуют токсиканты, являются хлоропласты. Аккумуляция поллютантов в хлоропластах ведет к их деградации. Деструкция мембран хлоропластов является одной из важных причин депрессии фотосинтеза [3; 8]. В результате нарушения мембран под влиянием вредных веществ осуществляется выход из них пигментов и распад пигментного комплекса. Пигменты у растений выполняют роль не только акцепторов световой энергии, но и принимают участие в обезвреживании образующихся перекисей и радикалов кислорода, регуляции роста и развития [2; 9].

Одним из показателей реакции растений на изменение факторов внешней среды и степени их адаптации является содержание хлорофиллов и каротиноидов – главных фоторецепторов фотосинтезирующей клетки. Пигментный состав считается информативным и довольно часто используемым параметром, характеризующим фотосинтетический аппарат растений. Вариации пигментов приводят к изменению активности фотосинтеза, скорости накопления ассимилянтов, и изменению эффективности физиолого-биохимических процессов, вызывающих изменения в росте и продуктивности растений [2; 8]. Хотя в литературе нет единого мнения о механизме действия поллютантов на пигментный комплекс растений, очевидно, что степень воздействия зависит от вида растения, условий произрастания, состава и концентрации токсикантов и длительности их воздействия [1; 9; 10; 11]. Отмечается, например, что высокие концентрации промышленных газов ингибируют пигментобразование [4; 5; 8; 14], а низкие – стимулируют [8; 13]. Однако характер ответной реакции пигментных комплексов регулируется многими составляющими и весьма специфичен. Например, рядом авторов отмечается, что хлорофилл *b* проявляет большую устойчивость по отношению к хлорофиллу *a* и каротиноидам [8; 11; 13; 15]. Другими исследователями показано, что под воздействием загрязнителей происходит снижение доли хлорофилла *b* в пигментных комплексах, которое выступает в качестве показателя работы

фотосистем в стрессовых состояниях и свидетельствует о чувствительности хлорофилла *b* к воздействию поллютантов в большей степени, чем хлорофилла *a*. При этом, отмечается существенное повышение вклада каротиноидов, что объясняется их защитной и вспомогательной ролью в функционировании фотосистем [1; 4; 12].

Таким образом, для выявления на биохимическом уровне адаптивных механизмов фотосинтетического аппарата необходимо знать, что происходит с пигментами в хлоропластах древесных растений, произрастающих в условиях конкретного техногенного загрязнения. Поэтому, при оценке характера загрязнения на отдельных участках важно располагать данными по содержанию пигментов и по их вкладу в пигментные комплексы.

В связи с вышеизложенным, изучение состояния фотосинтетического аппарата древесных растений в условиях промышленного города весьма актуально и представляет большой интерес, так как успешность выполнения средообразующей, санитарно-гигиенической функций зелеными насаждениями зависит от состояния ассимиляционного аппарата растений [2; 3; 6; 15]. Хвойные растения родов *Picea* и *Larix* широко применяются в озеленении и обустройстве г. Красноярска. Однако, такая важная характеристика растений, отражающая особенности адаптации к окружающим условиям, как изменение пигментного состава листьев изучена далеко не в полной мере и требует более детальной проработки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперимент проводился в середине вегетации 2020–2021 гг. Объектом исследования являлась трехлетняя хвоя ели сибирской (*Picea obovata*), ели колючей (*Picea pungens*) и хвоя лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), произрастающих в различных экологических условиях г. Красноярска: в магистральных посадках города: на проспекте Metallургов (Советский район), проспекте Мира (Центральный район), проспекте Красноярский рабочий (Ленинский район), проспекте Свободный (Октябрьский район), улице 60 лет Октября (Свердловский район); в парковой зоне: сквер Паниковка (Свердловский район), парк ДК 1 Мая (Ленинский район), ЦПКиО им. М. Горького (Центральный район), сквер Космонавтов (Советский район), парк Гагарина (Железнодорожный район), парк Троя (Октябрьский район). Контролем служили насаждения, произрастающие в дендрарии СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Дендрарий расположен на территории Емельяновского района в двух километрах от совхоза «Удачный» в экологически чистой зоне.

На каждом участке для исследования выбирали 10 средневозрастных модельных дерева каждой древесной породы с которых собирали хвою с ветвей, расположенных по четырем сторонам света на высоте около двух метров. Образцы хвои с навеской около 0,5 г отбирали в трехкратной повторности. В лабораторных условиях получали спиртовую вытяжку пигментов. Оптические плотности пигментных вытяжек определяли с помощью спектрофотометра UNIKO 1200 по максимумам поглощения: для хлорофиллов *a* и *b* – 645 и 662 нм, для каротиноидов – 440,5 нм [7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены исследования пигментного комплекса хвои особей ели сибирской (*Picea obovata*), ели колючей (*Picea pungens*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) у насаждений, произрастающих в разных экологических условиях г. Красноярска. Характер изменчивости пигментного фонда исследуемых видов в условиях парков и скверов не выявил существенных отличий по участкам исследования. Так, в условиях парков у ели сибирской содержание хлорофилла *a* составляло 0,773...0,808 мг/г сырой биомассы; хлорофилла *b* – 0,334...0,351 мг/г; каротиноидов – 0,340...0,360 мг/г (табл. 1). У ели колючей содержание хлорофилла *a* было 0,792...0,807 мг/г сырой биомассы; хлорофилла *b* – 0,338...0,361 мг/г; каротиноидов – 0,345...0,357 мг/г (табл. 2). У лиственницы сибирской те же показатели варьировали от 0,788 до 0,817 мг/г хлорофилла *a*, 0,345...0,374 мг/г хлорофилла *b* и 0,330...0,346 мг/г каротиноидов (табл. 3). Проведенные исследования не обнаружили видовых отличий у исследованных хвойных в концентрации пигментов в условиях парковых насаждений города Красноярска, но показали снижение их содержания на 3–12 % относительно контрольных значений в зависимости от района произрастания. Светособирающий комплекс листьев имеет четкую структурную организацию, где главная роль принадлежит ключевому пигменту – хлорофиллу *a*. В стрессовых условиях растению важно сохранить оптимальное соотношение ключевого и вспомогательных пигментов фотосинтеза

(хлорофилла *b* и каротиноидов). Анализ полученных данных показал, что среди исследованных групп пигментов более существенно снижалась концентрация хлорофилла *a* и каротиноидов в среднем на 9 и 10 % у ели сибирской, на 7 и 9 % у ели колючей, и на 3 и 7 % у лиственницы сибирской (рис. 1).

Более стабильным показал себя фонд хлорофилла *b*, выполняющего вспомогательную функцию в фотохимических реакциях фотосистем. Его снижение в среднем составило 5 % у елей и выявило не однозначный характер изменчивости у лиственницы – от небольшого снижения (на 3 %), до такого же увеличения. Суммарное содержание пигментов понизилось относительно контрольных значений в среднем на 8 % у елей и на 3 % у лиственницы (рис. 1). Обращает на себя внимание взаимосвязь в соотношении вспомогательных пигментов. Расчет коэффициента корреляции (*r*) показал слабую связь между изменением фондов зеленых пигментов, но значительную зависимость между содержанием хлорофилла *b* и каротиноидов: *r* = 0,65; 0,57 и 0,77 для ели сибирской, ели колючей и лиственницы сибирской. В условиях средней или слабой степени загрязнения (парковая зона) фонд вспомогательных пигментов фотосинтеза поддерживается в большей степени за счет хлорофилла *b* чем каротиноидов. Возможно, что преимущественное разрушение желтых пигментов связано с их протекторной ролью в фотосинтезирующей клетке.

Показателем эффективности фотосинтеза является отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* (*a/b*). Считается, что чем оно больше, тем интенсивнее протекает фотосинтез. В трехлетней хвое елей сибирской и колючей это отношение составило в среднем 2,3 (2,4 в контроле), а в хвое лиственницы сибирской варьировало от 2,2–2,1 (2,2 в контроле). Понижение отношения хлорофиллов (*a/b*) свидетельствует о более быстрой деградации фонда хлорофилла *a*. Деградация фонда пигментов в большей мере затрагивает фонд каротиноидов. Снижение количественного содержания каротиноидов в хвое привело к повышению соотношения суммы зеленых пигментов к желтым (хлорофилл (*a+b*) / карот.) на 1–3 % у елей и на 6–8 % у лиственницы.

Таблица 1

Состав пигментного комплекса хвои ели сибирской в условиях урбанизированной среды г. Красноярска, мг/г сырой массы

Пробная площадь	Сумма пигментов	$\pm m_x$	Хл <i>a</i>	$\pm m_x$	Хл <i>b</i>	$\pm m_x$	Карот.	$\pm m_x$
Просп. Metallургов	1,385	0,058	0,718	0,029	0,355	0,017	0,313	0,015
Просп. Мира	1,320	0,049	0,716	0,036	0,291	0,007	0,313	0,019
Просп. «Красноярский рабочий»	1,346	0,089	0,703	0,053	0,293	0,016	0,351	0,026
Просп. Свободный	1,548	0,061	0,784	0,046	0,292	0,019	0,473	0,021
Ул. 60 лет Октября	1,326	0,049	0,709	0,037	0,299	0,005	0,318	0,015
Среднее по магистралям	1,385	0,061	0,726	0,040	0,294	0,013	0,324	0,019
Парк «Гагарина»	1,456	0,064	0,773	0,043	0,343	0,005	0,340	0,019
ЦПКиО им. Горького	1,471	0,030	0,788	0,016	0,334	0,016	0,348	0,008
Сквер «Паниковка»	1,460	0,057	0,780	0,034	0,337	0,014	0,342	0,016
Парк «Троя»	1,454	0,053	0,777	0,034	0,332	0,009	0,345	0,017
Сквер «Космонавтов»	1,503	0,077	0,802	0,049	0,345	0,005	0,356	0,023
Сквер ДК им. 1 Мая	1,519	0,087	0,808	0,054	0,351	0,007	0,360	0,026
Среднее по паркам	1,477	0,061	0,788	0,038	0,340	0,009	0,349	0,018
КОНТРОЛЬ	1,601	0,033	0,860	0,020	0,358	0,014	0,384	0,010

Таблица 2

Состав пигментного комплекса хвои ели колючей в условиях урбанизированной среды
г. Красноярск, мг/г сырой массы

Пробная площадь	Сумма пигментов	$\pm m_x$	Хл <i>a</i>	$\pm m_x$	Хл <i>b</i>	$\pm m_x$	Карот.	$\pm m_x$
Просп. Metallургов	1,272	0,048	0,679	0,035	0,286	0,011	0,307	0,017
Просп. Мира	1,351	0,014	0,734	0,024	0,303	0,026	0,314	0,026
Просп. «Красноярский рабочий»	1,309	0,097	0,678	0,058	0,270	0,019	0,361	0,022
Просп. Свободный	1,514	0,064	0,797	0,037	0,265	0,014	0,452	0,014
Ул. 60 лет Октября	1,356	0,086	0,705	0,054	0,268	0,017	0,383	0,017
Среднее по магистралям	1,360	0,062	0,719	0,042	0,278	0,017	0,341	0,019
Парк «Гагарина»	1,475	0,014	0,788	0,015	0,338	0,021	0,349	0,012
ЦПКиО им. Горького	1,469	0,010	0,780	0,016	0,343	0,020	0,345	0,014
Сквер «Паниковка»	1,523	0,012	0,807	0,012	0,361	0,022	0,355	0,012
Парк «Троя»	1,488	0,016	0,797	0,019	0,338	0,021	0,354	0,013
Сквер «Космонавтов»	1,496	0,036	0,792	0,030	0,353	0,014	0,351	0,020
Сквер ДК им. 1 Мая	1,515	0,055	0,802	0,041	0,356	0,011	0,357	0,024
Среднее по паркам	1,494	0,024	0,794	0,022	0,348	0,018	0,352	0,016
КОНТРОЛЬ	1,598	0,015	0,856	0,017	0,364	0,021	0,378	0,015

Таблица 3

Состав пигментного комплекса хвои лиственницы сибирской в условиях урбанизированной среды
г. Красноярск, мг/г сырой массы

Пробная площадь	Сумма пигментов	$\pm m_x$	Хл <i>a</i>	$\pm m_x$	Хл <i>b</i>	$\pm m_x$	Карот.	$\pm m_x$
Просп. Metallургов	1,662	0,151	0,954	0,085	0,366	0,046	0,342	0,051
Просп. Мира	1,192	0,013	0,646	0,015	0,264	0,014	0,282	0,009
Просп. «Красноярский рабочий»	1,401	0,113	0,724	0,072	0,309	0,015	0,368	0,028
Просп. Свободный	1,587	0,163	0,835	0,090	0,279	0,029	0,473	0,045
Ул. 60 лет Октября	1,405	0,083	0,752	0,049	0,317	0,018	0,337	0,023
Среднее по магистралям	1,450	0,105	0,782	0,062	0,307	0,024	0,360	0,031
Парк «Гагарина»	1,478	0,030	0,788	0,022	0,345	0,009	0,345	0,012
ЦПКиО им. Горького	1,500	0,053	0,797	0,034	0,356	0,011	0,346	0,016
Сквер «Паниковка»	1,489	0,022	0,800	0,027	0,359	0,011	0,331	0,006
Парк «Троя»	1,525	0,023	0,817	0,026	0,373	0,010	0,335	0,011
Сквер «Космонавтов»	1,509	0,034	0,807	0,036	0,372	0,005	0,330	0,007
Сквер ДК им. 1 Мая	1,508	0,011	0,805	0,013	0,374	0,014	0,330	0,011
Среднее по паркам	1,502	0,029	0,802	0,026	0,363	0,010	0,336	0,011
КОНТРОЛЬ	1,545	0,015	0,823	0,013	0,362	0,013	0,359	0,007

Еще одним важным показателем функционирования фотосистем является процентное распределение отдельных пигментов к их общей сумме. Показано, что в контрольных условиях на долю хлорофилла *a* приходится в среднем 53 % от суммы у всех исследованных видов и сохраняется на этом уровне и в условиях парковых насаждений. Доля хлорофилла *b* составила 22 % у ели сибирской и 23 % у ели колючей и лиственницы сибирской в контрольных условиях и повысилась на 1 % в городских. Что касается желтых пигментов, то у ели колючей и лиственницы их доля в контроле составляла 23 %, а у ели сибирской – 24 % и уменьшилась в условиях парков на 1 %. Такой характер изменчивости соотношения пигментов в пигментных комплексах свидетельствует о процессах перестройки светособирающего комплекса хвои под воздействием загрязнения среды.

Исследования пигментного фонда хвойных в условиях магистральных посадок показали неоднозначный характер его изменчивости и гораздо большую степень зависимости от условий произрастания. У особой ели сибирской, произрастающей в магист-

ральных посадках города содержание хлорофилла *a* составляло 0,703...0,784 мг/г сырой биомассы; хлорофилла *b* – 0,291...0,355 мг/г; каротиноидов – 0,313...0,41 мг/г. У ели колючей содержание хлорофилла *a* изменялось в пределах 0,678...0,797 мг/г сырой биомассы; хлорофилла *b* – 0,265...0,303 мг/г; каротиноидов – 0,307...0,452 мг/г. У лиственницы сибирской те же показатели варьировали от 0,646 до 0,954 мг/г для хлорофилла *a*, 0,264...0,366 мг/г у хлорофилла *b* и 0,283...0,473 мг/г для каротиноидов (табл. 1–3). Проведенные исследования показали существенное снижение фонда зеленых пигментов относительно контрольных значений. Содержание хлорофиллов *a* и *b* уменьшалось на 14...18 % у ели сибирской, на 15...28 % у ели колючей, и на 9...27 % у лиственницы сибирской в зависимости от условий произрастания. Исключением явилось увеличение количества хлорофилла *a* у лиственницы сибирской в условиях просп. Metallургов на 16 %. Среди зеленых пигментов у хвойных более значительно снижалась концентрация хлорофилла *b* (на 19...28 %), что привело к повышению отношения хлорофиллов (*a/b*) (рис. 2).

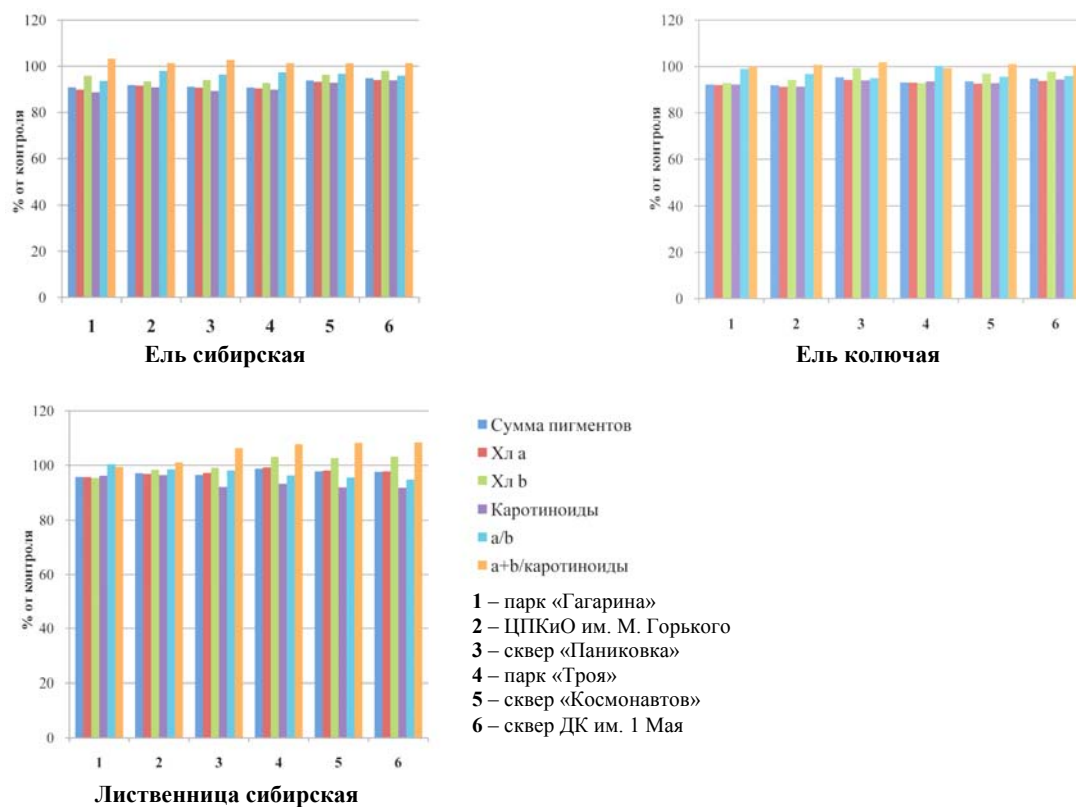


Рис. 1. Содержание пигментов в хвое изученных видов в парках и скверах г. Красноярск, % от контроля

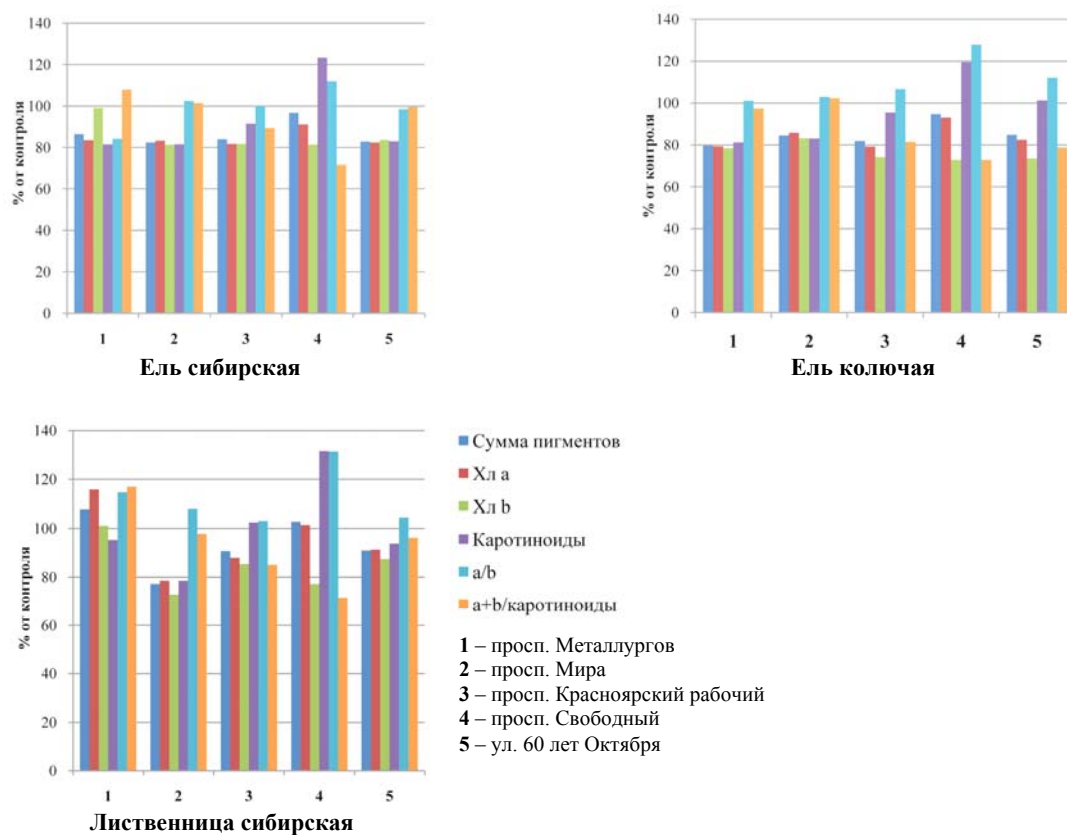


Рис. 2. Содержание пигментов в хвое изученных видов в магистральных посадках г. Красноярск, % от контроля

Содержание желтых пигментов также понижалось на 9...19 % у ели сибирской, на 5...19 % у ели колючей и на 6...22 % у лиственницы. Однако были и исключе-

ния. Например, на просп. Свободный их содержание было выше контроля на 23, 19 и 32 % у ели сибирской, ели колючей и лиственницы сибирской соответствен-

но. Изучение суммарного фонда пигментов выявило одинаковую динамику его падения на 10...23 % у исследованных видов на всех участках за исключением просп. Свободный, где у елей сибирской и колочей снижение составило только 3 %, а у лиственницы сибирской повысилось на 3 %. Это связано с вкладом желтых пигментов, концентрация которых в этих условиях значительно возросла. Изучение соотношения зеленых пигментов к желтым (хлорофилл $(a + b)$ / каротиноиды) в условиях магистральных посадок показало существенное снижение показателя на 1...29 % у ели сибирской, 2...27 % у ели колочей и 23...54 % у лиственницы сибирской, что связано с большей деградацией зеленых пигментов (рис. 2). Таким образом, у исследованных видов хвойных в условиях интенсивного загрязнения наиболее сильно страдает фонд зеленых пигментов и больше всего – хлорофилла b . Наиболее неблагоприятным в этом отношении является просп. Свободный для всех исследованных видов.

Проведенные исследования показали, что в агрессивной городской среде на фоне деградации всего фонда пигментов происходит сокращение доли хлорофилла a относительно всей суммы пигментов в пигментных комплексах елей на 2–4 %. Это свидетельствует о серьезных нарушениях в работе фотосинтетического аппарата елей. У лиственницы доля хлорофилла a сохранялась близкой контролю или даже повышалась на 4 % в условиях пр. Metallургов. Вклад хлорофилла b в общий фонд пигментов в большей степени связан с условиями произрастания, но также демонстрирует тенденцию к снижению на 1...3 % для всех исследованных видов. Исключением являются условия пр. Metallургов для ели сибирской (+4 %) и просп. Свободный для ели колочей и лиственницы сибирской, где снижение доли хлорофилла b составило 5 и 6% соответственно. Обращает на себя внимание тот факт, что в этих же условиях происходит повышение доли желтых пигментов на 7 %. Анализ данных показал обратную коррелятивную зависимость (r) между фондами хлорофилла b и каротиноидов: 0,38; 0,83 и 0,62 для ели сибирской, ели колочей и лиственницы сибирской соответственно.

ВЫВОДЫ

Фотосинтетический аппарат обладает способностью приспосабливаться к изменяющимся условиям окружающей среды. Вариации пигментов фотосинтеза ведут к изменению активности фотосинтетического аппарата повышающей уровень толерантности вида. Сравнительный анализ состояния насаждений ели сибирской (*Picea obovata*), ели колочей (*Picea pungens*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), произрастающих в условиях парков и скверов, и магистральных посадках г. Красноярска показал, что в условиях урбанизированной среды г. Красноярска происходят существенные изменения в структуре и функциональной активности фотосинтетического аппарата хвойных. Отмечается снижение всего фонда пигментов относительно контрольных условий, которое усиливается с возрастанием степени техногенного воздействия. В содержании различных групп пигментов не выявлено существенных видовых отличий как в зонах среднего или слабого загрязнения (парки и скверы), так и в зоне интенсивной техногенной на-

грузки (магистралей). Исследованные виды в большинстве случаев проявляли одинаковую динамику реакции на условия произрастания.

Сбалансированный состав пигментов фотосинтеза в хвое древесных растений определяет продуктивность фотосинтеза. Нами обнаружена специфичность ответной реакции фотосинтетического аппарата хвойных на степень загрязнения среды обитания. У насаждений парковой зоны в большей степени снижалась масса хлорофилла a , в то время как его доля в пигментных комплексах оставалась на уровне контроля. Масса хлорофилла b уменьшалась в меньшей степени, а его доля в пигментных комплексах даже возрастала. Более существенное, относительно зеленых пигментов, падение концентрации каротиноидов сопровождалось уменьшением их доли в структуре фотосистем.

В условиях интенсивного загрязнения (магистральные посадки) снижалась как масса, так и доля обоих хлорофиллов в составе светособирающего комплекса. Деградация хлорофиллов в большей мере затрагивает фонд хлорофилла b , что согласуется с ранее проведенными исследованиями [4; 12]. В меньшей степени снижался фонд каротиноидов, что сопровождалось повышением его вклада в составе фотосистем. Возрастание относительного содержания каротиноидов, по-видимому, отражает специфику работы адаптационных механизмов в условиях высокой степени загрязнения среды. Усиление синтеза желтых пигментов связано с их важной ролью в системе антиоксидантной защиты растений по предотвращению быстрой деградации фонда хлорофиллов. Можно сказать, что в зависимости от уровня загрязнения среды у хвойных происходит перераспределение в соотношении вспомогательных пигментов в структуре фотосистем. У насаждений парковой зоны увеличивается доля хлорофилла b , а в придорожных посадках – каротиноидов.

Таким образом, у хвойных растений, произрастающих в условиях урбанизированной среды г. Красноярска, изменение удельного содержания пигментов, сопровождается перестройками в пигментных комплексах. Характер таких перестроек не имеет видовой специфику, зависит от степени загрязнения среды и является проявлением ответной реакции растений на антропогенный стресс.

Колебательный характер изменения содержания пигментов у исследованных видов можно связать со спецификой условий произрастания, которая требует дальнейшего изучения. Проведенные исследования позволяют предполагать, что изменчивость пигментного фонда хвои является объективным индикатором степени загрязнения окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бухарина И. Л., Кузьмин П. А., Гибадулина И. И. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Набережные Челны) // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. Вып. 1. 2013. С. 20–25.
2. Гетко Н. В. Растения в техногенной среде : структура и функция ассимиляционного аппарата. Акад. наук БССР, Центр. ботан. Сад. Минск : Наука и техника, 1989. 205 с.

3. Горышина Т. К. Фотосинтетический аппарат растений и условия среды. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 202 с.
4. Донцов А. С., Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. XXXIV, № 5–6. С. 246–250.
5. Кирпичникова Т. В., Шавнин С. А., Кривошеева А. А. Состояние фотосинтетического аппарата хвои сосны и ели в зонах промышленного загрязнения при различных микроклиматических условиях // Физиология растений. 1995. Т. 42, № 1. С. 107–113.
6. Кулагин А. А., Юсупов А. А. О содержании фотосинтетических пигментов в хвое лиственницы Сукачева (*larix sukaczewii* dyl.) При развитии в условиях аэротехногенного полиметаллического загрязнения окружающей среды // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 10, № 2, 2008. С. 617–620.
7. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков [и др.]. Л. : Агропромиздат, 1987. 430 с.
8. Николаевский В. С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск : Наука, 1979. 280 с.
9. Николаевский В. С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояние наземных экосистем методами фитоиндикации. М. : МГУЛ, 1999. 193 с.
10. Сарсатская А. С. Содержание фотосинтетических пигментов у древесных пород городских насаждений. // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2017. № 4. С. 9–14.
11. Сергейчик С. А., Шахнович Е. А. Влияние азотсодержащих газообразных токсикантов на пигменты пластид различных видов деревьев и кустарников // Труды ИПГ. Основы биологического контроля загрязнения окружающей среды. 1988. Вып. 72. С. 25–38.
12. Суслина М. А., Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М. Анализ состояния пигментного комплекса *picea obovata* и *picea pungens* в условиях техногенной среды города Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. XXXIX, № 4. С. 263–268.
13. Тарханов С. Н., Бирюков С. Ю. Влияние атмосферного загрязнения на фотосинтезирующий аппарат *pinus sylvestris* L. и *picea obovata* Ledeb. × *p. Abies* (L.) Karst. В северной тайге бассейна Северной Двины // Лесной журнал. 2014. № 1. С. 20–26.
14. Тужилкина В. В., Ладанова Н. В., Плюснина С. Н. Влияние техногенного загрязнения на фотосинтетический аппарат сосны // Экология. 1998. № 2. С. 89–93.
15. Фролов А. К. Окружающая среда крупного промышленного города и жизнь растений в нем. СПб. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1998. 328 с.
2. Getko N. V. Plants in the technogenic environment: structure and function of the assimilation apparatus. Academy of Sciences of the BSSR, Center. botan. garden. Minsk : Science and Technology, 1989. 205 p.
3. Goryshina T. K. Photosynthetic apparatus of plants and environmental conditions. L. : Publishing House of the Leningrad University, 1989. 202 p.
4. Dontsov A. S., Suntsova L. N., Inshakov E. M. Assessment of the state of the environment of Krasnoyarsk by the state of photosynthetic apparatus of Siberian spruce // Coniferous boreal zones, 2016. T. XXXIV, No. 5–6. pp. 246–250.
5. Kirpichnikova T. V., Shavnin S. A., Krivosheeva A. A. The state of the photosynthetic apparatus of pine and spruce needles in industrial pollution zones under various microclimatic conditions // Plant Physiology. 1995. Vol. 42, No. 1. Pp. 107–113.
6. Kulagin A. A., Yusupov A. A. On the content of photosynthetic pigments in the conifers of Sukachev's larch (*larix sukaczewii* dyl.) During development under conditions of aerotechnogenic polymetallic pollution of the environment // Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 10, No. 2, 2008. Pp. 617–620.
7. Methods of biochemical research plants / A. I. Ermakov [et al.]. L. : Agropromizdat, 1987. 430 p.
8. Nikolaevsky V. S. Biological bases of gas resistance of plants. Novosibirsk : Nauka, 1979. 280 p.
9. Nikolaevsky V. S. Ecological assessment of environmental pollution and the state of terrestrial ecosystems by phyto-indication methods. M. : MGUL, 1999. 193 p.
10. Sarsatskaya A.S. The content of photosynthetic pigments in tree species of urban plantings.// Bulletin of Kemerovo State University. Series: Biological, Technical Sciences and Earth Sciences. 2017. No. 4. Pp. 9–14.
11. Sergeychik S. A., Shakhnovich E. A. Influence of nitrogen-containing gaseous toxicants on plastid pigments of various types of trees and shrubs // Trudy IPG. Fundamentals of biological control of environmental pollution, 1988. Issue 72. Pp. 25–38.
12. Suslina M. A., Suntsova L. N., Inshakov E. M. Analysis of the state of the pigment complex *picea obovata* and *picea pungens* in the technogenic environment of the city of Krasnoyarsk // Coniferous boreal zones, 2021. Vol. XXXIX, No. 4. Pp. 263–268.
13. Tarkhanov S. N., Biryukov S. Yu. The influence of atmospheric pollution on the photosynthetic apparatus of *pinus sylvestris* L. and *picea obovata* Ledeb. × *p. Abies* (L.) Karst. In the northern taiga of the Northern Dvina basin // Lesnoy zhurnal, 2014. No. 1. Pp. 20–26.
14. Tuzhilkina V. V., Ladanova N. V., Plyusnina S. N. Influence of technogenic pollution on the photosynthetic apparatus of pine // Ecology, 1998. No. 2. Pp. 89–93.
15. Frolov A. K. The environment of a large industrial city and the life of plants in it. St. Petersburg : Nauka, Leningr. otd-nie, 1998. 328 p.

REFERENCES

1. Bukharina I. L., Kuzmin P. A., Gibadulina I. I. Analysis of the content of photosynthetic pigments in the leaves of woody plants in an urban environment (for example, Naberezhnye Chelny) // Bulletin of the Udmurt University. Series: Biology. Earth sciences. Issue 1, 2013. Pp. 20–25.

© Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М.,
Лисотова Е. В., Суслина М. А., 2023

СВЯЗЬ МЕЖДУ ГУСТОТОЙ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОЛНОТОЙ В ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЯХ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА*

С. Л. Шевелев, П. В. Михайлов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: shewel341@yandex.ru

Целью настоящей работы является рассмотрение частного вопроса в области анализа горизонтальной структуры древостоев, имеющего практическое значение – взаимообусловленности густоты и относительной полноты в спелых и перестойных смешанных еловых древостоях Енисейского края. В основу работы положены материалы 15 пробных площадей с рубкой и обмером 159 модельных деревьев. Густота и полнота опосредованы, однако связь между ними носит достаточно сложный характер, так как густота древостоя проходит два основных этапа – период нарастания численности деревьев и сменяющий его период изреживания древостоев. В работе анализу подверглись спелые и перестойные разнотравные смешанные темнохвойные древостои с преобладанием в составе ели сибирской. Древостои находятся в одной стадии развития. В результате выполнения работы установлена степень зависимости таксационных показателей от густоты древостоев в целом и по отдельным элементам леса. Рассчитаны уравнения связи между относительной полнотой и густотой древостоя.

Ключевые слова: Густота древостоев, Относительная полнота, Горизонтальная структура, Енисейский край, Смешанные еловые древостои.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 406–411

CORRELATION BETWEEN STOCKING AND RELATIVE DENSITY IN SPRUCE STANDS OF THE YENISEI RIDGE

S. L. Shevelev, P. V. Mikhaylov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: shewel341@yandex.ru

The study is focused on a particular issue in the field of analysis of the horizontal structure of stands, which is of practical importance. The aim of the present research is to study the interdependence of stocking and relative density in mature and overmature mixed spruce-dominated stands of the Yenisei Ridge. The research was based on the materials obtained from 15 research plots where we felled and measured 159 model trees. Stocking and density are interrelated. Nevertheless, the correlation is complex since the stocking undergoes through two main stages: an increase in the number of trees and the following thinning of forest stands. The research was conducted in mature and overmature mixed Siberian spruce-dominated stands of different stocking rates. All the studied forests stands were of the same stage of development. As a result, we revealed the extent to which stands characteristics depend on stocking (at stand-wide level and for forest-forming species separately). We also defined equations stating the correlation between stocking and relative density.

Keywords: Tree stand density, Relative completeness, Horizontal structure, Yenisei ridge, Mixed spruce stands.

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность фитоценозов во многом определяется их пространственной структурой. Характер взаимного расположения деревьев обуславливает возможности в получении жизненно необходимых

для них минеральных веществ, влаги и света [1; 2]. Важным элементом пространственной структуры лесных сообществ является их горизонтальная структура, отражающая распределение растений по занимаемой ими площади. Характер распределения расте-

* Acknowledgments.

Исследование проводилось в рамках государственного задания, установленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, для реализации проекта «Закономерности формирования пула углерода в лесных насаждениях на землях, вышедших из-под сельскохозяйственного назначения» (№ FEFE–2023–0006) коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

ний в фитоценозах зависит от ряда факторов включающих особенности размножения растений, темпы их роста и развития, неоднородность экотопа, характер взаимоотношений растений, зоогенные и антропогенные воздействия и т. п. [3; 4]. Все они в конечном итоге оказывают влияние на продуктивность экосистемы. Структура простых, чистых и сложных, смешанных, многопородных древостоев, сформировавшихся из различающихся по лесоводственно-экологической характеристике пород, произрастающих в различных климатических условиях, испытывающих различные хозяйственные воздействия являлась объектом изучения достаточно продолжительный период [5–11]. Следует отметить, что в процессе рассмотрения отдельных аспектов формирования древостоев в пространстве большая часть исследователей ограничивается констатацией особенностей распределения ценопопуляций, не делая попыток использования полученных данных в практических, прикладных целях в сфере ведения лесного хозяйства.

Целью настоящей работы является рассмотрение частного вопроса в области анализа горизонтальной структуры древостоев, имеющего практическое значение – взаимообусловленность густоты и относительной полноты в спелых и перестойных смешанных еловых древостоях Енисейского края.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ СБОРА ДАННЫХ

Енисейский край – горная система в юго-западной части Средне-Сибирского плоскогорья, расположенного между устьями рек Кан и Подкаменная Тунгуска. Для района исследования характерны несколько типов поверхности: горный массив с преобладающими высотами – 700–900 м. н.у.м (высшая точка – гора Енашимский Палкан – 1104 м. н.у.м); невысокие горные гряды, покрытые крупноглыбовыми россыпями – «курумами» и долины рек: Большой Пит, Тейя, Вельмо.

Почвообразовательные процессы в районе исследования опосредованы мерзлотными явлениями.

Климат резко-континентальный, суровый, обусловлен затрудненным доступом влажных потоков воздуха с Атлантического океана. Среднегодовое количество осадков достигает 700 мм.

Первые исследователи лесов Енисейского края [12–15] отмечали, что особенностью растительности региона является её смешанный, горно-равнинный характер и неявно выраженная вертикальная поясность.

В центральной и северной частях региона преобладают лиственничные и сосновые древостои невысокой производительности. Для южной части характерны темнохвойные древостои в составе которых преобладают пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и ель сибирская (*Picea obovata* Lab.) с участием сосны кедровой сибирской – кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Roi.) и других лесобразующих пород. Чистые ельники редки и ограничены по площади.

Основой работы явились материалы 15 пробных площадей с рубкой и обмером 159 модельных деревьев. Пробные площади заложены в соответствии с требованиями отраслевого стандарта – ОСТ56-69–83

«Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки». Характеристика древостоев пробных площадей приведена в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

При таксации древостоев степень занятости жизненного пространства принято определять с использованием стандартизованного таксационного показателя – «относительной полноты», представляющей из себя отношение суммы площадей поперечного сечения (или запаса) элемента леса в древостое к стандартному, максимальному значению показателя в данных лесорастительных условиях. Для всего древостоя относительная полнота устанавливается как сумма полнот всех элементов леса. Такой метод оценки используется исходя из необходимости установления потенциальных возможностей древостоя продуцировать максимальный запас.

Однако следует признать, что метод не вполне совершенен, так как при соблюдении всех условий относительная полнота древостоя не должна превышать 1.0. Однако несовершенство стандартов, принятых в соответствии с ходом роста древостоев в европейской части страны, иногда требует более внимательного подхода в использовании данного таксационного показателя. Из табл. 1 следует, что древостои по крайней мере трех пробных площадей (5, 11 и 13) не вполне соответствуют действующим стандартам полноты, причем сложно установить какой элемент леса дает значимые отклонения.

Густота – количество экземпляров того или иного вида растений на единице площади также характеризует занятость пространства древесным лесным сообществом. Полнота и густота опосредованы, однако зависимость между ними имеет достаточно сложный характер на который в значительной степени влияют этапы формирования древостоев [16–19].

Одним из основных признаков формирования древостоев является переход открытых группировок древесных растений в относительно закрытый ценоз [20]. Это важнейший качественный и количественный рубеж в истории формирования и распада древостоев [17; 19]. Он характеризуется точкой перегиба онтогенетической кривой численности деревьев в процессе формирования древостоя, которая соответствует переходу процесса нарастания численности деревьев в процесс ее снижения в ходе естественного изреживания. Наибольшая густота характеризует критическое состояние ценоза, дальнейшее развитие которого включает механизм регулирования численности деревьев.

Таким образом, установление зависимости между густотой и полнотой древостоя на всем протяжении жизненного цикла достаточно сложно и вряд ли целесообразно, так как на различных этапах формирования в нем протекают процессы различной направленности.

Для решения поставленной задачи были использованы данные разнотелотных смешанных древостоев (табл. 1), имеющих близкий состав. Средний состав древостоев по данным пробных площадей: 5,4Е 1,4К 1,4П 1,8Б.

Для установления связи между густотой и прочими таксационными показателями был избран период, характеризующийся наибольшей стабилизацией процессов формирования древостоев. Он соответствует возрасту естественной спелости, когда количество стволов относительно стабильно. Условно можно считать, что такое растительное сообщество находится в стадии климакса.

Доли полноты (P) и густоты (N, шт./га) приходящиеся на основной элемент леса – ель приведены на графике (рис. 1).

Из графика следует, что, несмотря на то, что число стволов ели составляет только около 40 % от общего числа стволов в смешанных древостоях, их доля по запасу на отдельных пробных площадях превышает 50 %.

Проведенный корреляционный анализ показал, что в смешанных хвойных древостоях густота оказывает влияние на ряд таксационных характеристик [20; 21].

Однако это влияние несколько ниже по сравнению с аналогичным влиянием в простых древостоях [19]. Связь между общей густотой древостоя и величиной среднего диаметра главного элемента леса – ели отражается коэффициентом корреляции ($-0,28$), то есть с увеличением густоты этот показатель снижается, однако зависимость относительно невысока.

Значительна связь между запасом древостоя и густотой – коэффициент корреляции равен $0,85$.

Связь между общей густотой древостоя и его общей полнотой высока, коэффициент корреляции равен $0,92$, отдельно по составляющим породам коэффициенты корреляции между этими показателями: для ели $0,85$; пихты $0,95$; березы $0,87$ и кедра сибирского $0,69$.

Статистическая обработка рядов густоты по элементам леса в смешанных еловых древостоях приведена в табл. 2.

Таблица 1
Характеристика древостоев пробных площадей

№ пр. площади	Состав	Средние главного элемента леса		Полнота древостоя	Запас, м ³ /га	Густота древостоя, шт/га	Бонитет	Тип леса
		высота, м	диаметр, см					
1	6Е2Б1К1П	19,5	20,9	0,82	198	1016	IV	Е.черн.
2	6Е2Б1К1П	16,0	19,6	0,80	179	1029	V	Е. зелен.
3	5Е2К2Б1П	17,5	22,3	0,72	193	732	V	Е. зелен.
4	5Е3Б1К1П	14,5	18,8	0,64	143	833	V	Е.черн.
5	4Е3П2Б1К	13,2	18,7	1,27	269	1472	V	Е.черн – зелен.
6	5Е2К2Б1П	16,8	19,4	0,62	149	794	V	Е.черн.
7	4Е3К2Б1П	16,5	18,6	0,73	174	936	V	Е.черн. – зелен
8	5Е2К2Б1П	18,7	21,6	0,77	182	746	IV	Е. зелен.
9	5Е2К2Б1П	17,0	19,8	0,69	170	843	V	Е.черн. – зелен.
10	7Е2П1Бед.К	18,0	20,5	0,70	198	837	V	Е.черн. – зелен.
11	6Е2П1К1Б	17,1	18,8	1,15	259	1634	V	Е. зелен.
12	7Е2П1Б+К	20,2	22,9	0,72	176	878	IV	Е. зелен.
13	7Е2П1Б+К	18,3	21,1	1,04	259	1217	V	Е. зелен.
14	4Е3К2Б1П	17,6	19,2	0,85	234	1090	V	Е.черн.
15	6Е3Б1П+К	16,3	17,5	0,75	153	1002	V	Е.черн. – зелен.

Примечание: Е.черн. – ельник черничный; Е. зелен. – ельник зеленомошный; Е.черн – зелен. – ельник чернично-зеленомошный.

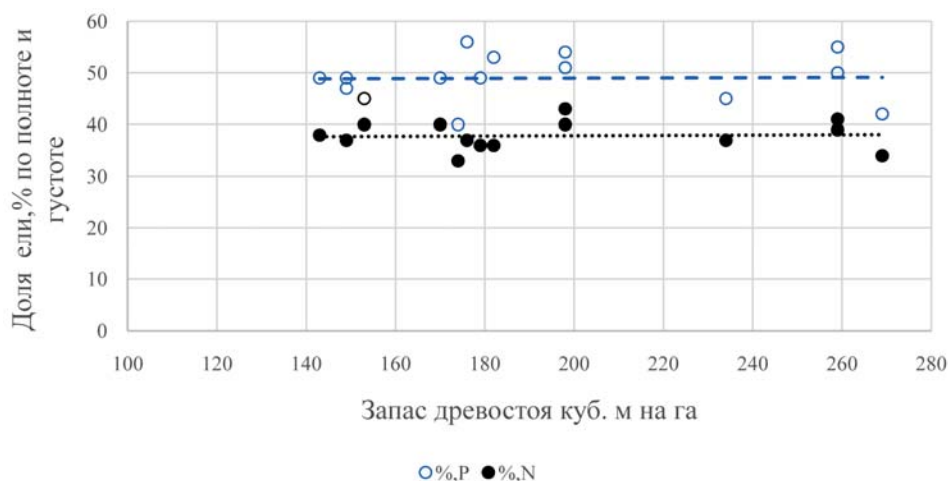


Рис. 1. Доля ели по относительной полноте и густоте в древостоях пробных площадей

Из всех составляющих пород наибольшей средней густотой обладает пихта, однако она уступает по запасу ели.

Было проведено сопоставление полученных данных с данными для других регионов. Для сравнения были использованы всеобщие таблицы хода роста еловых насаждений, составленные А. В. Тюриным. Согласно этих таблиц, средняя густота спелых еловых древостоев IV–V классов бонитета совокупно господствующей и подчиненных частей составляет от 675–720 шт./га до 1210–1370 шт./га, что в достаточной степени согласуется с полученными данными.

Сделана попытка получения сведений, которые могут быть использованы для корректировки стандартов полноты. Была установлена необходимая густота смешанного древостоя в целом и по составляющим его элементам леса для формирования растительного сообщества, имеющего относительную полноту 1,0.

Для этой цели, для древостоя каждой пробной площади, такое число было рассчитано путем деления фактического числа стволов на 1 га на значение относительной полноты. Полученные ряды были обработаны статистически. Результаты обработки приведены в табл. 3.

Таким образом, исходя из полученных данных, можно заключить, что спелый смешанный еловый древостой, характерный для района исследования будет иметь относительную полноту 1,0 при наличии в нем 1229 стволов на 1 га суммарно всех составляющих пород.

По отдельным элементам леса полнота 1,0 может быть достигнута при наличии на 1 га 950 стволов ели, 2147 стволов пихты, 835 стволов березы или 981 ствола кедр сибирского.

Связь между относительной полнотой и густотой древостоев в целом и по отдельным составляющим

элементам леса достаточно адекватно отображается линейным уравнением вида:

$$N = a + bP, \quad (1)$$

где N – густота шт/га; P – полнота относительная.

Доли отдельных пород по разному представлены в общей относительной полноте яруса в различных древостоях, так доля основного элемента леса – ели может составлять 0,3–0,6; пихты 0,1–0,5; кедр и березы 0,1–0,2. Величина этих показателей во многом зависит не только от представленности породы в составе, но и от величины стандарта по которому устанавливается относительная полнота.

На рис. 2 приведен график иллюстрирующий связь между относительной полнотой и густотой элемента леса – пихты.

Коэффициенты уравнений связи и показатели адекватности уравнений приведены в табл. 4.

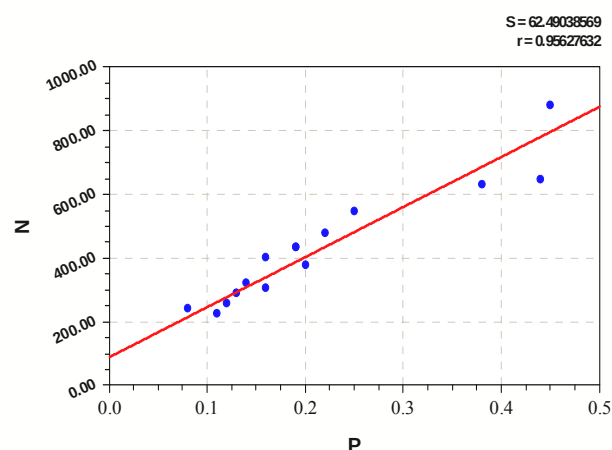


Рис. 2. Связь между относительной полнотой и густотой (элемент леса – пихты)

Таблица 2

Статистическая характеристика рядов густоты по элементам леса

Статистические показатели	Густота, шт./га				
	Общая	Ели	Пихты	Кедр	Березы
Среднее значение	1004	380	433	52	139
Стандартное отклонение	261	100	182	26	71
Минимум	732	269	226	14	40
Максимум	1634	631	881	112	284
Коэффициент варьирования, %	26,1	26,3	42,0	48,9	50,9

Таблица 3

Статистическая характеристика рядов числа стволов на 1 га, для получения относительной полноты 0,1

Статистические показатели	Древостой в целом	Ель	Пихта	Кедр	Береза
Среднее значение	122,9	95,0	214,7	98,1	83,5
Стандартная ошибка	2,9	3,4	9,5	9,8	6,2
Стандартное отклонение	11,6	13,3	36,7	37,8	23,9
Минимум	97	65	148	43	44
Максимум	142	119	30,5	190	129
Коэффициент варьирования, %	9,4	14,0	17,1	38,5	28,6
Точность опыта, %	2,4	4,0	4,4	9,9	7,4

Таблица 4

Коэффициенты уравнений связи и показатели адекватности уравнений

Элемент леса	Коэффициенты уравнений		Показатели адекватности	
	a	b	R	S
Ель	14,47	913,7	0,85	54,6
Пихта	89,4	1573,1	0,96	62,4
Кедр	17,45	600,3	0,69	19,2
Береза	-17,1	1010,5	0,87	38,3
Древостой в целом	-13,933	1248,4	0,96	99,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Леса Енисейского края, сформировавшиеся в суровых климатических условиях горной области бореальной зоны на мерзлотных почвах, обладают индивидуальными особенностями во много определяющими формы организации хозяйства в них. Эти особенности находят отражение не только в производительности древостоев, но и в характере связей между их таксационными показателями.

Результаты выполнения настоящей работы позволили констатировать следующее:

- установление достоверной зависимости между относительной полнотой и густотой, отражающей весь цикл развития древостоев достаточно сложно и затруднительно, так как в процессе динамики густота претерпевает процессы различной направленности;
- предельные значения густоты смешанных еловых древостоев в районе исследования в отдельных случаях превышают средние значения этого показателя для спелых древостоев низкой производительности в других регионах;
- стандарты полноты требуют корректировки, о чем свидетельствуют относительные полноты древостоев ряда пробных площадей превышающие 1,0;
- для проведения такой корректировки рассчитано количество стволов дающее относительную полноту 1,0 для смешанного древостоя в целом и по отдельным элементам леса;
- рассчитаны уравнения связи между относительной полнотой и густотой древостоев в целом и по элементам леса в стадии спелости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Dieckmann U., Law R., Metz J. A. J. The Geometry of Ecological Interactions. Simplifying Spatial Complexity (Cambridge Studies in Adaptive Dynamics); Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2000.
2. Bauer S., Wyszomirski T., Berger U., Hildenbrandt H., Grimm V. Asymmetric Competition as a Natural Outcome of Neighbour Interactions among Plants: Results from the Field-of-Neighbourhood Modelling Approach. *Plant Ecol.* 2004, 170, 135–145.
3. Wright E. F., Coates K. D., Canham C. D., Barmucci P. Species Variability in Growth Response to Light across Climatic Regions in Northwestern British Columbia. *Can. J. For. Res.* 1998, 28, 871–886.
4. Craine J. M., Dybzinski R. Mechanisms of Plant Competition for Nutrients, Water and Light. *Funct. Ecol.* 2013, 27, 833–840.
5. Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев [Текст]. Новосибирск : Наука, 1977. 160 с.

6. Савинов Е. П. Взаимосвязь густоты и среднего диаметра древостоев // Лесное хозяйство, 1978. № 6. С. 57–59.

7. Ильчуков С. В. Динамика горизонтальной структуры производных лиственных насаждений // Лесной журнал. 2003. № 6. С. 29–34.

8. Прилуцкий А. Н., Кислов Д. Е., Фисенко М. И. Механизмы дифференциации видового состава высокоствольного дубняка // Бюлл. БСИ ДВО РАН [Электронный ресурс] : науч. журн. / Ботанический сад-институт ДВО РАН. Владивосток, 2011. Вып. 8. С. 14–27.

9. Ziganshin R. A. Woodland: comparative dynamics of average diameters of coniferous tree stands of different forest types *Siberian Journal of Forest Science* 2015, 6. 39–52 DOI: 10.15372/SJFS20190605.

10. Borisov A. N., Ivanov V. V., Petrenko A. E. Formation of Spatial Structure of Pine Stands Formed by Improvement Cuttings. *Russian Journal of Forest Science* 2019, 1, 7–18.

11. Bebre I., Riebl H., Annighöfer P. Seedling Growth and Biomass Production under Different Light Availability Levels and Competition Types. *Forests* 2021, 12, 1376.

12. Боровиков Г. А. Очерк растительности Западного Заангарья // Труды почвенно-ботанических экспедиций по исследованию колонизационных районов Азиатской России. Ч. I. Вып. 5. СПб., 1913. 216 с.

13. Тугаринов А. Я. Географические ландшафты Приенисейского края // Труды Среднесиб. с.-х. опыт. станции. Красноярск, 1925. Вып. 1. 111 с.

14. Игошина К. Н. К изучению растительности Енисейского края // Труды БИН АН СССР. Сер. III. Геоботаника. 1951. Вып. 7. М. ; Л. : Изд-во АН СССР. С. 331–365.

15. Фалалеев Э. Н. К характеристике сосноволиственничных лесов Северо-Енисейского района Красноярского края // Труды СибЛТИ. 1966. Сб. 12, Вып. 3. С. 85–98.

16. Вайс А. А. Горизонтальная структура нормальных сосновых насаждений левобережной и правобережной пригородной зоны г. Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2006. Вып. 3. С. 29–31. (Vays A. A. The horizontal structure of normal pine plantations of the left-bank and right-bank suburban areas of the city of Krasnoyarsk. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zones], 2006, issue 3, Pp. 29–31 (In Russ.).

17. Assmann E. Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München-Bonn-Wien : BLV Verlagsgesellschaft. 1961. 490 s.

18. Grabarnik P., Särkkä A. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions // *Ecological Modelling*, 2009, V. 220. № 9. P. 1232–1240.

19. Бузыкин А. И. Формирование и продуктивность древостоев // Формирование и продуктивность лесных фитоценозов. Красноярск: Институт леса СО РАН, 1982. С. 5–17.

20. Bauer S., Wyszomirski T., Berger U. et al. Asymmetric competition as a natural outcome of neighbour interactions among plants: results from the field-of-neighbourhood modelling approach. *Plant Ecology* 2004, 170, 135–145.

21. Berger U., Hildenbrandt H. A new approach to spatially explicit modelling of forest dynamics: Spacing, ageing and neighbourhood competition of mangrove trees. *Ecol. Model.* 2000, 132, 287–302.

REFERENCES

1. Dieckmann U., Law R., Metz J. A. J. The Geometry of Ecological Interactions. Simplifying Spatial Complexity (Cambridge Studies in Adaptive Dynamics); Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2000.

2. Bauer S., Wyszomirski T., Berger U., Hildenbrandt H., Grimm V. Asymmetric Competition as a Natural Outcome of Neighbour Interactions among Plants: Results from the Field-of-Neighbourhood Modelling Approach. *Plant Ecol.* 2004, 170, 135–145.

3. Wright E. F., Coates K. D., Canham C. D., Barteucci P. Species Variability in Growth Response to Light across Climatic Regions in Northwestern British Columbia. *Can. J. For. Res.* 1998, 28, 871–886.

4. Craine J. M., Dybzinski R. Mechanisms of Plant Competition for Nutrients, Water and Light. *Funct. Ecol.* 2013, 27, 833–840.

5. Kuz'michev V. V. Zakonomernosti rosta drevostoyev [Tekst]. Novosibirsk : Nauka, 1977. 160 s.

6. Savinov E. P. Vzaimosvyaz' gustoty i srednego diametra drevostoyev // *Lesnoye khozyaystvo*, 1978. № 6. S. 57–59.

7. Il'chukov S. V. Dinamika gorizonta'noy struktury proizvodnykh listvennykh nasazhdeniy // *Lesnoy zhurnal*. 2003. № 6. S. 29–34.

8. Prilutskiy A. N., Kislov D. E., Fisenko M. I. Mekhanizmy differentsiatsii vidovogo sostava vysokotravnoy dubnyaka // *Byull. BSI DVO RAN [Elektronnyy resurs]* : nauch. zhurn. / Botanicheskiy sad-institut DVO RAN. Vladivostok, 2011. Vyp. 8. S. 14–27.

9. Ziganshin R. A. Woodland: comparative dynamics of average diameters of coniferous tree stands of different forest types *Siberian Journal of Forest Science* 2015, 6. 39–52 DOI: 10.15372/SJFS20190605.

10. Borisov A. N., Ivanov V. V., Petrenko A. E. Formation of Spatial Structure of Pine Stands Formed by

Improvement Cuttings. *Russian Journal of Forest Science* 2019, 1, 7–18.

11. Bebre I., Riebl H., Annighöfer P. Seedling Growth and Biomass Production under Different Light Availability Levels and Competition Types. *Forests* 2021, 12, 1376.

12. Borovikov G. A. Ocherk rastitel'nosti Zapadnogo Zaangar'ya // *Trudy pochvenno-botanicheskikh ekspeditsiy po issledovaniyu kolonizatsionnykh rayonov Aziatskoy Rossii. Ch. I. Vyp. 5. SPb.*, 1913. 216 c.

13. Tugarinov A. Ya. Geograficheskiye landshafty Priyeniseyskogo kraya // *Trudy Srednesib. s.-kh. opyt. stantsii. Krasnoyarsk*, 1925. Vyp. 1. 111 s.

14. Igoshina K. N. K izucheniyu rastitel'nosti Eniseyskogo kryazha // *Trudy BIN AN SSSR. Ser. III. Geobotanika*. 1951. Vyp. 7. M. ; L. : Izd-vo AN SSSR. S. 331–365.

15. Falaleyev E. N. K kharakteristike sosnovolistvennykh lesov Severo-Eniseyskogo rayona Krasnoyarskogo kraya // *Trudy SibLTI*. 1966. Sb. 12, Vyp. 3. S. 85–98.

16. Vays A. A. Gorizonta'naya struktura normal'nykh sosnovykh nasazhdeniy levoberezhnoy i pravoberezhnoy prigorodnoy zony g. Krasnoyarska // *Khvoynyye boreal'noy zony*. 2006. Vyp. 3. S. 29–31. (Vays A. A. The horizontal structure of normal pine plantations of the left-bank and right-bank suburban areas of the city of Krasnoyarsk. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zones], 2006, issue 3, Pp. 29–31 (In Russ.).

17. Assmann E. Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. München-Bonn-Wien : BLV Verlagsgesellschaft: 1961. 490 s.

18. Grabarnik P., Särkkä A. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions // *Ecological Modelling*, 2009, V. 220. № 9. P. 1232–1240.

19. Buzykin A. I. Formirovaniye i produktivnost' drevostoyev // *Formirovaniye i produktivnost' lesnykh fitotsenozov*. Krasnoyarsk: Institut lesa SO RAN, 1982. S. 5–17.

20. Bauer S., Wyszomirski T., Berger U. et al. Asymmetric competition as a natural outcome of neighbour interactions among plants: results from the field-of-neighbourhood modelling approach. *Plant Ecology* 2004, 170, 135–145.

21. Berger U., Hildenbrandt H. A new approach to spatially explicit modelling of forest dynamics: Spacing, ageing and neighbourhood competition of mangrove trees. *Ecol. Model.* 2000, 132, 287–302.

© Шевелев С. Л., Михайлов П. В., 2023

СОВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЛЕСОВ ПРЕДГОРИЙ ХРЕБТА ХАМАР-ДАБАН (ЮГО-ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)*

В. И. Воронин, А. П. Сизых, В. А. Осколков*, А. П. Гриценюк, Р. С. Мориц

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132

*E-mail: vosk@sifibr.irk.ru

*Развитие лесной растительности в Байкальском регионе в течение длительного времени лесопользования (промышленные вырубок разных форм и интенсивности) на фоне изменчивости климата последних десятилетий претерпело существенные перестройки в вертикальной и пространственной структуре лесов разных физико-географических условий их формирования в Прибайкалье и Забайкалье. Приводятся результаты исследований структурно-динамической организации и ценологических разрушений лесов предгорий хребта Хамар-Дабан (Юго-Западное Забайкалье), полученные нами в течение 10 лет в рамках грантов РФФИ и проекта лаборатории. Установленные, на ключевых участках района исследований, особенности современной структуры и тенденции развития светлых хвойных лесов позволили установить возможную, в данных природно-климатических условиях, направленность их формирования. Основным фактором такого прогноза является выявленная ярусная дифференциация древостоев, видовой состав и структура напочвенного покрова, как индикатора конкретного типа леса, отражающего зональные черты в организации лесной растительности. Установлены тенденции начального этапа смены лесобразующих пород деревьев, где в светлых хвойных, с доминированием сосны (*Pinus sylvestris*) и участием лиственницы (*Larix sibirica*) лесах в подросте существенную роль играют темных хвойных пород – кедр (*Pinus sibirica*) и ель (*Picea obovata*). Присутствие в составе II-го яруса кедра и ели также свидетельствует о начале смены лесобразующих пород деревьев со второй половины прошлого столетия. Смена лесобразующих пород со светлой хвойной на темную хвойную составляющую является закономерным процессом вековой динамики зональной (коренной) тайги. Деструктивными факторами, таких тенденций развития лесов района исследований следует считать рубки и пожары, которые будут способствовать формированию и существованию длительно производных мелколиственных лесов в пространстве и времени.*

Ключевые слова: лес, ярусная дифференциация древостоев, смена лесобразующих пород, Байкальский регион.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 412–418

MODERN STRUCTURAL-DYNAMIC ORGANIZATION AND TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF FORESTS IN THE FOOTHILLS OF THE KHAMAR-DABAN RIDGE (SOUTH-WESTERN TRANS-BAIKAL)

V. I. Voronin, A. P. Sizykh, V. A. Oskolkov*, A. P. Gritsenyuk, R. S. Moritz

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Science Siberian Branch
132, Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russian Federation

*E-mail: vosk@sifibr.irk.ru

The development of forest vegetation in the Baikal region during a long period of forest use (industrial clearcuts of different forms and intensity) at the background of climate variability in recent decades has undergone significant changes in the spatial and vertical structure of forests of different physiographic conditions of their formation in Pribaikal and Trans-Baikal. We present the results of 10 years of research of structural-dynamic organization and cenotic destruction of forests in the foothills of the Khamar-Daban Ridge (South-Western Trans-Baikal). The peculiarities of the modern structure and trends in the development of light coniferous forests stated on the key sites of the studied area allowed to find out vector of their formation possible under present environmental and climatic conditions.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии для цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории», № 075-15-2020-787).

*The main factor of such forecast is revealed synfolial differentiation of timber stands, species composition and structure of soil cover as of an edificatory of a concrete forest type reflecting zonal features in the organization of forest vegetation. We found out trends of primary stage of replacement of forest formation trees species, where in light coniferous forests with dominance of pine (*Pinus sylvestris*) and presence of larch (*Larix sibirica*), there is undergrowth, in which a considerable role belongs to such dark coniferous species as cedar (*Pinus sibirica*) and spruce (*Picea obovata*). The presence of cedar and spruce in the 2nd synfolium suggests as well the start of replacement of forest forming trees species since the second half of last century. The replacement of forest forming species from light coniferous to dark coniferous components is a regular process of secular dynamics of zonal (primary) taiga. We have to consider cutting and fires as destructive factors of such trends as development of forests in the studied area as these factors will favor formation and existence of long-term secondary small-leaf forests in space and time.*

Keywords: forests, synfolial differentiation of timber stands, replacement of forests forming species, Lake Baikal region.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки состояний и прогноза изменений в природных системах (экосистемах) в целом и в структуре растительного покрова, в частности, является основой современных биогеографических, геоботанических и экологических исследований. Главной задачей является исследование пространственно-временной самоорганизации растительности, отражающей практически все изменения в природной среде на конкретный период времени. Для этого необходим синтез разных направлений их изучения, а не просто детальный анализ отдельных компонентов и элементов природных систем (Алексеев и др., 2001; Блауберг и др., 1973). Растительное сообщество при таком подходе рассматривается в качестве системы, которая формируется и развивается как единое целое и образует взаимообусловленные связи вещественно-энергетического обмена с системами иного иерархического уровня (Большаков и др., 1993; Воронцов и др., 2002; Шмальгаузен, 1961; Экосистемы ..., 1989).

Подходы в определении долговременных трендов в структурно-динамической организации растительности находятся в настоящее время на различных стадиях разработки, что ставит перед исследователями ряд задач – от выбора концептуальных основ до понятийно-терминологического оформления выделяемых процессов и состояний растительных сообществ в целом. Решение таких задач неизбежно приводит к необходимости внесения корректив в сложившееся понимание процессов, происходящих в растительности природных систем разной их иерархии, и позволяет наметить вектор их развития в системе природных факторов определенной территории (и биома в целом). В результате появляются основания для определения возраста, места и роли текущих состояний растительных сообществ в сукцессионных системах. Для этого необходимо выявление особенностей состава и сложения растительных сообществ, связанных с природной динамикой среды и антропогенными воздействиями с определением периодов гомеостаза (Арманд и др., 1989). При этом оптимальные значения типологического разнообразия трансформированных растительных сообществ на месте коренных (Сочава, 1979) зависят от количества ресурса в среде, степени ее стабильности. Механизмы оптимизации разнообразия сообществ, в этой связи, зависят и обусловлены экологическими и эволюционными процессами, про-

исходящими в природных средах конкретной территории.

Динамика формирования лесов последних десятилетий на фоне изменчивости климата континентально-регионального масштаба отражает современные тенденции их развития в разных физико-географических условиях Байкальского региона. В этой связи, внесение своевременных поправок в определение вектора сукцессионных смен в поясочно-зональной дифференциации лесов становится весьма актуальным в аспектах установления современного состояния, степени трансформации и тенденций их формирования в пространственно-временном аспекте на фоне изменчивости климата. Это является актуальной задачей при прогнозировании статуса лесов – движение к становлению коренных или к длительному функционированию их инвариантов во времени в конкретных физико-географических условиях территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования трансформации, современной структурно-динамической и пространственно-временной организации лесов проведены на ключевых участках предгорий хребта Хамар-Дабан (Юго-Западное Забайкалье). Основной метод исследований – полевая геоботаническая съемка (Полевая ..., 1976; Методы геоботанических ..., 1996) позволившая выявить пространственную стратиграфию и ценоотические характеристики развивающихся зональных светлехвойных и светлехвойно-темнохвойных лесов. Видовой состав растений согласовывался с существующими определителями флоры (Флора ..., 19798; Флора Сибири, 1987–2003; Конспект флоры ..., 2005). Видовые названия мхов уточнялись по определителю Л. В. Бардунова (1969).

На карте-схеме и космическом снимке (врезка на карте-схеме) представлен район исследований (рис. 1), объединивший 2 ключевых участка.

Ключевой участок 1 расположен на правом берегу ручья Черемуховый в бассейне р. Оронгой. В комплексе с проведенным геоботаническим описанием проведена перечисленная таксация с закладкой постоянной пробной площади в границах участкового лесничества Оронгойского, кварта 157, выдел 1 (лесничество Иволгинское). Закладка пробной площади проведена в соответствии с ОСТ 56-69–83. Координаты

ты центра пробной площади: N 51° 35' 56,4" – E 106° 42' 28,3"; h 655 м над ур. м. Таксационная характеристика насаждения представлена в табл. 1 (раздел «Результаты и их обсуждение»). Целесообразность закладки постоянной пробной площади обусловлена равномерным распределением элементов леса по выделу. Кроме того, карточка пробной площади является основным первичным документом на основании которого осуществляется внесение документированной информации в государственный лесной реестр и ее изменение.

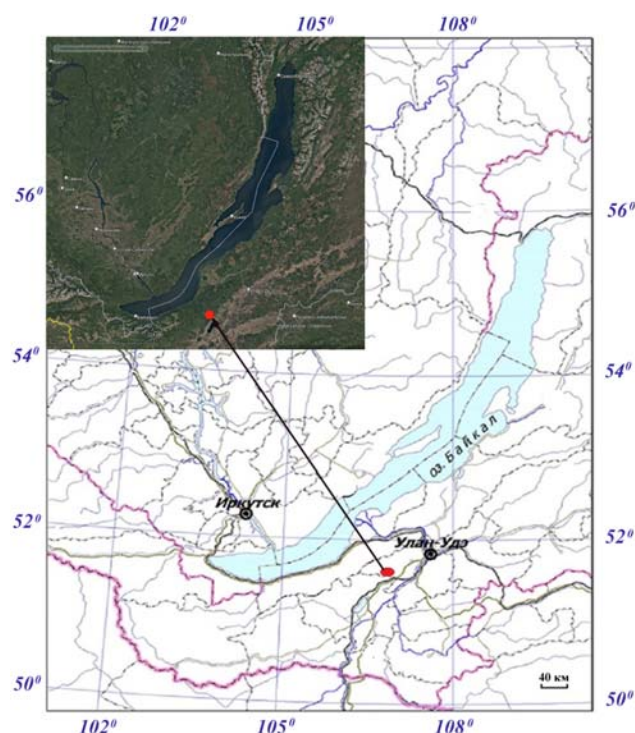


Рис. 1. Район исследований – предгорье Хамар-Дабана (Юго-Западное Забайкалье)

Ключевой участок 2 находится в окрестностях горы Онгустой в бассейне р. Большой Хайцун, притока р. Оронгой, в границах участкового лесничества Оронгойского, квартал 149, выдел 27 (лесничество Иволгинское), полоса вдоль водораздела с географическими координатами центра выдела: N 51° 33' 32,6" – E 106° 36' 08,7"; h 1303 м над ур. м. Таксационная характеристика насаждения приведена в разделе «Результаты и их обсуждение».

Физико-географические условия и общая (фонная) характеристика растительности ключевых участков района исследований

По физико-географическому районированию ключевой участок 1 и территория его ближайшего окружения входит в состав Южно-Сибирской горной области, Хамар-Дабанской горнотаежно-котловинной провинции (Ландшафты ..., 1977), горно-таежных Южно-Сибирских формаций североазиатских таежных геосистем с доминированием сосновых травяных с подлеском из рододендрона даурского (*Rhododendron dauricum*) лесов. Лесная растительность ключевого участка представлена (Раститель-

ность ..., 1972) лиственничными (*Larix sibirica*) и сосновыми (*Pinus sylvestris*) горно-таежными лесами Южно-Сибирских формаций Урало-Сибирской фратрии формаций. В соответствии с эколого-корреляционной картой (Корреляционная ..., 1977) растительные сообщества представляют собой комплексы низко-, местами среднегорных сосновых и лиственнично-сосновых разнотравных лесов. Растительность (Атлас ..., 1993) района исследований и его ближайшего окружения характеризуется развитием лиственничных (*Larix sibirica*) и сосново (*Pinus sylvestris*) – лиственничных (*Larix sibirica*) травяно-брусничных (*Vaccinium vitis-idaea*) с участием рододендрона даурского (*Rhododendron dauricum*) таежных светлехвойных лесов, развитых на дерново-лесных, типичных и оподзоленных подбурях по склонам гор разных экспозиций. По системе землепользования (Карта использования ..., 1987) исследуемый район расположен на землях государственного лесного фонда с целевым назначением лесов – эксплуатационные. В соответствии с картой экологического зонирования (Экологическое зонирование ..., 2002) территория района относится к горно-таежным подгорно-склоновым средне- и низкогорным, подгорным ландшафтам с современным использованием в форме основного и побочного лесопользования в границах буферной зоны. В соответствии с атласом (Атлас ..., 2021, стр. 124) растительность района исследований характеризуется как слабонарушенная с умеренно-стабильной устойчивостью сообществ. Ключевой участок 2 и территория его ближайшего окружения, согласно ландшафтной карте (Ландшафты ..., 1977) юга Восточной Сибири, относится к горно-таежным Южно-Сибирским формациям. Здесь представлены горно-таежные темнехвойные ограниченного развития кедровые (*Pinus sibirica* Du Tour) с елью (*Picea obovata* Ledeb.) и лиственницей (*Larix sibirica* Ledeb.) кустарничково-зеленомошные леса склонов в контакте с горно-таежными сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) травяными с кустарничковым подлеском лесами предгорий Хамар-Дабана. В соответствии с картой растительности юга Восточной Сибири (Растительность ..., 1972) для ключевого участка (и его ближайшего окружения) характерна кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour) с примесью ели (*Picea obovata* Ledeb.) и лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) багульниково (*Ledum palustre* L. ssp. – *Ledum decumbens* (Aiton) Hulten) – бруснично (*Vaccinium vitis-idaea* L.) – зеленомошная, местами в сочетании с бадановыми (*Bergenia crassifolia* (L.) Fritsch) кедрочагами, тайга на контакте с сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) и лиственнично (*Larix sibirica* Ledeb.) – сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) травяно-кустарничковыми лесами, развитых на нижних частях склонов разных экспозиций. В соответствии с корреляционной эколого-фитоценотической карты (Корреляционная ..., 1977) для района исследований свойственны среднегорные, преимущественно пихтово (*Abies sibirica* Ledeb.) – кедровые (*Pinus sibirica* Du Tour) чернично-мелкотравно-зеленомошные, кедровые и кедрово-еловые (*Picea obovata* Ledeb.) кустарничково-зеленомошные леса. Восстановительные серии таких лесов представлены сосново (*Pinus*

syvestris L.) – лиственничными (*Larix sibirica* Ledeb.) и березово (*Betula platyphylla* Sukacz.) – осиновыми лесами (*Populus tremula* L.), умеренно холодных влажных местообитаний на контакте со среднегорными сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) и лиственнично (*Larix sibirica* Ledeb.) – сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) разнотравными лесами теплых сухих местообитаний. По карте зон и типов поясности растительности России и сопредельных стран (Зоны и типы поясности ..., 1999) для района исследований характерен подпояс лиственнично-темнохвойных лесов склонов, переходящих в лесостепь. Согласно экологическому зонированию Байкальской природной территории (Экологическое зонирование ..., 2002) растительность ключевого участка и его ближайшего окружения относится к подзоне восстановления, нарушенными вырубками и пожарами, лесов с последующим их лесохозяйственным использованием. В соответствии с атласом (Атлас ..., 2021, стр. 124) растительность исследуемой территории характеризуется как условно-коренная с умеренно стабильной степенью ее устойчивости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Современная растительность (геоботаническое описание) **ключевого участка 1** (правобережье ключа Чермухового в бассейне р. Оронгой) представлена березово (*Betula platyphylla*) – елово (*Picea obovata*) – лиственничными (*Larix sibirica*) разнотравно (*Carex macroura*, *Pyrola asarifolia*, *Maiáanthemum bifólium*, *Linnaea borealis*, *Equisetum sulvaticum*, *Equisetum pratense*) – зеленомошными (*Pleurozium schreberii*, *Hylocomium splendens*) с брусничкой (*Vaccinium vitis-idaea*) лесами. В подросте доминирует ель (*Picea obovata*), содоминант – кедр (*Pinus sibirica*) с единичными экземплярами сосны (*Pinus sylvestris*) и лиственницы (*Larix sibirica*). Возраст ели в подросте составляет до 15 лет, кедра до 8–10 лет, тогда как сосна представлена 2–3-х летними единичными деревьями. В подлеске отмечены можжевельник (*Juniperus sibirica*) шиповник (*Rosa acicularis*), спирея (*Spiraea flexuosa*), багульник (*Ledum palustre*) и рододендрон (*Rhododendron dauricum*). На фотографии (рис. 2) отражены основные структурно-динамические характеристики лесов ключевого участка района исследований.

По структурно-динамической организации лесов этого ключевого участка возможно судить о вековой динамике зональной светлохвойной тайги, где в подросте доминирует ель (*Picea obovata*) с присутствием кедра (*Pinus sibirica*). Количество экземпляров ели и кедра в подросте составляет до 1500 шт./га, состав – 6Е4К+С+Лц, средний возраст составляет 10 лет; средняя высота 0,6 м; подрост жизнеспособный, что является признаком устойчивого формирования кедрово-елового (а при разрушении древостоя, кедр будет стремиться к доминированию в фитоценозе) леса в перспективе.

Закладка лесотаксационной пробной площади позволила выявить состав древостоя и основные структурно-ценотические характеристики леса ключевого участка 1 (рис. 2, карточка пробной площади № 1, табл. 1).

Присутствие подроста ели и кедра позволяет говорить о хороших перспективах на выход этих пород деревьев во второй ярус. Тогда как современная доминирующая лесообразующая порода – лиственница (*Larix sibirica*) в подросте присутствует весьма незначительно. В сложении древостоя очень редко участвует сосна (*Pinus sylvestris*). Происходит смена лесообразующих пород деревьев в светлохвойной тайге. Следует отметить и то, что в составе напочвенного покрова этого леса присутствует калипсо луковичное (*Calypso bulbosa*) и можжевельник (*Juniperus sibirica*), виды, представители темнохвойной тайги. В настоящее время происходит формирование темнохвойной тайги (присутствие устойчивого подроста темнохвойных пород – ели и кедра) под пологом светлохвойных лесов, где второй ярус также представлен елью и кедром. Здесь уместно отметить, что при закладке почвенного разреза на территории этого ключевого участка установлен тип почв – подбур иллювиально-гумусный глееватый, характерный для темнохвойной тайги. Это является свидетельством того, что ранее здесь была развита темнохвойная тайга.

Проведенные геоботаническое описание с элементами таксации позволили выявить современную структурно-динамическую организацию, естественную трансформацию и тенденции развития лесов ключевого участка 2 (окружение горы Онгустой в бассейне р. Большой Хайцун, притока р. Оронгой, рис. 3). Здесь развиты сосновые (*Pinus sylvestris*) с участием лиственницы (*Larix sibirica*), кедра (*Pinus sibirica*), пихты (*Abies sibirica*) и ели (*Picea obovata*) душекиево (*Dusheckia fruticosa*) – рододендрово (*Rhododendron dauricum*) – спирейно (*Spiraea flexuosa*) – брусничные (*Vaccinium vitis-idaea*) с участием можжевельника (*Juniperus sibirica*) леса. Напочвенный покров представлен мхами (*Dicranum polysetum*, *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*). Во II-м ярусе доминирует сосна (*Pinus sylvestris*) с участием кедра (*Pinus sibirica*), лиственницы (*Larix sibirica*), пихты (*Abies sibirica*) и ели (*Picea obovata*). В подросте доминирует кедр, а пихта и ель представлены незначительно. Здесь следует говорить о восстановлении темнохвойной тайги, проходящей через смену доминирующих светлохвойных пород деревьев (сосны и лиственницы). Темнохвойные – кедр и пихта доминируют в подросте повсеместно на территории ключевого участка и в его окружении.

Установлено, что под пологом березово (*Betula platyphylla*) – соснового (*Pinus sylvestris*), с участием кедра (*Pinus sibirica*), древостоя формируется подрост пихты (*Abies sibirica*) с участием ели (*Picea obovata*) и кедра (*Pinus sibirica*). Состав – 6П1Е3К, количество 1200 шт./га, средний возраст составляет 10 лет; средняя высота 0,6 м; подрост жизнеспособный. Активизация формирования устойчивого яруса, состоящего из темнохвойных деревьев – вековая динамика тайги со сменой лесообразующих пород. Здесь также следует отметить начальный этап вековой динамики тайги с тенденцией на формирование полидоминантных светлохвойно-темнохвойных лесов с возможным развитием пихтарников. В этой связи, уместно отметить,

что развитие пихтовых лесов всегда обусловлено повышенными осадками и влажностью местообитаний.

Выше отмеченные структурно-ценотические характеристики леса (установленные при геоботаническом описании) коррелируют с данными лесоустройства 2016 года, где состав древостоя ключевого участка следующий: 7Б (35)1Ос2П+К, Ед.10 К(180),

в подросте – ель, кедр, редко пихта. Тогда как сосна, лиственница и береза представлены единичными экземплярами. Здесь следует отметить, что почва этого ключевого участка – подбур иллювиально-гумусный глееватый, что является характерным типом почв темнохвойной тайги.



Рис. 2. Березово – (*Betula platyphylla*) слово – (*Picea obovata*) – лиственничный (*Larix sibirica*) разнотравно (*Carex macroura*, *Pyrola asarifolia*, *Maianthemum bifolium*, *Linnaea borealis*, *Equisetum sulvaticum*, *Equisetum pratense*) – зеленомошный (*Pleurozium schreberii*, *Hylocomium splendens*) с брусничкой (*Vaccinium vitis-idaea*) разновозрастный лес по шлейфу склона северной экспозиции. В напочвенном покрове существенно представлены такие виды как майник двулистный (*Maianthemum bifolium*), брусника *Vaccinium vitis-idaea*, грушанка *Pyrola rotundifolia*, линнея северная (*Linnaea borealis*). Из мхов широко представлены *Pleurozium schreberii*, *Hylocomium splendens*, являющиеся эдификаторами напочвенного покрова зональной темнохвойной тайги

Таблица 1
Карточка пробной площади № 1 (Лесничество Иволгинское, субъект Российской Федерации Республика Бурятия)

Таксационная характеристика (в переводе на 1 га)															
Ярус/ ср. h яруса, м	Элемент леса	Коэффициент состава	Возраст, лет	Средняя высота, м	Диаметр, см	Сумма площадей сечения, м ²	Полнота	Класс бонитета	Тип леса	Запас, м ³					% выхода деловой древесины
									ТУМ	Растущие деревья		Сухостой	Захламленность		
										ито го	В т. ч. усы-хающие		Об-щий	В т. ч. лик-вид	
Глазомерно-измерительная таксация															
1\23	Лц	6	120	26	21	–	1,2	3	Зм.рт	–	–	–	–	–	–
	Е	3	120	18	25	–				–	–	–	–	–	
	Б	1	50	16	16	–				–	–	–	–	–	
	Σ	–	–	–	–	43			В-2	430	–	–	5	5	85
Перечислительная таксация															
1\20,5	Лц	6	131	21,6	24,9	25,9	1,28	3	Зм	251	–	3	–	–	85,2
	Е	4	124	18,8	17,3	16				144	–	6	–	–	93,7
	Б	+	–	14	18,8	2				14	–	–	–	–	71,4
	Σ	–	–	–	–	43,9			В-3	409	–	9	3	3	89

Примечание. Участковое лесничество Оронгойское. Квартал 157 выдел 1, S пробы 0,54 м², размер 101 м * 53 м.

Подрост 4К6Е; 1500 шт/га; Нср-0,6 м. Напочвенный покров: зеленые мхи, разнотравный. Почва: подбур иллювиально-гумусовый глееватый на деловии-пролювии массивных горных пород. Подлесок редкий: шиповник, спирея, багульник. 1,0 тыс. шт/га. Положение и рельеф: экспозиция С, уклон 2 град.



Рис. 3. Сосновый с участием березы (*Betula platyphylla*) ели (*Picea obovata*), кедра (*Pinus sibirica*) с подростом из пихты и кедра лес на водоразделе между рр. Большой Хайцун и Оронгой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительное время использование лесов (ключевой участок 1 – правобережье ключа Черемуховый) и его ближайшего окружения в бассейне р. Оронгой в качестве ресурсной базы лесопользования, большей частью – побочного, на фоне изменчивости климата и воздействий антропогенных факторов обусловило формирование длительно-производных светлохвойно-мелколиственных лесов. На месте светлохвойных лесов сформировались их производные варианты, где в разных ярусах доминируют мелколиственные породы деревьев – береза (*Betula platyphylla*), осина (*Populus tremula*), в различных количественных соотношениях и сомкнутостью древостоев. Отмечено, что периодические пожары разной интенсивности на местах выборочных вырубок хвойных пород не способствует формированию светлохвойных лесов в районе исследований. Однако под пологом производных мелколиственных (*Betula platyphylla*, *Populus tremula*), с редким участием сосны (*Pinus sylvestris*) и лиственницы (*Larix sibirica*), лесов наблюдается активизация участия темнохвойных пород деревьев – ели (*Picea obovata*) и кедра (*Pinus sibirica*), реже сосны (*Pinus sylvestris*) и лиственницы (*Larix sibirica*), в подросте (в основном это 10–15-летние деревья). В этой связи, следует предположить, что вековая динамика, связанная со сменой лесообразующих пород (что является закономерным для зональной тайги) на фоне изменчивости климата в регионе способствует формированию полидоминантных, на начальном этапе, темнохвойно-светлохвойных лесов. Ограничением этих тенденций развития следует считать пожары (частично и выборочные рубки), которые будут способствовать существованию здесь длительно-производных лесов с доминированием во всех ярусах мелколиственных пород деревьев. Следует отметить и то, что почвенный покров ключевых участков в районе ис-

следований представлен подбуром иллювиально-гумусовым глееватым, характерным для темнохвойной тайги.

Выявленные особенности современной структурно-динамической организации и тенденций развития лесов ключевого участка 2 отражают существенную их структурно-ценотическую трансформацию за последние десятилетия. Под пологом светлохвойных (*Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*) лесов, развитых на водоразделе между рр. Большой Хайцун и Оронгой активно формируется ярус, состоящий из темнохвойных (*Pinus sibirica*, *Picea obovata*) пород деревьев. В подросте, наряду с кедром и елью, отмечена пихта (*Abies sibirica*). Тогда как подрост сосны (*Pinus sylvestris*) и лиственницы (*Larix sibirica*) представлен единичными экземплярами. Здесь возможно предположить смену лесообразующих пород деревьев как систему последовательного замещения – «светлохвойные – смешанные темнохвойно-светлохвойные – светлохвойно-темнохвойные – темнохвойные» леса в ходе вековой динамики коренной тайги. В этой связи, существует вероятность существенных трансформаций вертикальных ценотических перестроек и пространственной стратиграфии лесов в данных физико-географических условиях района исследований. Сохранившиеся в напочвенном покрове виды растений (сосудистые и мхи), характерные для зональных темнохвойных лесов, свидетельствуют об имеющемся потенциале восстановления коренной темнохвойной тайги в предгорьях Хамар-Дабана в целом.

Продолжение исследований в целях выявления современной структурно-динамической и пространственной организации лесов позволят установить тенденции их развития и могут иметь практическую значимость при проведении лесоустроительных работ и проектировании лесохозяйственных мероприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Атлас. Байкал. М.: Изд-во ФСГК, 1993. 160 с.
2. Атлас. Байкальский регион: общество и природа. М.: Изд-во «Паулсен», 2021. 320 с.
3. Алексеев А. С., Дмитриев В. Ю., Пономаренко А. Г. Экосистемные перестройки и эволюция биосферы. М.: ГЕОС, 2001. Вып. 5. 126 с.
4. Арманд Д. Л., Кушнарева Г. В. Переход экосистем через критические состояния в пространстве // Экосистемы в критических состояниях. М.: Наука, 1989. С. 75–138.
5. Блауберг И. В., Юдин Э. Г. Становление и сущность системного подхода. М.: Наука, 1973. 270 с.
6. Большаков В. Н., Кряжмский Ф. В., Павлов Д. С. Перспективные направления развития экологических исследований в России // Экология. 1993. № 3. С. 3–16.
7. Бардунов Л. В. Определитель листостебельных мхов Центральной Сибири. Л.: Наука, 1969. 330 с.
8. Воронов А. Г., Дроздов Н. Н., Кривошук Д. А., Мяло Е. Г. Биogeография с основами экологии. М.: Изд-во МГУ, 2002. 391 с.
9. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных стран (Карта, М-б 1 8 000 000). М.: Изд-во МГУ, 1999. 2 л.
10. Конспект флоры Сибири. Сосудистые растения. Новосибирск: Наука, 2005. 362 с.
11. Корреляционная эколого-фитоценотическая карта; М-б 1 : 7 500 000. Иркутск: Изд-во ИГ СО АН СССР, 1977. 1 л.
12. Карта использования земель юга Восточной Сибири; М-б 1 : 1 500 000. М.: ГУГК, 1988. 2 л.
13. Ландшафты юга Восточной Сибири; М-б 1 : 1 500 000. М.: ГУГК, 1977. 4 л.
14. Методы геоботанических исследований. М.: Изд-во Ассоциации «Экосистема», 1996. 21 с.
15. Полевая геоботаника: Т. 4. М.-Л., 1976. 336 с.
16. Растительность юга Восточной Сибири; М-б 1 : 1 500 000. М.: ГУГК, 1972. 4 л.
17. Сочава В. Б. Растительный покров на тематических картах. Новосибирск: Наука, 1979. 189 с.
18. Шмальгаузен И. И. Интеграция биологических систем и их самоорганизация // Бюллетень МОИП. Отд-ние биол. 1961. Т. 66. Вып. 2. С. 104–135.
19. Флора Центральной Сибири. Новосибирск: Наука, 1979. Т. 1–2. 1047 с.
20. Флора Сибири. Новосибирск: Наука, 1987–2003. Т. 1–14.
21. Экосистемы в критических состояниях. М.: Наука, 1989. 160 с.
22. Экологическое зонирование Байкальской природной территории; М-б 1 : 1 000 000. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2002. 2 л.

REFERENCES

1. Atlas. Baykal. M.: Izd-vo FSGK, 1993. 160 s.
2. Atlas. Baykal'skiy region: obshchestvo i priroda. M.: Izd-vo "Paulsen", 2021. 320 s.
3. Alekseyev A. S., Dmitriyev V. Yu., Ponomarenko A. G. Ekosistemnyye perestroyki i evolyutsiya biosfery. M.: GEOS, 2001. Vyp. 5. 126 s.
4. Armand D. L., Kushnareva G. V. Perekhod ekosistem cherez kriticheskiye sostoyaniya v prostranstve // Ekosistemy v kriticheskikh sostoyaniyakh. M.: Nauka, 1989. S. 75–138.
5. Blauberger I. V., Yudin E. G. Stanovleniye i sushchnost' sistemnogo podkhoda. M.: Nauka, 1973. 270 s.
6. Bol'shakov V. N., Kryazhimskiy F. V., Pavlov D. S. Perspektivnyye napravleniya razvitiya ekologicheskikh issledovaniy v Rossii // Ekologiya. 1993. № 3. S. 3–16.
7. Bardunov L. V. Opredelitel' listostebel'nykh mkhov Tsentral'noy Sibiri. L.: Nauka, 1969. 330 s.
8. Voronov A. G., Drozdov N. N., Krivolutskiy D. A., Myalo E. G. Biogeografiya s osnovami ekologii. M.: Izd-vo MGU, 2002. 391 s.
9. Zony i tipy poyasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh stran (Karta, M-b 1 8 000 000). M.: Izd-vo MGU, 1999. 2 l.
10. Konspekt flory Sibiri. Sosudistyye rasteniya. Novosibirsk: Nauka, 2005. 362 s.
11. Korrelyatsionnaya ekologo-fitotsenoticheskaya karta; M-b 1 : 7 500 000. Irkutsk: Izd-vo IG SO AN SSSR, 1977. 1 l.
12. Karta ispol'zovaniya zemel' yuga Vostochnoy Sibiri; M-b 1 : 1 500 000. M.: GUGK, 1988. 2 l.
13. Landshafty yuga Vostochnoy Sibiri; M-b 1 : 1 500 000. M.: GUGK, 1977. 4 l.
14. Metody geobotanicheskikh issledovaniy. M.: Izd-vo Assotsiatsii "Ekosistema", 1996. 21 s.
15. Polevaya geobotanika: T. 4. M.-L., 1976. 336 s.
16. Rastitel'nost' yuga Vostochnoy Sibiri; M-b 1 : 1 500 000. M.: GUGK, 1972. 4 l.
17. Sochava V. B. Rastitel'nyy pokrov na tematicheskikh kartakh. Novosibirsk: Nauka, 1979. 189 s.
18. Shmal'gauzen I. I. Integratsiya biologicheskikh sistem i ikh samoorganizatsiya // Byulleten' MOIP. Otdniye biol. 1961. T. 66. Vyp. 2. S. 104–135.
19. Flora Tsentral'noy Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1979. T. 1–2. 1047 s.
20. Flora Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1987–2003. T. 1–14.
21. Ekosistemy v kriticheskikh sostoyaniyakh. M.: Nauka, 1989. 160 s.
22. Ekologicheskoye zonirovaniye Baykal'skoy prirodnoy territorii; M-b 1 : 1 000 000. Irkutsk: Izd-vo IG SO RAN, 2002. 2 l.

© Воронин В. И., Сизых А. П., Осолков В. А.,
Гриценюк А. П., Мориц Р. С., 2023

ВЫСОТА ДРЕВОСТОЕВ ЕЛИ (РОД *PICEA*) КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ИХ ПРОДУКТИВНОСТИ: КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ*

В. А. Усольцев^{1,2}, И. С. Цепордей², В. П. Часовских³

¹Уральский государственный лесотехнический университет
Российская Федерация, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

²Ботанический сад УрО РАН
Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

³Уральский государственный экономический университет
Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта 62

Точная оценка продуктивности лесов важна для эффективного ведения хозяйства и оценки качества местопроизрастания, и в этой связи для оценки их продуктивности было разработано множество методов. Продуктивность лесов обычно определяется по запасу стволовой древесины. Однако на запас влияют такие факторы, как начальная густота и история лесохозяйственных мероприятий, а также длительность оборота рубки. В качестве показателя продуктивности местопроизрастания изначально использовали высоту древостоя, основываясь на гипотезе о ее тесной корреляции с запасом древостоя. Это утверждение известно как правило Эйхгорна. Тем не менее, включение в зависимость «средняя высота – запас» дополнительных переменных, учитывающих климатические и физико-географические характеристики местообитания, а также почвенные условия, существенно улучшает прогностическую способность моделей. На основе фактических данных о таксационных показателях еловых древостоев на 630 пробных площадях, заложенных разными исследователями в территориальных градиентах Евразии, разработана эмпирическая модель изменения средней высоты еловых древостоев (род *Picea* L.) в зависимости от возраста и густоты древостоя, с одной стороны, и от средних температур января и средних годовичных осадков, – с другой, подтверждающая действие закона Либиха–Шелфорда в территориальных градиентах Евразии. Закономерность согласуется с ранее установленным изменением фитомассы деревьев и древостоев. Вклады таксационных показателей и климатических факторов в объяснение изменчивости средней высоты ельников составили соответственно 88 и 12 %.

Ключевые слова: продуктивность древостоя, средняя высота, запас стволовой древесины, таксационные показатели, климатические показатели, территориальные градиенты Евразии.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 419–424

HEIGHT OF SPRUCE STANDS (GENUS *PICEA*) AS A CHARACTERISTIC OF THEIR PRODUCTIVITY: CLIMATIC ASPECTS

V. A. Usoltsev^{1,2}, I. S. Tsepordey², V. P. Chasovskikh³

¹Ural State Forest Engineering University,
37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
202a, 8 Marta Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

³Ural State University of Economics, 62, 8 Marta Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

A correct estimation of forest productivity is important for effective management and assessment of the quality of the habitat, and in this regard, many methods have been developed. The productivity of forests is usually determined by the stem volume. However, the latter is influenced by factors such as the initial density and history of forest management, as well as the duration of the logging turnover. The height of the stand was initially used as an indicator of the productivity of the forest sites, based on the hypothesis of its close correlation with the stem volume. This statement is known as the Eichhorn's rule. Nevertheless, the inclusion of additional variables in the "average height – stem volume" dependence, taking into account the climatic and physical-geographical characteristics of the habitat, as well as soil conditions, significantly improves the predictive ability of the models. Based on the empirical data on the taxation indicators of spruce stands on 630 sample plots, established by different researchers in the territorial gradients of Eurasia, an empirical model of the change in the average height of spruce stands (genus *Picea* L.) depending on the

* Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

age and density of the stand, on the one hand, and on the average temperatures of January and average annual precipitation, on the other one, is designed. It is confirmed the effect of the Liebig-Shelford law in the territorial gradients of Eurasia is confirmed. The pattern is consistent with the previously established change in the phytomass of trees and stands in the same gradients. The contributions of taxation indicators and climatic factors to the explanation of the variability of the average height of spruce forests amounted to 88 and 12 %, respectively.

Keywords: stand productivity, average height, stem volume, taxation indicators, climatic indicators, territorial gradients of Eurasia.

ВВЕДЕНИЕ

Точная оценка продуктивности лесов важна для эффективного ведения хозяйства и оценки качества местопроизрастания, и в этой связи для оценки их продуктивности было разработано множество методов [1; 2; 3; 4; 6; 12; 15; 18; 23]. Продуктивность лесов обычно определяется по запасу стволовой древесины. Однако на запас влияют такие факторы, как начальная густота и история лесохозяйственных мероприятий, а также длительность оборота рубки [9; 16]. В качестве показателя продуктивности местопроизрастания изначально использовали высоту древостоя, основываясь на гипотезе о ее тесной корреляции с запасом древостоя [10]. Продуктивность одновозрастного чистого древостоя той или иной породы в данном местообитании и в широком диапазоне лесохозяйственных мероприятий при полной сомкнутости полога всецело определяется его средней высотой [22]. Это утверждение известно как правило Эйхгорна [17]. В частности, для оценки продуктивности лесов используется класс бонитета, определяемый средней высотой в базовом возрасте, как показатель, не зависящий от начальной и текущей густоты [13; 15; 24].

Хотя зависимость запаса от средней высоты гарантирует простоту и надежность оценок, она не учитывает влияния других важных переменных. Варьирование этих неучтенных переменных может снизить объяснительную способность названной зависимости [14]. Включение в подобную модель дополнительных переменных, учитывающих климатические и физико-географические характеристики местообитания, а также почвенные условия, существенно улучшают прогностическую способность модели [11; 14; 19; 20; 25; 27; 28; 29; 31]. Тем не менее, сегодня по вопросу влияния климатических факторов на продуктивность лесов нет единого мнения. Ранее считалось, что лес может расти только при условии, что средняя температура четырех вегетационных месяцев составляет не ниже +10 °С, а суммарное количество осадков за тот же период превышает 50 мм [21]. Сегодня оценки влияния температуры и осадков на продуктивность древостоев по разным регионам сильно варьируют, и единое мнение отсутствует [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель наших исследований состояла в разработке модели средней высоты еловых древостоев (род *Picea* L.) в связи с их таксационными показателями и с территориально распределенными температурами и осадками в пределах Евразии. Для этого использована база данных [26], из которой взяты таксационные характеристики еловых древостоев, сопряженные с ко-

ординатами соответствующих пробных площадей в количестве 630 определений. Характеристика исходного материала представлена в таблице. Положение пробных площадей нанесено на карты-схемы территориального распределения средних температур января и среднегодовых осадков [30], и полученная матрица исходных данных обработана по программе регрессионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате расчетов получена следующая регрессионная модель:

$$\begin{aligned} \ln H = & 5,5093 + 3,6021 \ln A - 0,3826(\ln A)^2 - \\ & - 0,0419 (\ln A)(\ln N) - 3,2029 \ln(T + 50) - \\ & - 2,2148 \ln P + 0,6396 [\ln(T + 50)(\ln P)]; \\ \text{adj}R^2 = & 0,8745; \text{SE} = 0,26, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\ln(T+50)(\ln P)$ – комбинированная переменная, характеризующая совместное действие температур и осадков; $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка модели. Для коррекции свободного члена модели (1) введена поправка на логарифмирование переменных. Модель (1) действительна в диапазонах действующих факторов, показанных в таблице.

Все регрессионные коэффициенты модели значимы на уровне $p < 0,001$. Запас древостоя в качестве одной из независимых переменных в модели (1) оказался не значимым вследствие его тесной корреляции с двумя массообразующими факторами – возрастом и густотой древостоя. В результате регрессионного анализа установлена также величина вкладов действующих факторов в объяснение изменчивости зависимой переменной. Названные вклады таксационных показателей и климатических факторов составили соответственно 88 и 12 %. О степени адекватности модели (1) можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений высоты древостоев (рис. 1).

Модель (1) протабулирована далее по задаваемым значениям температур и осадков при фиксированных средних значениях таксационных показателей, показанных в таблице. Полученная 3Д-интерпретация модели (1) представляет пропеллеро-образную поверхность в координатах «высота – температура – осадки» (рис. 2), подтверждающую действие закона Либиха–Шелфорда [5], всеобщий характер которого был показан на примере фитомассы деревьев и древостоев лесобразующих видов Евразии [7].

Характеристика исходных данных 630 пробных площадей

Статистики	Диапазоны изменения исходных показателей					
	Температура января, °C	Осадки, мм	Возраст, лет	Густота, тыс. экз./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м
Среднее значение	-9	636	84	2,8	19,3	17,2
Минимальное значение	-35	190	3	0,13	0,43	0,25
Максимальное значение	5	1140	350	281,0	48,9	38,6
Стандартное отклонение	6,5	145,5	51,8	12,9	10,2	8,4
Коэффициент вариации, %	-72,9	22,9	61,5	461,3	53,0	49,0

Согласно закону Либиха–Шелфорда, рост растений ограничивается как недостатком, так и избытком действующего фактора. Это хорошо прослеживается на рис. 2. В условиях достаточного увлажнения (осадки 900 мм) средняя высота древостоя снижается по мере падения температуры, а в условиях недостаточного увлажнения (осадки 200 мм) снижается по мере возрастания температуры. Мы видим на рис. 2 две области минимальных средних высот: при достаточном увлажнении и минимальной температуре и при недостаточном увлажнении и максимальной температуре. В первом случае рост древостоя лимитируется избытком осадков и недостатком тепла, а во втором – недостатком осадков и избытком тепла.

Далее, используя принцип пространственно-временного замещения, ранее реализованный нами на примерах моделей фитомассы деревьев и древостоев лесобразующих видов Евразии [7], мы показываем,

насколько изменится средняя высота ельников при предполагаемом увеличении средней январской температуры на 1 °C при неизменных осадках (рис. 3) и насколько изменится средняя высота при возможном снижении среднегодовых осадков на 20 мм при неизменной температуре (рис. 4).

Мы видим на рис. 3, что при повышении январской температуры на 1 °C при неизменных осадках средняя высота древостоев в условиях достаточного увлажнения повышается на 2–8 %, а в условиях недостаточного увлажнения снижается на 1,8–2,0 %. Соответственно рис. 4 показывает, что в случае снижения среднегодовых осадков на 20 мм при неизменной температуре в районах недостаточного теплообеспечения средняя высота увеличивается на 1,3–3,4 %, а в регионах достаточного теплообеспечения – снижается на 0,5–1,7 %.

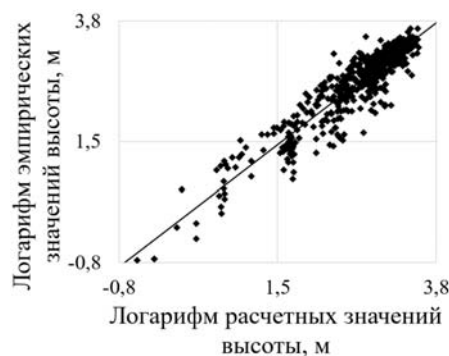


Рис. 1. Соотношение эмпирических и расчетных значений высоты еловых древостоев согласно модели (1)

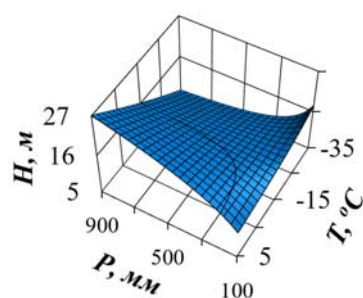


Рис. 2. Трехмерная интерпретация модели (1) при средних значениях возраста 84 года и густоты древостоев 2,8 тыс. экз./га

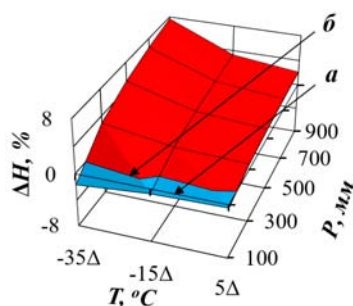


Рис. 3. Расчетное изменение средней высоты древостоев (ΔH , %) при предполагаемом увеличении средней январской температуры на 1 °C при неизменных осадках: a – плоскость нулевого приращения ΔH ; b – линия, на которой положительные приращения ΔH (красный цвет) сменяются отрицательными (синий цвет)

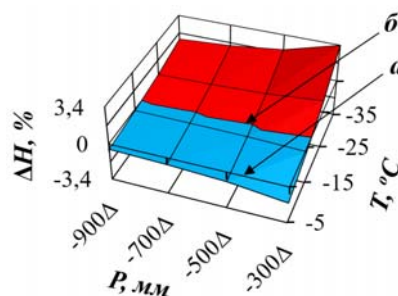


Рис. 4. Расчетное изменение средней высоты древостоев (ΔH , %) при предполагаемом снижении среднегодовых осадков на 20 мм при неизменной температуре

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана эмпирическая модель изменения средней высоты еловых древостоев (род *Picea* L.) в зависимости от возраста и густоты древостоя, с одной стороны, и от средних температур января и средних годовичных осадков, – с другой, подтверждающая действие закона Либиха–Шелфорда в территориальных градиентах Евразии. Закономерность согласуется с ранее установленным изменением фитомассы деревьев и древостоев. Вклады таксационных показателей и климатических факторов в объяснение изменчивости средней высоты ельников составили соответственно 88 и 12 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Бузыкин А. И., Пшеничникова Л. С., Суховольский В. Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск : Наука, 2002. 151 с.
- Загреев В. В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М. : Лесн. пром-сть, 1978. 240 с.
- Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск : Наука, 1977. 160 с.
- Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск : Наука, 2013. 208 с.
- Розенберг Г. С., Рянский Ф. Н., Лазарева Н. В. и др. Общая и прикладная экология. Самара–Тольятти : Изд-во Самар. гос. эконом. ун-та, 2016. 452 с.
- Свалов Н. Н. Прогнозирование роста древостоев. Методы учета и прогноза лесных ресурсов. Сер. «Лесоведение и лесоводство». Т. 2. М. : ВИНТИ, 1978. 110 с.
- Цепордей И. С. Усольцев В. А., Всеобщий характер действия закона Либиха–Шелфорда на биологическую продуктивность лесообразующих видов в климатических градиентах Евразии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 4 (56). С. 5–18. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.4.5>,
- Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation // Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111. Article D05109.
- Anta M., Diéguez-Aranda U. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain) // European Journal of Forest Research. 2005. Vol. 124. P. 19–28.
- Baur F. Ertrags-oder Zuwachstafeln für die Fichte // F. Baur (ed.). Die Fichte in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form. Berlin, Heidelberg: Springer, 1877. P. 1–58. https://doi.org/10.1007/978-3-642-91377-8_1.
- Bravo-Oviedo A., Tomé M., Bravo F. et al. Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach // Canadian Journal of Forest Research. 2008. Vol. 38(9). P. 2348–2358.
- Burkhart H. E., Tomé M. Modeling forest trees and stands. Springer Dordrecht, Science & Business Media, 2012. 458 p.
- Carmean W. H., Lenthall D. J. Height-growth and site-index curves for jack pine in north central Ontario // Canadian Journal of Forest Research. 1989. Vol. 19(2). P. 215–224.
- Chauke M., Mwambi H., Kotze H. Modelling dominant height growth including a rainfall effect using the algebraic difference approach // CERNE. 2022. Vol. 28. Article e-103112. DOI: 10.1590/0104776020228013112.
- Clutter J. L., Fortson J. C., Pienaar L. V. et al. Timber management: A quantitative approach. N.Y.: John Wiley & Sons, 1983. 334 p.
- Davis L., Johnson K., Bettinger P. et al. Forest management: to sustain ecological, economic, and social values. McGraw Hill: Waveland Pr. Inc., 2001. 816 p.
- Eichhorn F. Beziehungen zwischen Bestandshöhe und Bestandsmasse // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1904. Vol. 80. P. 45–49.
- Goelz J., Burk T. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario // Canadian Journal of Forest Research. 1992. Vol. 22(6). P. 776–784.
- González-García M., Hevia A., Majada J. et al. Dynamic growth and yield model including environmental factors for *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden short rotation woody crops in Northwest Spain // New Forests. 2015. Vol. 46(3). P. 387–407.
- Hunter I. R., Gibson A. R. Predicting *Pinus radiata* site index from environmental variables // New Zealand Journal of Forestry Science. 1984. Vol. 14(1). P. 53–64.
- Mayr H. Waldbau auf naturgesetzlicher Grundlage. Ein Lehr- und Handbuch. Berlin: P. Parey, 1909. 570 p.
- Picard N., Saint-André L., Henry M. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 2012. 215 pp.
- Sharma M., Subedi N., Ter-Mikaelian M. et al. Modeling climatic effects on stand height/site index of plantation-grown jack pine and black spruce trees // Forest Science. 2015. Vol. 61(1). P. 25–34.
- Skovsgaard J. P., Vanclay J. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands // Forestry, 2008. Vol. 81(1). P. 13–31.
- Snowdon P., Benson M. L., Woollons R. C. Incorporation of climatic indices into models of growth of *Pinus radiata* in a spacing experiment // New Forests. 1998. Vol. 16(2). P. 101–123.
- Usoltsev V. A. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020. Available at: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v2.xlsx.
- Wang Y., Lemay V. M., Baker T. G. Modelling and prediction of dominant height and site index of *Eucalyptus globulus* plantations using a nonlinear mixed-

effects model approach // Canadian Journal of Forest Research. 2007. Vol. 37(8). P. 1390–1403.

28. Weiskittel A. R., Hann D. W., Kershaw J. A. jr. et al. Forest growth and yield modeling. John Wiley & Sons, UK, 2011. 432 p.

29. Woollons R. C., Snowdon P., Mitchell N. D. Augmenting empirical stand projection equations with edaphic and climatic variables // Forest Ecology and Management. 1997. Vol. 98(3). P. 267–275.

30. World Weather Maps; 2007. Available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather>.

31. Yılmaz M., Usta A., Öztürk İ. Relationships between site indices and ecological factors for black alder stands in the Turkish eastern Black Sea region // Fresenius Environmental Bulletin. 2015. Vol. 24. P. 1507–1515.

REFERENCES

1. Buzykin A. I., Pshenichnikova L. S., Sukhovolsky V. G. Density and productivity of wood cenoses. Novosibirsk : Nauka, 2002. 151 p.

2. Zagreev V. V. Geographical patterns of growth and productivity of stands. M. : Lesnaya Promyshlennost', 1978. 240 p.

3. Kuzmichev V. V. Patterns of growth of stands. Novosibirsk : Nauka, 1977. 160 p.

4. Kuzmichev V. V. Regularities of the dynamics of stands: principles and models. Novosibirsk : Nauka, 2013. 208 p.

5. Rozenberg G. S., Ryanskiy F. N., Lazareva N. V. et al. General and applied ecology. Samara–Togliatti: Izdatel'stvo Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta, 2016. 452 p.

6. Svalov N. N. Forecasting the growth of stands. Methods of estimating and forecasting of forest resources. Ser. "Forestry and Forest Management". Vol. 2. Moscow, VINITI, 1978. 110 p.

7. Tsepordey I. S., Usoltsev V. A. The universal nature of the effect of the Liebig-Shelford law on the biological productivity of forest-forming species along the climatic gradients of Eurasia // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. "Forest, Ecology, Nature Management". 2022. No. 4 (56). P. 5–18. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.4.5>.

8. Alexander L. V., Zhang X., Peterson T. C. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation // Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111. Article D05109.

9. Anta M., Diéguez-Aranda U. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain) // European Journal of Forest Research. 2005. Vol. 124. P. 19–28.

10. Baur F. Ertrags- oder Zuwachstafeln für die Fichte // F. Baur (ed.). Die Fichte in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form: Unter Zugrundlegung der an der K. Württemb. forstlichen Versuchsanstalt angestellten Untersuchungen. Berlin, Heidelberg: Springer, 1877. P. 1–58.

11. Bravo-Oviedo A., Tomé M., Bravo F. et al. Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach

// Canadian Journal of Forest Research. 2008. Vol. 38(9). P. 2348–2358.

12. Burkhart H. E., Tomé M. Modeling forest trees and stands. Springer Dordrecht, Science & Business Media, 2012. 458 p.

13. Carmean W. H., Lenthall D. J. Height-growth and site-index curves for jack pine in north central Ontario // Canadian Journal of Forest Research. 1989. Vol. 19(2). P. 215–224.

14. Chauke M., Mwambi H., Kotze H. Modelling dominant height growth including a rainfall effect using the algebraic difference approach // CERNE. 2022. Vol. 28. Article e-103112. DOI: 10.1590/01047760202228013112.

15. Clutter J. L., Fortson J. C., Pienaar L. V. et al. Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons, N.Y., 1983. 334 p.

16. Davis L., Johnson K., Bettinger P. et al. Forest management: to sustain ecological, economic, and social values. Waveland Pr. Inc., 2001. 816 p.

17. Eichhorn F. Beziehungen zwischen Bestandshöhe und Bestandsmasse // Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1904. Vol. 80. P. 45–49.

18. Goelz J., Burk T. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario // Canadian Journal of Forest Research. 1992. Vol. 22(6). P. 776–784.

19. González-García M., Hevia A., Majada J. et al. Dynamic growth and yield model including environmental factors for *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden short rotation woody crops in Northwest Spain // New Forests. 2015. Vol. 46(3). P. 387–407.

20. Hunter I. R., Gibson A. R. Predicting *Pinus radiata* site index from environmental variables // New Zealand Journal of Forestry Science. 1984. Vol. 14(1). P. 53–64.

21. Mayr H. Waldbau auf naturgesetzlicher Grundlage. Ein Lehr- und Handbuch. Berlin: P. Parey, 1909. 570 p.

22. Picard N., Saint-André L., Henry M. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 2012. 215 p.

23. Sharma M., Subedi N., Ter-Mikaelian M. et al. Modeling climatic effects on stand height/site index of plantation-grown jack pine and black spruce trees // Forest Science. 2015. Vol. 61(1). P. 25–34.

24. Skovsgaard J. P., Vanclay J. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands // Forestry, 2008. Vol. 81(1). P. 13–31.

25. Snowdon P., Benson M. L., Woollons R. C. Incorporation of climatic indices into models of growth of *Pinus radiata* in a spacing experiment // New Forests. 1998. Vol. 16(2). P. 101–123.

26. Usoltsev V. A. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020. Available at:

https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v2.xlsx.

27. Wang Y., Lemay V. M., Baker T. G. Modelling and prediction of dominant height and site index of *Eucalyptus globulus* plantations using a nonlinear mixed-effects model approach // Canadian Journal of Forest Research. 2007. Vol. 37(8). P. 1390–1403.

28. Weiskittel A. R., Hann D. W., Kershaw J. A. jr. et al. Forest growth and yield modeling. John Wiley & Sons, UK, 2011. 432 p.

29. Woollons R. C., Snowdon P., Mitchell N. D. Augmenting empirical stand projection equations with

edaphic and climatic variables // Forest Ecology and Management. 1997. Vol. 98(3). P. 267–275.

30. World Weather Maps; 2007. Available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather>.

31. Yılmaz M., Usta A., Öztürk İ. Relationships between site indices and ecological factors for black alder stands in the Turkish eastern Black Sea region // Fresenius Environmental Bulletin. 2015. Vol. 24. P. 1507–1515.

© Усольцев В. А., Цепордей И. С.,
Часовских В. П., 2023

Поступила в редакцию 27.04.2023
Принята к печати 02.10.2023

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674.81; 674.049.2; 674.817.41

DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-425-430

Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. XLI, № 5. С. 425–430

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА СВОЙСТВА ДРЕВЕСНЫХ ПЛИТ БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ*

В. Н. Ермолин, М. А. Баяндин, А. В. Намятов, М. М. Баяндина

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

Древесные плиты, получаемые без связующих веществ из гидродинамически активированной измельченной древесины (опилок), имеют высокую водостойкость, но при этом сравнительно не высокие показатели прочности. Структурообразование таких плит обусловлено тем, что в процессе активации происходит фибриллирование древесных частиц. Это увеличивает межфазные поверхности, способные образовывать межмолекулярные контакты между соседними частицами. Исходя из этого, прочность таких плит можно повысить за счет того, что в процессе гидродинамической обработки увеличить степень фибрилляции древесных частиц. С этой целью предложено проводить термическую модификацию опилок перед их гидродинамической обработкой. Такой способ подготовки выбран на основании того, что при воздействии высоких температур компоненты клеточной стенки, а именно гемицеллюлозы, разлагаются. Это нарушает целостность клеточных стенок, увеличивая их пористость. В результате в процессе гидродинамической обработки в клеточных стенках будут происходить более глубокие структурные изменения увеличивающие межфазные поверхности. Для проверки этой гипотезы проведены экспериментальные исследования.

Древесные опилки обрабатывались при температуре 200 °С в течение 1–5 часов. После этого проводилась гидродинамическая обработка. Из полученной массы изготавливались плиты плотностью 950 кг/м³.

Исследование пористой структуры древесной массы и плит, которая оценивалась адсорбционной активностью по йоду и метиленовому голубому показали следующее. Количество пор, размером до 2 нм, увеличивается в несколько раз пропорционально продолжительности термообработки. В готовой плите количество таких пор снижается, приближаясь к термически не обработанной древесине. Количество пор, размером 2–50 нм, также увеличивается пропорционально продолжительности, а в готовых плитах резко снижается.

Механические свойства плит, изготовленные из термически обработанной древесины, значительно повышаются пропорционально продолжительности обработки. При продолжительности термической обработки 5 часов предел прочности при статическом изгибе составил 38,18 МПа, что на 72 % больше, чем у плит, изготовленных из опилок без термической обработки.

Термическое воздействие, продолжительностью более 3 часов снижает величину водопоглощения и разбухания. При высушивании разбухших образцов они возвращаются к первоначальным размерам и сохраняют не менее 80 % от первоначальной прочности.

Ключевые слова: фибрилляция, механоактивация, показатель прочности, гемицеллюлоза, термообработка.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 425–430

THE EFFECT OF THERMOMECHANICAL ACTIVATION ON THE PROPERTIES OF WOOD SLABS WITHOUT BINDERS

V. N. Ermolin, M. A. Bayandin, A. V. Namyatov, M. M. Bayandina

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева по проекту «Исследование механизма структурообразования органоминеральных композитов с низким КЛТР».

The research was supported by the Reshetnev University on the project “Study of the mechanism of structure formation of organomineral composites with low CLTE”.

Wood slabs obtained without binders from hydrodynamically activated crushed wood (sawdust) have high water resistance, but at the same time relatively low strength indicators. The structure formation of such plates is because fibrillation of wood particles occurs during activation. This increases the interfacial surfaces capable of forming intermolecular contacts between neighboring particles. Based on this, the strength of such plates can be increased because in the process of hydrodynamic processing, the degree of fibrillation of wood particles can be increased. It is proposed to carry out thermal modification of sawdust before their hydrodynamic treatment for this purpose. This method of preparation was chosen because when exposed to high temperatures, the components of the cell wall, namely hemicellulose, decompose. This breaks the continuity of the cell walls, increasing their porosity. As a result, during the hydrodynamic treatment, deeper structural changes will occur in the cell walls, increasing the interfacial surfaces. Experimental studies have confirmed the hypothesis.

Sawdust was processed at a temperature of 200 °C for 1–5 hours. After that, hydrodynamic treatment was carried out. Plates with a density of 950 kg/m³ were made from the resulting mass.

The study of the porous structure of wood pulp and slabs, which was evaluated by the adsorption activity of iodine and methylene blue, showed the following. The number of pores, up to 2 nm in size, increases several times in proportion to the duration of heat treatment. In the finished slab, the number of such pores decreases, approaching thermally untreated wood, the number of pores, measuring 2–50 nm, also increases in proportion to the duration, and in finished slabs it decreases sharply.

The mechanical properties of plates made of heat-treated wood are significantly increased in proportion to the duration of processing. With a heat treatment duration of 5 hours, the static bending strength was 38.18 MPa, which is 72 % more than that of plates made of sawdust without heat treatment.

Thermal exposure lasting more than 3 hours reduces the amount of water absorption and swelling. When the swollen samples are dried, they return to their original dimensions and retain at least 80 % of the original strength.

Keywords: fibrillation, mechanical activation, strength index, hemicellulose, heat treatment.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития «зеленой» экономики является увеличение использования древесины, в частности древесных плит [1]. Для дальнейшего расширения сферы использования плит необходимо улучшение их свойств. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является совершенствование процессов структурообразования плит.

В настоящее время наибольшее распространенным способом структурообразования древесных плит является использование синтетических адгезивов. Как правило, это формальдегидные смолы, что создает экологические проблемы как в процессе производства, а также эксплуатации и утилизации [2; 3].

Наиболее безопасным материалом являются древесноволокнистые плиты (ДВП) мокрого способа прессования. Древесные волокна для таких плит получают путем механического измельчения (размола) предварительно обработанной щепы в среде перегретого пара при температуре от 175 до 190 °C. При гидротермической обработке, происходит пластификация древесины и снижение ее прочности за счет частичного гидролиза компонентов клеточной стенки. Это позволяет при последующем размоле разрушать древесину по срединной пластинке до отдельных клеток (трахеид) или их пучков. Формирование структуры таких плит, происходящее в процессе горячего прессования, обусловлено физико-химическим взаимодействием между связующим и волокнами и силами трения между ними [4]. Качество материала во многом определяется физическим состоянием волокон, которое в свою очередь зависит способа их получения. Это позволяет производить плитный материал с расходом связующего 2 % к массе абсолютно сухого волокна. По мнению авторов работы [6], при такой технологии получения волокон в основном протекает

процесс их внешнего фибрирования. Лигно-углеводный комплекс блокирует доступность целлюлозного компонента действию размалывающих факторов и защищает целлюлозу от внутреннего фибрирования в процессе размола. Это не позволяет формировать аутогезионные связи между волокнами, которые бы обеспечили требуемые свойства плит без использования связующих веществ. В ряде работ отмечается [6; 7], что в процессе взрывного автогидролиза степень фибриляции древесной массы гораздо выше. Это во многом обусловлено более глубокой деструкцией компонентов лигно-углеводной матрицы древесинного вещества и высоким содержанием редуцирующих веществ [8]. Структурообразование при горячем прессовании такой древесной массы, происходит за счет физико-химического взаимодействия компонентов срединной пластинки и первичного слоя клеточной стенки, а именно лигнина и гемицеллюлоз. Это обеспечивает механические свойства плит, сопоставимые по значениям с массивной древесиной. Но даже при введении связующих веществ они, как и ДВП, имеют низкую водостойкость.

В настоящее время большое распространение получили древесноволокнистые плиты сухого способа прессования (MDF). Структурообразование у таких плит происходит, в основном, за счет синтетических адгезивов, расход которых должен быть не менее 5 % [4]. В целом эти плиты обладают сравнительно невысокой механической прочностью и низкой водостойкостью. Это существенно ограничивает их применение, в частности, их нельзя использовать в строительстве.

Перспективным решением является получение плит без использования связующих веществ из измельченных отходов деревообработки за счет предварительной гидродинамической активации древесины. Активация опилок в гидродинамическом диспергаторе позволяет получать полидисперсную древесную

массу, состоящую из высоко фибрированных частиц разных размеров с большой удельной поверхностью [9]. На вновь образованных межфазных поверхностях имеется большое количество активных функциональных групп, способных образовывать межмолекулярные связи между соседними древесными частицами. В процессе горячего прессования такой древесной массы получают плиты с высокой водостойкостью [9]. Но механические свойства таких плит не соответствуют требованиям стандартов для волокнистых плит. Это обусловлено тем, что длина активированных древесных частиц значительно меньше в сравнении с древесными волокнами, получаемыми традиционным методом термомеханического размола. Это исключает возможность механических зацеплений за счет «свайловачивания», что во многом обуславливает прочность плит при изгибе [4]. Увеличение длины частиц в данном случае невозможно ввиду исходных размеров опилок. Поэтому основным путем повышения механической прочности плит без связующих является увеличение площади межфазных поверхностей. Оно может быть достигнуто за счет более глубоких структурных изменений в древесных частицах в процессе гидродинамической обработки.

Возможным направлением решения данного вопроса может быть нарушение целостности и разрушение клеточных стенок за счет предварительного воздействия высоких температур. Как известно, в процессе термической обработки при температуре от 150 до 260 °C изменяется химический состав и надмолекулярное строение клеточной стенки, уменьшается плотность и прочность [10; 11]. Эти изменения в основном обусловлены разложением гемицеллюлоз. В работе [12] указано, что гемицеллюлозы локализованы в пространстве клеточной стенки между фибриллами целлюлозы и лигнином. Это позволяет выдвинуть предположение, что в результате разложения гемицеллюлоз при термической обработке увеличится пористость клеточных стенок, что обеспечит увеличение фибрилляции древесных частиц при последующей гидродинамической обработке и создаст условия формирования более прочной структуры плит с сохранением их водостойкости. В целях подтверждения данного предположения проведены специальные исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились с использованием опилок хвойных пород, полученных при распиловке круглых лесоматериалов влажностью $\approx 80\%$. Опилки предварительно подсушенные до влажности 4,34 % перед гидродинамической обработкой подвергались термическому воздействию в паровоздушной среде в течение 3–5 часов, при температуре 200 °C. Для этого использовалась специальная конвективная камера. Для предотвращения возгорания в камеру подавался водяной пар. В качестве критерия степени термической обработки принята величина потери массы, которая определялась весовым методом.

Гидродинамическая обработка термомодифицированных опилок осуществлялась в роторном гидродинамическом диспергаторе с радиально направленными

ми каналами с частотой вращения ротора 3000 об/мин. Продолжительность обработки принята 20 минут согласно методики подробно описанной в работе [13]. Оценка изменений капиллярной структуры древесины в результате термических и гидродинамических воздействий проводилась в соответствии с методиками [14; 15] по адсорбционной способности йода и метиленового голубого.

Из активированной древесной массы путем горячего прессования при температуре 190 °C и удельной продолжительности 2 мин/мм изготавливались плиты плотностью 950 кг/м³. Все экспериментальные запрессовки плит проводились на лабораторном гидравлическом прессе марки LabPro 1000.

После прессования полученные плиты выдерживались при нормальных условиях не менее 72 ч, затем обрезались по формату и раскраивались на образцы для испытаний. Механические показатели плит определялись по стандартным методикам на универсальной испытательной машине УТС-30.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика изменения массы опилок, с начальной влажностью 4,34 %, в процессе термической обработки при температуре 200 °C приведена в табл. 1.

Результаты исследований пористой структуры активированной древесной массы и готовых плит представлены в табл. 2.

Как видно из результатов исследований, предварительное термическое воздействие приводит к значительным изменениям пористой структуры частиц древесной массы в процессе гидродинамической обработки. Объем микропор (размером до 2 нм), который оценивается адсорбционной активностью по йоду, увеличивается в несколько раз пропорционально продолжительности термических воздействий. Поры такого размера, по всей вероятности, возникают между микрофибриллами целлюлозы в виде расслоений. Это, по нашему мнению, говорит о внутренней фибрилляции, снижающей жесткость древесных частиц. Объем таких пор в готовой плите снижается в 2–3 раза, приближаясь к значениям древесной массы, полученной из древесины, не подвергавшейся термообработке.

Предварительная термическая обработка также способствует увеличению, в процессе гидродинамической обработки, количества мезопор (размером 2–50 нм). О чем свидетельствует увеличение адсорбционной активности по метиленовому голубому. Увеличение мезопор, по нашему мнению, является следствием внешней фибрилляции древесных частиц, что увеличивает площадь доступных межфазных поверхностей. Это создает предпосылки для увеличения прочности готовых плит. В готовой плите количество таких пор снижается значительно. Это говорит о том, что в процессе структурообразования происходят межфазные взаимодействия между древесными частицами и образуются, по всей вероятности, физические и физико-химические связи.

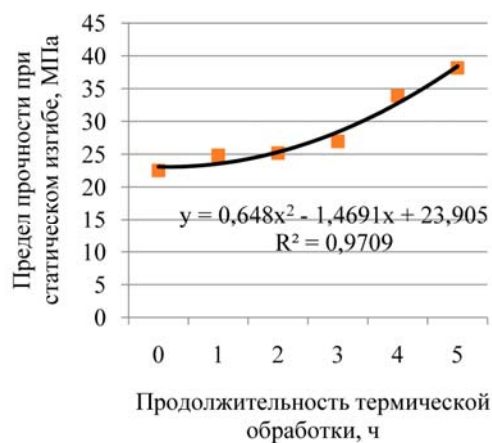
Результаты исследований механических свойств древесных плит без связующих, в зависимости от продолжительности предварительной термической обработки, представлены на рис. 1–2.

Таблица 1
Потеря массы опилок при термической обработке

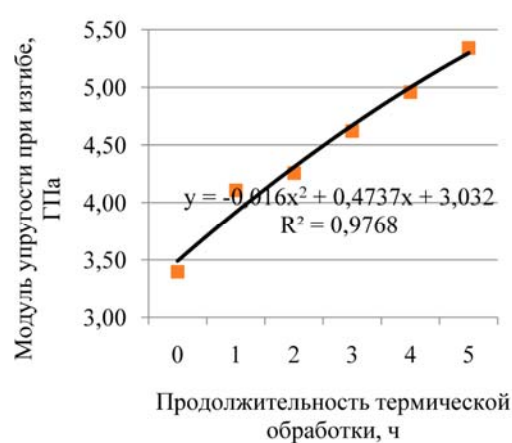
Продолжительность обработки, ч	1	2	3	4	5
Потеря массы, %	4,14	4,84	5,35	6,07	7,02

Таблица 2
Структурные характеристики древесной массы и плит

Образец	Адсорбционная активность по метиленовому голубому мг/г	Адсорбционная активность по йоду мг/г
Активированная древесная масса, без предварительной термообработки	311,17	56,8
Активированная древесная масса, с потерей массы при термообработке 5,35 %	354,52	75,01
Активированная древесная масса, с потерей массы при термообработке 6,07 %	414,71	90,62
Активированная древесная масса, с потерей массы при термообработке 7,02 %	539,43	95,29
Древесная плита плотностью 950 кг/м ³	356,2	29,38



а

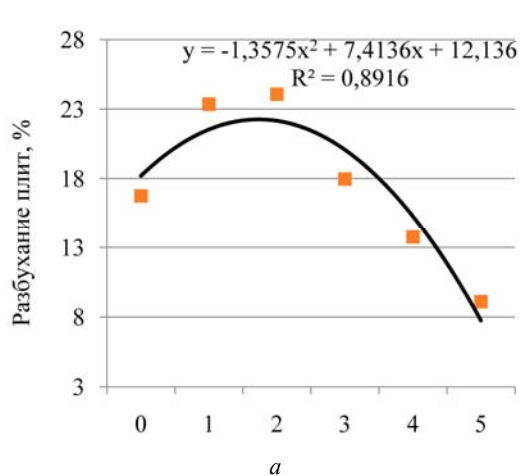


б

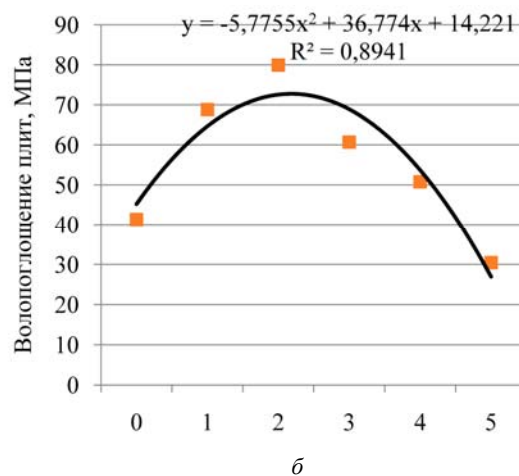
Рис. 1. Механические свойства плит:

а – зависимость предела прочности при статическом изгибе от продолжительности термообработки;

б – зависимость модуля упругости от продолжительности термообработки



а



б

Рис. 2. Физические свойства плит:

а – зависимость разбухания плит от продолжительности термообработки; б – водопоглощения от продолжительности термообработки

Полученные результаты указывают на то, что предварительное термическое воздействие на опилки перед их гидродинамической обработкой оказывает существенное влияние на механические свойства плит без связующих (рис. 1). С увеличением продолжительности термической обработки предел прочности плит при статическом изгибе увеличивается на 72 %. Полученные значения прочности 38,18 МПа при продолжительности 5 часов (рис. 1, а) соответствуют требованиям предъявляемыми ГОСТ 4598–2018 для твердых плит марки ТС. Также наблюдается линейное увеличение модуля упругости плит (рис. 1, б). Полученные значения 5000 МПа, в 2,5 раза выше в сравнении с требованиями, предъявляемыми ГОСТ 32274–2013 для волокнистых плит сухого способа.

Такое существенное увеличение механических свойств, вероятно, обусловлено следующим. В процессе термической обработки в клеточных стенках древесины, как было отмечено выше, образуются микропоры, что снижает их прочность. При гидродинамических воздействиях это способствует развитию трещин и расслоению микроструктурных элементов – фибриллированию. Вследствие этого увеличивается площадь доступных межфазных поверхностей, которые, в процессе прессования, способны образовать межмолекулярные связи между соседними частицами. В результате увеличивается прочность плит.

Результаты исследований влияния термической обработки на разбухание по толщине, а также водопоглощение плит представлены на рис. 2. Как следует из полученных данных, термическая обработка в течение 2 часов приводит к увеличению этих показателей. При увеличении продолжительности обработки наблюдается существенное снижение этих показателей. При продолжительности 4 часа величина разбухания составляет 11 %, что почти в 2 раза меньше, чем допускается ГОСТ 4598–2018 для ДВП.

Следует отметить ряд особенностей таких плит. При высушивании разбухших плит, в отличие от всех других, их размеры почти возвращаются к первоначальному. Остаточное набухание составляет порядка 1–2 %. При этом сохраняется не менее 80 % от первоначальной прочности. Это говорит о высокой водостойкости этих плит.

ВЫВОДЫ

1. Термическая обработка древесины перед ее гидродинамической обработкой позволяет значительно улучшить механические и физические свойства плит без связующих.

2. В гидродинамически активированной массе, полученной из предварительно термомодифицированных древесных частиц, значительно увеличивается количество микропор (размером до 2 нм) и мезопор (размером 2–50 нм). В готовых плитах, в процессе их структурообразования, количество таких пор уменьшается, приближаясь к показателям массы из не модифицированной древесины.

3. Плиты, изготовленные из термически обработанных опилок с последующей гидродинамической обработкой, без использования связующих, по физи-

ко-механическим свойствам не уступают или даже превосходят традиционные волокнистые плиты (ДВП, MDF), которые получают из кондиционного сырья с применением синтетических адгезивов.

4. Плиты без связующих веществ, изготовленные из термически обработанных древесных опилок могут использоваться как конструкционные. Кроме того, их можно использовать в условиях с повышенной влажностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lester T. W., Little M., Jolley G. J. Assessing the economic impact of alternative biomass uses: biofuels, wood pellets, and energy production // *Journal of Regional Analysis & Policy*. 2015. Т. 45, № 1. С. 36–46.
2. Razinkov E. M., Savinkov M. A., Litvinova Y. A. Chipboards as raw material of furniture // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021. Т. 875. № 1. С. 012041.
3. Pradyawong Sarocha & Brown Nataniel & Zhao Jikai & Qi Guangyang & Zheng Yi & Sun, Susan & Wang Donghai. (2022). Improved soy protein adhesives by lignin and polyamide-epichlorohydrin: Adhesion performance and properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 139.10.1002/app.53086.
4. Леонович А. А. Технология древесных плит: прогрессивные решения. 2005.
5. Petr Pařil & Baar Jan & Rousek Radim. (2023). Innovative, Low-cost and Eco Composite Boards Produced From High-energy Milled Wood, Plastic Waste and Bio-polymer. 10.21203/rs.3.rs-2664772/v1.
6. Катраков И. Б., Маркин В. И., Базарнова Н. Г. Получение пресс-масс и плитных материалов на основе кавитированного растительного сырья // *Известия АлтГУ*. 3-1(83). 2014. С. 204–208.
7. Болтовский В. С. Применение метода автогидролиза-взрыва при переработке растительной биомассы // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2021. № 2 (247). С. 5–12.
8. Изменение химического состава древесины при механохимической обработке / И. В. Микушина [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2002. Т. 10. № 4. С. 443–447.
9. Ермолин В. Н. и др. Водостойкость древесных плит, получаемых без использования связующих веществ // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2020. № 3 (375). С. 151–158.
10. Kocaefe D., Poncsak S., Boluk Y. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen // *BioResources*. 2008. Т. 3, № 2. С. 517–537.
11. Wang D., Fu F., Lin L. Molecular-level characterization of changes in the mechanical properties of wood in response to thermal treatment // *Cellulose*. 2022. Т. 29, № 6. С. 3131–3142.
12. Fengel D., Wegener G. (1984) *Wood – chemistry, ultrastructure, reactions*, Berlin and New York, 613 p.
13. Криворотова А. И., Орлов А. А. Исследование свойств клееных материалов на основе термически модифицированного шпона // *Хвойные бореальной зоны*. 2018. Т. 36, № 6. С. 548–554.

14. Дубинин М. М. Новое в области физической адсорбции паров микропорами адсорбентов // Журнал физической химии. 1987. № 5. С. 1301–1305.

15. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М. : Химия, 1976. 512 с.

16. ГОСТ 32274–2013. Плиты древесные моноструктурные. Технические условия. Введ. 01.07.2014. М. : Стандартиформ, 2014. 12 с.

17. ГОСТ 4598–2018. Плиты древесно-волоконистые. Технические условия. Введ. 01.04.2019. М. : Стандартиформ, 2019. 16 с.

REFERENCES

1. Lester T. W., Little M., Jolley G. J. Assessing the economic impact of alternative biomass uses: biofuels, wood pellets, and energy production // Journal of Regional Analysis & Policy. 2015. T. 45. № 1. C. 36–46.

2. Razinkov E. M., Savinkov M. A., Litvinova Y. A. Chipboards as raw material of furniture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021. T. 875. № 1. C. 012041.

3. Pradyawong, Sarocha & Brown, Nataniel & Zhao, Jikai & Qi, Guangyang & Zheng, Yi & Sun, Susan & Wang, Donghai. (2022). Improved soy protein adhesives by lignin and polyamide-epichlorohydrin: Adhesion performance and properties. Journal of Applied Polymer Science. 139. 10.1002/app.53086.

4. Leonovich A. A. Technology of wood boards: progressive solutions. 2005.

5. Petr, Pařil & Baar, Jan & Rousek, Radim. (2023). Innovative, Low-cost and Eco Composite Boards Produced From High-energy Milled Wood, Plastic Waste and Bio-polymer. 10.21203/rs.3.rs-2664772/v1.

6. Katrakov I. B., Markin V. I., Bazarnova N. G. Preparation of press-mass and plate materials based on cavitated vegetable raw materials // Proceedings of Altai State University. 3-1(83). 2014. C. 204–208.

7. Boltovsky V. C. Application of the method of autohydrolysis-burst in the processing of plant biomass //

Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technology, Biotechnology, Geoecology. 2021. № 2 (247). C. 5–12.

8. Changes in the chemical composition of wood during mechanochemical treatment / I. V. Mikushina [et al.] // Chemistry for sustainable development. 2002. T. 10. № 4. C. 443–447.

9. Ermolin V. N. et al. Water resistance of wood boards produced without the use of binders // Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovatel'nykh izuchenii [The Water Resistance of Wood Slabs Obtained without the Use of Binders]. Forestry Journal. 2020. № 3 (375). C. 151–158.

10. Kocaefe D., Poncsak S., Boluk Y. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen // BioResources. 2008. T. 3. № 2. C. 517–537.

11. Wang D., Fu F., Lin L. Molecular-level characterization of changes in the mechanical properties of wood in response to thermal treatment // Cellulose. 2022. T. 29. № 6. C. 3131–3142.

12. Fengel, D., Wegener, G. (1984), Wood – chemistry, ultrastructure, reactions, Berlin and New York, 613 p.

13. Krivorotova A. I., Orlov A. A. STUDY of properties of glued materials on the basis of thermally modified sponge // Conifers of the boreal zone. 2018. T. 36. № 6. C. 548–554.

14. Dubinin M. M. New in Physical Vapor Adsorption by Adsorbent Micropores // Journal of Physical Chemistry. 1987. № 5. C. 1301–1305.

15. Keltsev N. V. Fundamentals of Adsorption Technology. Moscow : Chemistry, 1976. 512 с.

16. GOST 32274–2013. Wood monostructured boards. Technical conditions. Introduced on 01.07.2014. М. : Standardinform, 2014. 12 p.

17. GOST 4598–2018. Wood-fiber plates. Technical conditions. Introduced on 01.04.2019. М. : Standardinform, 2019. 16 p.

© Ермолин В. Н., Баяндин М. А.,
Намятов А. В., Баяндина М. М., 2023

Поступила в редакцию 10.07.2023
Принята к печати 02.10.2023

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ПОЧВЫ ОТВАЛЬНОЙ ВСПАШКОЙ ПРИ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИИ

С. Н. Долматов, П. Г. Колесников

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: pipinaskus@mail.ru

Россия обладает значительными запасами лесов. В процессе их промышленного освоения возникает необходимость проведения лесовосстановительных работ. Необходимые объемы работ весьма значительны и достигают величин до 1 млн га в год. основополагающим критерием, определяющим темпы и качество лесовосстановления, является качество и технология подготовки почвы. Традиционно в нашей стране эти вопросы решались способом отвальной вспашки. На сегодняшний момент времени эти технологии серьезно устарели и не позволяют существенно повысить производительности работ из-за высокой энергоемкости процесса.

В исследовании проведено определение затрат мощности при минерализации почвы путем отвальной вспашки плугом ПКЛ-70 в условиях «чистой» почвы, а также при движении по лесосеке, где встречаются помехи в виде корней, кустарника, мелких деревьев. Установлено, что тракторы МТЗ-82, ТЛТ-100 обеспечивают обработку «чистой» почвы во всем диапазоне скоростей движения. Трактор ТЛТ-100 при движении с плугом ПКЛ-70 в условиях лесосеки с одновременным срезанием кустарника и мелкоколесья, позволяет обеспечить обработку со скоростью движения до 0,5 м/с. При этом производительность обработки составляет до 2 га в смену. Трактор МТЗ-82 в таких же условиях может работать только на 1 передаче КПП с производительностью не более 1,5 га в смену. Для обеспечения роста сменной выработки до показателей 3,5–4 га в смену необходима мощность тягового средства не менее 95–110 кВт. Тракторы МТЗ-82, ТЛТ-100 не могут обеспечить весомый рост производительности на осуществлении работ по минерализации почвы, поскольку имеют мощность двигателя меньшую, чем требуемая. Выходом из сложившейся ситуации может стать переход от технологии отвальной вспашки к фрезерованию или полосовой обработки.

Ключевые слова: лесовосстановление, лесной плуг, трактор, мощность, производительность.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 431–439

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF SOIL PREPARATION BY SLOW POWING DURING FOREST REFORESTATION

S. N. Dolmatov, P. G. Kolesnikov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: pipinaskus@mail.ru

Russia has significant forest reserves. In the process of their industrial development, there is a need for reforestation. The required volume of work is very significant and reaches up to 1 million hectares per year. The fundamental criterion that determines the pace and quality of reforestation is the quality and technology of soil preparation. Traditionally in our country, these issues were resolved by the method of moldboard plowing. To date, these technologies are seriously outdated and do not allow a significant increase in work productivity due to the high energy intensity of the process.

In the study, the power consumption was determined during soil mineralization by moldboard plowing with a PKL-70 plow in conditions of “clean” soil, as well as when driving through a cutting area, where there are interferences in the form of roots, shrubs, and small trees. It has been established that the tractors MTZ-82, TLT-100 ensure the processing of “clean” soil in the entire range of speeds. The TLT-100 tractor, when moving with a PKL-70 plow in a cutting area with simultaneous cutting of shrubs and small forests, allows processing at a speed of up to 0.5 m/s. At the same time, the processing capacity is up to 2 hectares per shift. The MTZ-82 tractor under the same conditions can only work in 1 gear of the gearbox with a productivity of not more than 1.5 hectares per shift. To ensure the growth of shift production up to 3.5–4 ha per shift, the power of the traction means is not less than 95–110 kW. Tractors MTZ-82, TLT-100 cannot provide a significant increase in productivity in the implementation of soil mineralization, since they have an engine power that is less than required. The way out of this situation may be the transition from the technology of mouldboard plowing to milling or strip processing.

Keywords: reforestation, forest plow, tractor, power, productivity.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации для всестороннего развития лесного комплекса страны требуется коренной пересмотр объема и технологий лесовосстановления. Каждый год площадь лесных массивов России сокращается в результате сплошных рубок на 1,1 млн га. Кроме того, в лесных пожарах гибнет не менее 0,2 млн га, т. е. суммарные потери площади лесных земель не менее 1,3 млн га. При этом ежегодные объемы лесовосстановления на сегодня стабилизировались на уровне 800–900 тыс. гектаров. Результаты контрольных мероприятий показывают, что площади выбытия лесного фонда превышают площади лесовосстановления [1; 2]. Соотношение выбытия лесных площадей и площадей лесовосстановления за период 2015–2020 год составляет 74 %.

Из-за несоблюдения агротехники выращивания созданных лесных культур отмечается их высокая гибель в период до перевода в покрытую лесом площадь. Потребность созданных лесных культур в агротехнических уходах удовлетворяется только наполовину. Преобладающим способом лесовосстановления является содействие естественному восстановлению. Искусственно создаваемые лесные насаждения требуют агротехнических уходов. При этом потребность в агротехнических уходах удовлетворяется только на 60%. Из-за несоблюдения агротехники выращивания созданных лесных культур отмечается их гибель в период до перевода в покрытую лесом площадь [2].

Проекты по восстановлению лесов становятся все более распространенными не только в России, но и во всем мире. Как правило, лесовосстановление реализуется путем посадки саженцев хозяйственно-ценных пород деревьев. Высокая конкуренция со стороны травянистой растительности, засуха или наоборот чрезмерное увлажнение могут снижать результативность лесовосстановления, поэтому применение технологий подготовки почвы с применением различной техники является перспективным инструментом, повышающим результативность работ по лесовосстановлению. Традиционные технологии вспашки и рыхления получили широкое распространение еще с 1970-х годов прошлого века, попытки применения гербицидов для выборочного угнетения определенных видов растений не получило распространения. Из-за негативных экологических последствий, возникающих после операций, вызванных обработкой гербицидами на больших площадях, методы химической обработки не получили признания. Использование химических препаратов в России и за ее пределами для обработки лесных массивов в целях содействия лесовосстановлению носит очаговый характер, системы сертификации не поощряют их использование, и поэтому настоящее время основой технологии является механическая обработка почвы. Недостаточная обработка почвы – это одна из тех значительных проблем, причиной которых является отчасти отсутствие подходящей техники и отчасти недостаточное финансирование. Поэтому работы в области совершенствования технологии подготовки почвы для лесовосстановления актуальны.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Преобладающая часть лесов России произрастает на подверженных сильному задернению почвах, где мероприятия по лесовосстановлению не приносят успеха без эффективной подготовки [3]. Установлено, что борьба с травянистыми сорняками на ранней стадии укоренения, имеет решающее значение для ускорения роста сеянцев хозяйственно ценных пород [4]. Подготовительная обработка участков лесовосстановления путем минерализации почвы, создания микроповышений изменяет влажностно-температурный режим почвы. Основная задача такой подготовки – либо удаление избытка воды, либо экономия существующих водных запасов, снижение расхода за счет уничтожения или угнетения конкурирующей травянистой растительности [5].

Конкурирующие технологии механической обработки почвы в процессе подготовки к лесовосстановлению, можно классифицировать по наличию привода рабочего органа. Технологии, для которых характерно использование не приводного рабочего органа, когда процесс минерализации осуществляется за счет тягового усилия трактора. По этому принципу работают скарификаторы, катки и плуги.

Скарификация почвы включает удаление поверхностных органических слоев (гумус, трава и/или растительность) для обнажения и разрыхлить минеральную почву. Эта обработка создает плоскую минерализованную поверхность. Скарификация чаще используется на участках, смежных с лесными массивами. Когда достаточным условием лесовосстановления считается минерализация почвы для успешного обсеменения деревьями, смежными с территорией вырубki. Скарификация достаточно эффективна в случае работы на территориях, не имеющих сплошного слоя лесосечных отходов и низкокачественной древесины [6]. Измельчение ребристыми катками заключается в протягивании по лесосеке одного или двух цилиндрических металлических барабанов, обычно заполненных водой тягачом (обычно скиддером или бульдозером). Двигаясь по грунту, каток давит и измельчает нежелательную растительность, кустарники и перемалывает отходы лесозаготовок. Это необходимо для облегчения доступа семян к минеральному горизонту и для снижения вегетативной конкуренции. Однако измельчение часто не дает приемлемых результатов, поскольку примятая и срезанная растительность быстро прорастает.

Обработка плугами предусматривает формирование минерализованной полосы путем отвальной вспашки, чаще всего клиновидным двухотвальным плугом (рис. 1).

При прокладывании минерализованной полосы, создаются непрерывные или прерывистые борозды или траншеи. Во время этой обработки органический слой и некоторые нижележащие минеральные вещества удаляются и откладываются в борозды рядом с получившейся траншеей, предлагая значительную минерализованную зону, пригодную для посадки семян, сеянцев или саженцев. Слои находятся в грубо перемешанном состоянии на нетронутой лесной подстилке рядом с минерализованной полосой.

Таблица 1
Показатели эффективности обработки почвы

Показатель	Bracke Badger (3 мотыги колеса шаг 1,0 м)	Дисковая машина Bracke TTS Delta (приводной)	Дисковая ма- шина Bracke TTC-35	Дисковая машина Donaren 180	Плуг Heppner
Число посадочных места всего на 1 га, шт.	1560	1295	1725	1800	1270
В том числе в минераль- ном слое/ гумусном	1190/370	970/325	1585/140	1260/90	170/150
% борозд с минерализа- цией	30	32	32	28	19
% борозд, непригодных (камни или вода)	15	0	0	41	4
Испорчено посадочных мест, %	32	26	20	25	29
Площадка засыпана отхо- дами, %	26,9	8,9	1,7	7	10,1
Площадка засыпана кам- нями, %	8,4	0	1,2	28	3,2
Менее 10 см слой минера- лизации, %	0	0	0,4	0	0
Мощность, кВт/тип тягача	136/ скиддер	123/ скиддер	107/ скиддер	170/ скиддер	160/ бульдо- зер



Рис. 1. Трактор МТЗ-82 с плугом ПКЛ-70
(опахивание границ лесосеки мин-полосой)

Дисковые траншеекопатели имеют пассивный или принудительный привод фрез и используют вращающиеся диски, чтобы произвести две расположенные параллельно борозды. Фрезы, в процессе своей работы, смешивают почву и гумус в субстанцию, обеспечивающую быстрый рост и развитие посадочного материала, в то же время, создавая микрорельеф, необходимый для успешного укоренения рассады. Установлено, что форма, размеры дискового рыхлителя оказывает существенное влияние на тяговое сопротивление. Например, с тракторами тягового класса 14 кН можно успешно применять не только однодисковый активный рыхлитель, но и пассивный двухдисковый вариант при легких почвенных условиях. Инструменты с дисковыми рабочими органами снижают время подготовки почвы, делают возможным работы на неподготовленных площадках с местными неровностями [7].

В исследовании [8; 9] были проанализированы результаты проведения работ по лесовосстановлению в Онтарио Канада. Исследовались следующие орудия подготовки площадки: отвальный плуг Heppner, три варианта фрезерных машин (Bracke TTS Delta, Bracke

TTS-35, Donaren 180), колесно-мотыжная система Bracke Badger.

В работе [10] установлено, что подготовка почвы в виде борозд клиновидного типа позволяет получить более устойчивую картину лесовосстановления, по сравнению с прочими технологиями подготовки почвы.

Таким образом, исследования в области приоритетности обработки вспашкой или фрезерованием дают далеко не однозначный вариант. При несколько более высоком качестве подготовки минерализованной полосы фрезерованием, по сравнению с технологией вспашки, агрегаты с фрезерным рабочим органом весьма дорогостоящи, имеют сложную конструкцию. Общей проблемой при формировании минерализованных полос плугами и фрезами является время, необходимое для того, чтобы сформированная борозда закрылась и перестала выделяться. Может пройти длительное время для выравнивания борозд значительного сечения. При этом, существует риск, как переувлажнения дна борозды, так и риск эрозии и выветривания.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: Совершенствование технологии подготовки почвы при лесовосстановлении при обосновании энергоемкости процесса.

Задачи:

1. Определить необходимую мощность тягового средства при работе на лесосеке по технологии отвальной вспашкой лесными плугами.
2. Оценить тяговые возможности серийных лесных тракторов в плане обеспечения повышения производительности обработки лесной почвы при лесовосстановлении.

На вырубках с количеством пней 600–800 шт./га, средней высотой – 25–30 см, наличием лесосечных отходов и валежника – 50–70 м³/га наиболее широко применяемый в лесном хозяйстве плуг ПКЛ-70 обеспечивает нормальную обработку почвы не более чем на 40 % протяженности борозды [11].

Это в целом соответствует показателям более современных машин дискового типа (табл. 1 [9]), для которых величина протяженности непрерывной минерализованной борозды составляет 28–32 %. Для качественного проведения лесовосстановительных работ желательна раскорчевка предполагаемой территории. Корчевка пней – это чрезвычайно длительный, энергоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому при малейшей возможности избежать ее, лесозаготовители непременно прибегают к этой практике. В Сибири, где лесосеки имеют сравнительно небольшое число пней на 1 га площади, как правило, корчевка не производится. Технология очистки заключается в уборке валежника, крупных порубочных остатков. В этих условиях можно с успехом применять простые по конструкции и доступные лесные плуги.

В настоящее время в России самое широкое распространение получили лесные плуги ПКЛ-70 (рис. 2). Лесной двухотвальный плуг состоит из рамы, лемехов, отвалов. Детали соединены при помощи сварки и болтовых соединений. В целом это простая, надежная и ремонтпригодная конструкция.

При положительных качествах перечисленных орудий, они имеют и ряд серьезных недостатков. Применение отвальной вспашки, принятой по аналогии с технологиями вспашки в сельском хозяйстве, не учитывает фактор наличия корней, небольших пней, порубочных остатков, взаимодействовать с которыми плугу приходится в процессе обработки почвы. При этом существенно возрастает необходимая мощность тягового средства, а при ее лимитировании неизбежно снижается скорость обработки. Конечным итогом является снижение производительности и рост затрат топлива на обработку единицы площади. Конструкция отвальных плугов серии ПКЛ-70 была разработана в 1960-х годах. В тот период вопросы снижения энергоёмкости процесса, уменьшения расхода топлива не имели решающего значения. На первое место была поставлена возможность серийного крупномас-

штабного производства таких плугов с учетом скромных возможностей существующего станочного парка и квалификации как производителей, так и эксплуатантов оборудования.



Рис. 2. Плуг ПКЛ-70

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведем расчет действующих усилий при работе классического клинового плуга, типа ПКЛ-70, применяемого на расчистке лесосек при лесосозобновлении. Двухотвальный лесной плуг ПКЛ-70 предназначен для подготовки почвы бороздами на нераскорчеванных вырубках под посев или посадку лесных культур, а также для прокладки противопожарных полос. Агрегируется с тракторами: ЛХТ-55, МТЗ-80/82, ДТ-75, ЛХТ-100. Параметры агрегата приведены в табл. 2.

Таблица 2
Основные параметры орудия

Наименование параметра	Значение
Масса плуга, кг	500
Габаритные размеры, мм	2200/1770/1650
Ширина захвата, м	1,2
Глубина борозды, м	до 0,6...0,8
Угол между лемехом и горизонтальной плоскостью, град.	0°
Угол заострения лемеха, град.	30°
Угол установки лемеха в вертикальной плоскости, град.	40
Диаметр перерезаемых корней и деревьев, м	до 0,1
Скорость обработки, V_d , м/с	0,26 – 1 передача КПП
Приведенная сила сцепления, c_0 , Н/м ²	15000
Площадь поперечного сечения расчищаемой трассы, S , м ²	0,5–0,85
Удельный вес, γ_g , Н/м ³	6000
Высота призмы волочения (кавальера), h_k , м	0,6
Угол наклона откоса кавальера к горизонту, α_k , град	40°
Коэффициент разрыхления, f_p	0,8
Коэффициент внешнего трения f_c	0,6
Угол внешнего трения, φ_c	31°
Коэффициент внутреннего трения, f_g	0,1
Угол внутреннего трения, φ_g	9°

Расчёт усилий, действующих на рабочие органы (отвалы) плуга производится для определения реакций, действующих на плуг при расчистке лесопосадочной борозды от древесной растительности, расчётов тягового усилия, необходимого для выполнения технологического процесса расчистки. Двухотвальный лесной плуг и векторы действующих сил изображены на рис. 3.

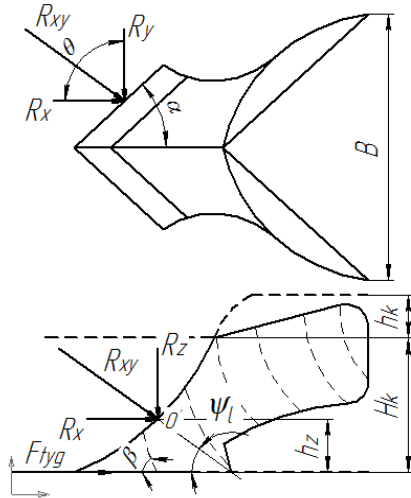


Рис. 3. Схема работы двухотвального плуга ПКЛ-70

Поскольку основные силовые элементы симметричны относительно продольно-вертикальной плоскости агрегата, составляющие реакций, перпендикулярные оси борозды взаимно уравновешиваются, и при рассмотрении суммарных реакций, действующих на плуг, можно считать, что они расположены в плоскости движения. Горизонтальная $R_{\text{сумм}}$ составляющие суммарной реакции (кН) определится согласно формуле

$$R_{\text{сумм}} = \sqrt{(\sum R_x)^2 + (\sum R_z)^2}, \quad (1)$$

где R_x и R_z — горизонтальная и вертикальная составляющие реакции на нижнюю часть рабочего органа, Н.

Составляющие реакции R_x и R_z , Н, определяются по следующим выражениям:

$$R_{x1} = c \cdot S \cdot B_1 \cdot B_2 + \gamma_g \cdot S \cdot h_k \cdot B_1 \cdot B_3, \quad (2)$$

$$R_{z1} = c_0 \cdot S \cdot B_2 \cdot B_4 + \gamma_g \cdot S \cdot h_k \cdot B_3 \cdot B_4, \quad (3)$$

$$B_1 = \frac{2 \cdot \cos \varphi}{\cos \left[0,5 (\psi_{lu} + \varphi_g) \right]} \times \frac{2 \cdot \cos \varphi}{\left[\sin \varphi_l \cdot \sin \alpha_l + \operatorname{tg} \varphi_c \times \sqrt{1 - \sin^2 \psi_l \sin^2 \xi} \cdot (1 + \cos^2 \alpha_l) \operatorname{tg}^2 (\psi_l + \varphi_c + \varphi_g) 0,5 \right]}, \quad (4)$$

$$B_2 = \frac{\cos \varphi_g}{\left\{ \sin \alpha_{lu} \cdot \cos \left[0,5 \cdot (\psi_{lu} + \varphi_g) \right] \right\}}, \quad (5)$$

$$B_3 = \frac{\operatorname{ctg} \xi}{(2 \sin \alpha_l \cdot \cos \psi_l)}, \quad (6)$$

$$B_4 = 2 \cos \varphi \left\{ \cos \left[0,5 (\psi_{lu} + \varphi_g) \right] \right\}^{-1} \times (\cos \psi_l - \operatorname{tg} \varphi_c \cdot \sin \psi_l \cdot \sin \xi), \quad (7)$$

где c_0 — приведенная сила сцепления, Н/м²; $c_0 = 15000$ Н/м²; S — площадь поперечного сечения расчищаемой трассы, м²; γ_g — удельный вес, Н/м³; $\gamma_g = 6000$ Н/м³; h_k — высота призмы волочения (кавалера), м; H_k, b_d — глубина и ширина расчищаемой трассы, м; α_k — угол наклона откоса кавальера к горизонту, град, $\alpha_k = 40^\circ$; f_p — коэффициент разрыхления, 0,8; φ_c, φ_g — соответственно углы внешнего и внутреннего трения; $\varphi_c = \operatorname{arctg} f_c, \varphi_g = \operatorname{arctg} f_g, f_c = 0,6, f_g = 0,1$; ψ_l и α_l — углы резания и захвата лемеха (30° и 40° соответственно); ξ — угол между относительной траекторией движения по лемеху и его лезвием, $\xi = \alpha_l$; α_{lu}, ψ_{lu} — соответственно углы установки идеального клина, град.

B_1, B_2, B_3, B_4 — коэффициенты перехода от реального к идеальному клину

$$\psi_{lu} = \arccos \times$$

$$\times \left[\left[F \pm \cos \beta' \cdot \sqrt{\cos^2 \beta' + \cos^2 \psi_l \cdot \cos^2 (\beta + \varphi_c) - F^2} \right] \right] \times (\cos^2 \beta' + \cos^2 \psi_l)^{-1}, \quad (8)$$

$$\cos (\alpha_{lu} - \alpha_l) =$$

$$= (\cos \varphi_c - \cos \psi_l \cos \psi_{lu}) \cdot (\sin \psi_l \cdot \sin \psi_{lu})^{-1}, \quad (9)$$

$$F = [\cos \varphi_c - \sin (\beta + \varphi_c) \cdot \sin \psi_l \sin \beta'] \cdot \cos \psi_l, \quad (10)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \psi_l \cdot \sin \xi), \quad (11)$$

$$\beta' = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \xi \cdot \cos^{-1} \psi_l), \quad (12)$$

Угол наклона (град) равнодействующей $R_{\text{сумм}}$ реакции:

$$\theta_R = \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{\sum R_{x1}}{\sum R_{z1}} \right), \quad (13)$$

Вертикальная координата, м точки О' приложения реакции $h_z = (0,4 \dots 0,5) H_k$. Подставив численные значения в приведённые выше формулы, определим сопротивление движению плуга

$$F = [\cos 9^\circ - \sin (20^\circ + 9^\circ) \cdot \sin 30^\circ \cdot \sin 41^\circ] \cdot \cos 30^\circ = 0,72,$$

$$\psi_{lu} = \arccos \times$$

$$\times \left[\left[0,72 \pm \cos 41^\circ \times \sqrt{\cos^2 41^\circ + \cos^2 30^\circ \cdot \cos^2 (20^\circ + 9^\circ) - 0,72^2} \right] \right] \times (\cos^2 41^\circ + \cos^2 30^\circ)^{-1} = 37^\circ,$$

$$B_1 = \frac{2 \cdot \cos 9^\circ}{\cos[0,5(45^\circ + 31^\circ)]} \times$$

$$\times \left[\frac{2 \cdot \cos 9^\circ}{\sin 30^\circ \cdot \sin 41^\circ + \operatorname{tg} 9^\circ \times} \right] = 0,13,$$

$$\times \left[\sqrt{1 - \sin^2 30^\circ \cdot \sin^2 40^\circ \times} \right]$$

$$\times \left[\sqrt{(1 + \cos^2 30^\circ) \operatorname{tg}^2 (30^\circ + 9^\circ + 31^\circ) 0,5} \right]$$

$$B_2 = \frac{\cos 31^\circ}{\{\sin 40^\circ \cdot \cos[0,5(37^\circ + 31^\circ)]\}} = 1,67,$$

$$B_3 = \frac{\operatorname{ctg} 40^\circ}{(2 \sin 40^\circ \cdot \cos 30^\circ)} = 1,07,$$

$$B_4 = 2 \cos 31^\circ \cdot \{\cos[0,5(30^\circ + 31^\circ)]\}^{-1} \times$$

$$\times (\cos 30^\circ - \operatorname{tg} 31^\circ \cdot \sin 30^\circ \cdot \sin 40^\circ) = 0,37,$$

$$\beta = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} 30^\circ \cdot \sin 40^\circ) = 20^\circ,$$

$$\beta' = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} 40^\circ \cdot \cos^{-1} 30^\circ) = 41^\circ.$$

Вертикальная координата, м точки О' приложения реакции $h_z = (0,4 \dots 0,5) H_k$.

$$R_{x1} = 15000 \cdot 2 \cdot 0,13 \cdot 1,67 +$$

$$+ 6000 \cdot 0,85 \cdot 0,6 \cdot 0,13 \cdot 1,07 = 6938 \text{ Н},$$

$$R_{z1} = 15000 \cdot 2 \cdot 1,67 \cdot 0,37 +$$

$$+ 6000 \cdot 0,85 \cdot 0,6 \cdot 1,07 \cdot 0,37 = 3064 \text{ Н},$$

$$R_{\text{сумм}} = \sqrt{6938^2 + 3064^2} = 7584 \text{ Н} \approx 7,6 \text{ кН}.$$

Для расчётов агрегата с плугом определим его тяговое сопротивление F_{tk} и вертикальную составляющую F_{vk} сил, действующих на металлоконструкцию. Искомое найдем по формулам

$$F_{tk} = 2 \cdot R_{x1} \cdot \sin \alpha, \quad (14)$$

где α – угол отклонения силы сопротивления от продольной оси, град. $\alpha = 40^\circ$.

$$F_{vk} = 2 \cdot R_{z1}, \quad (15)$$

$$F_{tk} = 2 \cdot 6938 \cdot 0,6428 = 8908 \text{ Н} = 8,9 \text{ кН},$$

$$F_{vk} = 2 \cdot 3064 = 6128 \text{ Н} = 6,1 \text{ кН}.$$

Тяговое сопротивление плуга F_{tyg} складывается из сил сопротивления и трения о грунт. Из массы плуга 500 кг и вертикальной составляющей сил резания 21,3 кН определится по выражению

$$F_{tyg} = F_v \cdot f_{tr}, \quad (16)$$

$$F_{tyg} = (500 \cdot 9,81 + 3064) \cdot 0,5 = 3984,5 = 3,98 \text{ кН}.$$

Затраты мощности N_{dv} на обработку почвы при принятой скорости движения V_d , определяются по формуле

$$N_{dv} = \frac{(F' + G_m \cdot f_k) \cdot V}{\eta_x} \text{ кВт}, \quad (17)$$

где F' – суммарное тяговое сопротивление клина; $F' = F_{tyg} + F_{tk}$, кН; G_m – сила веса трактора, кН, для МТЗ-82 41 кН; η_x – коэффициент полезного действия механизмов ходовой части, $\eta_x = 0,8$; V – скорость движения, м/с; f_k – коэффициент сопротивления качению колес.

Подставив численные значения, определим затраты мощности на передвижение агрегата

Для скорости 2,5 км/ч = 0,7 м/с (первая передача КПП МТЗ-82)

$$N_{dv \text{ 1 передача}} = \frac{(3,98 + 8,9 + 41 \cdot 0,2) \cdot 0,7}{0,80} = 18,3 \text{ кВт}.$$

Аналогично проведем расчет для 2,3 передачи КПП.

Территория лесосек после вырубki представляют собой местность, на которой после лесозаготовок остается до 40 % фитомассы в виде находящихся на поверхности или вдавленных в почву порубочных остатков, пней и их корней, оставшихся отдельных деревьев [11]. Поэтому, при работе трактора с плугом на формировании лесопосадочных полос на лесосеках в процессе лесовосстановления, будут иметь место случаи упора лемехом и перерезание мелких деревьев, кустарника, корней. В этом случае сопротивление плуга R , кН определится по выражению:

$$R_g = G_o \cdot ((f_{tr} + \sin \alpha) + m \cdot n \cdot (\pi d^2 / 4) \cdot k_p), \quad (18)$$

где G_o – сила веса плуга, Н; f_{tr} – коэффициент трения; α – уклон местности, град; m – коэффициент, учитывающий срезание нескольких корней или пней, $m = 0,7$; n – число одновременно срезаемых деревьев, $n = 2$; d – диаметр срезаемых деревьев и корней, м., принимаем $d = 0,05$ м; k_p – предел прочности древесины при перерезании, $k_p = 15$ МПа.

Подставив численные значения, получим:

$$R_g = 500 \cdot 9,81 \cdot (0,5 + \sin 15^\circ) +$$

$$+ 0,7 \cdot 2 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \right) \cdot 15 \cdot 10^6 = 44934 \text{ Н} = 44,9 \text{ кН},$$

При подготовке лесополосы в условиях мелколеся диаметром до 5 см составят:

$$N_{dv \text{ 1 передача}} = \frac{(3,98 + 8,9 + 41 \cdot 0,2 + 44,9) \cdot 0,7}{0,80} = 58 \text{ кВт},$$

Аналогично проведем расчет для 2,3 передачи КПП. Данные расчетов приведены в табл. 3.

Как видно из расчетов, трактор МТЗ-82 (мощность двигателя 61 кВт), обеспечивает возможность работы с плугом ПКЛ-70 во всем диапазоне технологических скоростей обработки почвы вспашкой при работе

по почве, не имеющей инородных включений. При работе на лесосеках с мелкими деревьями, корнями и кустарником при мощности двигателя $N_e = 61$ кВт работа агрегата возможна только на первой передаче. При этом, загрузка двигателя составит до 95 % что будет сопровождаться высоким расходом топлива, снижением ресурса, риском аварийных режимов. Практически трактор МТЗ-82 малопригоден для работы с плугом ПКЛ-70 в условиях лесосек и наличия кустарника, мелких пней, деревьев, корней.

Транспортно-технологические отделения лесничеств имеют в своем распоряжении помимо колесных, гусеничные тракторы. Чаще всего это машины серии ТТД-55, ТЛТ-100. Эти гусеничные тракторы широко используются в качестве тягового средства для проведения подготовки лесных минерализованных полос отвалной вспашкой плугами ПКЛ-70. Расчетные по-

казатели необходимых затрат мощности для диапазонов скоростей соответствующих определенным передачам КПП показаны в табл. 4.

Из данных расчета видно, что гусеничный трактор ТЛТ-100 мощностью 90 кВт позволяет вести подготовку почвы плугом ПКЛ-70 в условиях лесосеки со скоростью движения до 2–3,2 км/ч, что соответствует 1 и 2 передаче КПП. Движение на 2 передаче сопровождается загрузкой двигателя до 98 % что будет также сопровождаться высоким расходом топлива, снижением ресурса, риском аварийных режимов. Однако в целом машина вполне пригодна для подготовки минерализованных лесопосадочных полос в условиях лесосек [12].

На рис. 4 показан график изменения затрат мощности двигателя (кВт) трактора и производительности (гектар) на подготовки лесных полос под лесопосадку в зависимости от скорости движения машины.

Таблица 3
Затраты мощности при обработке колесным трактором МТЗ-82

Передача КПП	Скорость движения, км/ч	Затраты мощности, кВт	
		Почва свободная от корней и деревьев	Корни и мелкие деревья до 5 см
1	2,5	18,3	58
2	4,26	31	98
3	7,24	53	165

Таблица 4
Затраты мощности при обработке гусеничным трактором ТЛТ-100

Передача КПП	Скорость движения, км/ч	Затраты мощности, кВт	
		Почва свободная от корней и деревьев	Корни и мелкие деревья до 5 см
1	2	25	56
2	3,2	39	88
3	4,1	51	114
4	6,4	79	177

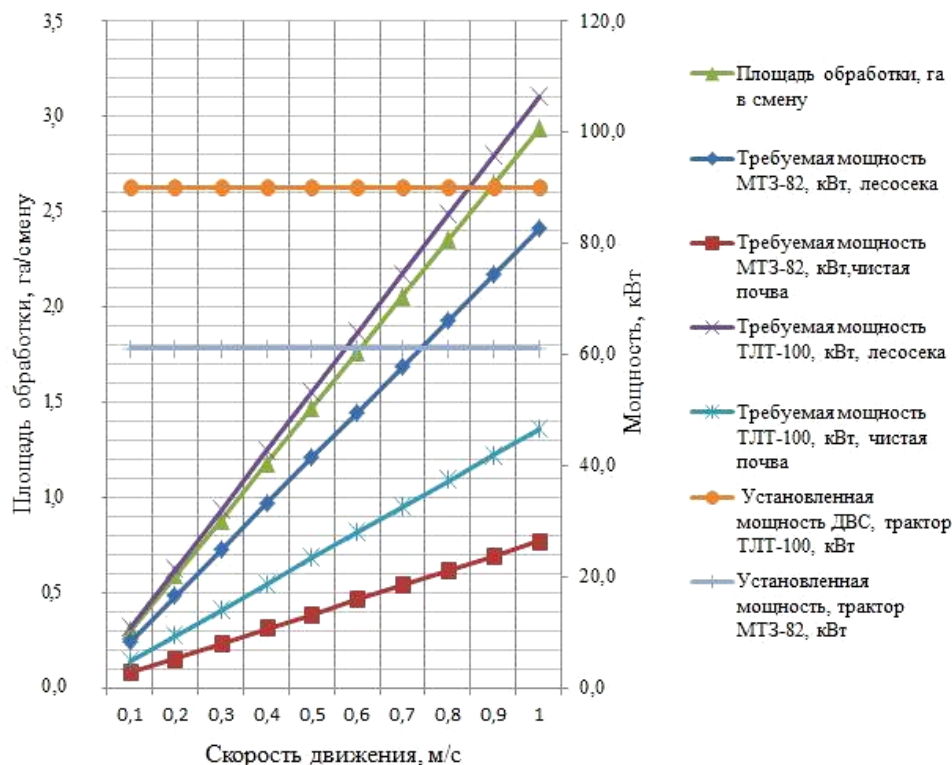


Рис. 4. Зависимость мощности и производительности от скорости обработки

Из графика на рис. 4 видно, что для обеспечения значения сменной производительности на подготовке лесосек к лесовосстановлению отвальной вспашкой 3,5–4 га, что соответствует показателям лесных культиваторов, например фирмы Bracke Forest, необходима скорость движения машины не менее 1,2–1,3 м/с (или 3,6–4,6 км/ч). При работе с плугом типа ПКЛ-70 затраты мощности при таких условиях составят 95–110 кВт. Действительно, для работы с высокопроизводительными лесными почвообрабатывающими навесными устройствами привлекаются тяговые средства в виде скиддеров, форвардеров, бульдозеров мощностью до 170 кВт. Имеющиеся в массовых количествах в лесничествах РФ тракторы МТЗ-82, ТЛТ-100 не обеспечивают тяговых усилий, требуемых для высокоскоростной и производительной подготовки почвы на лесосеках.

Основная причина высоких показателей требуемой мощности при двухотвальной вспашке плугами ПКЛ-70 обусловлены значительным размером формируемой борозды. Однако при реализации технологии лесовозобновления нет практической необходимости формирования минерализованной борозды сечением до 1,5 м². Опыт применения машин Bracke Forest, особенно так называемых «маундеров» (серия М24 – М46), которые используются для создания гумусовых насыпей с минеральным почвенным покровом, свидетельствует о том, что без ущерба можно снизить площадь минерализации до величины 0,3–0,5 м² на один саженец. При снижении площади минерализуемого грунта, затраты мощности пропорционально будут уменьшаться, возрастет скорость работ или число одновременно формируемых посадочных лунок. Помимо работ по лесовосстановлению плуг ПКЛ-70 широко применяется при создании противопожарных минерализованных полос при опашке лесосек, очагов пожаров. В этом случае наоборот полезно иметь максимальное сечение минерализованной борозды, т. е. ПКЛ-70 – это в определенной степени универсальное решение. Но как часто бывает, универсальные решения уступают специализированным.

ВЫВОДЫ

1. Леса России подвергаются интенсивному освоению, при этом возникает необходимость в проведении работ по лесовосстановлению. Объемы лесных земель, требующих лесовосстановления, составляет не менее 1 млн га в год. Технологии подготовки почвы, ее минерализация – необходимый и важный этап этих работ. При обработке почвы отвальной вспашкой лесными плугами ПКЛ-70 затраты мощности прямо пропорционально зависят от планируемой скорости движения тягового средства. Для обеспечения существенного роста производительности труда при реализации традиционной отвальной вспашки в процессе минерализации лесного грунта требуется скорость тяговых средств до 1–1,3 м/с и мощность не менее 95–110 кВт.

2. Широко используемые органами лесного хозяйства тракторы МТЗ-82, ТЛТ-100 при их агрегатировании с двухотвальными плугами ПКЛ-70, не обеспечивают повышения выработки в процессе вспашки на

территории лесосеки из-за недостаточных величин тяговых усилий и мощности двигателей на принятой скорости обработки. Это объясняется значительными величинами площади обработки грунта и протяженности борозд. Для повышения эффективности работ требуется либо увеличение мощности тяговых средств, либо снижение энергоемкости процесса обработки. Снижение затрат мощности возможно при переходе от технологий отвальной вспашки к фрезерованию или к полосовой обработке с существенным уменьшением площади обрабатываемой полосы или с переходом к технологии «очаговой» подготовки почвы в виде создания микроповышений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Бюллетень Счетной палаты Российской Федерации // Воспроизводство лесов № 1 (290) 2022. М. : Счетная палата РФ, 2022. 143 с.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 312-р от 11.02.2021 г. «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» [Электронный ресурс] URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377162/ (дата обращения: 10.04.2023).
3. Лейнонен Тимо. Лесовосстановление на Северо-Западе России и сравнение с Финляндией [Текст] : комментарии финских специалистов / Тимо Лейнонен, Маркку Туртиайнен, Ари Сиеккинен. Йоэнсуу : Научно-исслед. ин-т леса Финляндии, 2009. 38 с.
4. Ramsey, C. L., Jose, S., Brecke, B.J., Merritt, S., 2003. "Growth response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedlings to fertilization and herbaceous weed control in an old field in southern USA." *Forest Ecology and Management*: 172, 281.
5. Spittlehouse, D.L.; Childs, S.W. 1990. Evaluating the seedling moisture environment after site preparation. Pp. 80–94 in S. P. Gessel, D. S. Lacate, G. F. Weetman, and R. F. Powers, eds. *Sustained productivity of forest soils. Proceedings of the 7th North American Soils Conference*. Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, BC. 525 p.
6. Removing the Wellsite Footprint: Recommended Practices for Construction and Reclamation of Wellsites on Upland Forests in Boreal Alberta, Osko & Glasgow, 2010.
7. Долматов С. Н., Сухенко Н. В. Влияние параметров рабочего органа дискового рыхлителя на технологический процесс нарезки борозд при лесовосстановлении // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 6. С. 529–537. DOI 10.53374/1993-0135-2022-6-529-537. EDN SZPLJF.
8. Hamzei J., Seyyedi M. (2016): Energy use and input-output costs for sunflower production in sole and intercropping with soybean under different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 157: 73–82.
9. Sutherland B. J. and Foreman F. F. 1995. Guide to the Use of Mechanical Site Preparation Equipment in Northwestern Ontario, MNR/NRCan/CFS-1995.
10. Forest Soil Conservation and Rehabilitation in British Columbia – Opportunities, Challenges, and Techniques. British Columbia, Forest Science Program. 2002 www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/bro/bro70.pdf.

11. Дручинин Д. Ю., Поздняков Е. В. Особенности работы лесохозяйственной техники на вырубках // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 6. С. 448–454. EDN DMOUSX.

12. Мартынов Б. Г., Дурманов М. Я., Михайлов О. А. Оценка затрат мощности лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата в пахотном режиме // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы третьей междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 года / под ред. В. М. Гед'ю. Т. 2. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова, 2018. С. 191–195. EDN YHQSTS.

REFERENCES

1. Byulleten' Schetnoy palaty Rossiyskoy Federatsii // Vosproizvodstvo lesov № 1 (290) 2022. M. : Schetnaya palata RF, 2022. 143 s.

2. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 312-r ot 11.02.2021 g. «Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda» [Elektronnyy resurs] URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377162/ (data obrashcheniya: 10.04.2023).

3. Leynonen Timo. Lesovosstanovleniye na Severo-Zapade Rossii i sravneniye s Finlyandiyei [Tekst] : kommentarii finskikh spetsialistov / Timo Leynonen, Markku Turtiainen, Ari Siyekkinen. Yoensuu : Nauchno-issled. in-t lesa Finlyandii, 2009. 38 s.

4. Ramsey, C. L., Jose, S., Brecke, B. J., Merritt, S., 2003. "Growth response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedlings to fertilization and herbaceous weed control in an old field in southern USA." *Forest Ecology and Management*: 172, 281.

5. Spittlehouse, D.L.; Childs, S.W. 1990. Evaluating the seedling moisture environment after site preparation. Rp. 80–94 in S. P. Gessel, D. S. Lacate, G. F. Weetman, and R. F. Powers, eds. *Sustained productivity of forest soils*. *Proceedings of the 7th North American Soils*

Conference. Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, BC. 525 p.

6. Removing the Wellsite Footprint: Recommended Practices for Construction and Reclamation of Wellsites on Upland Forests in Boreal Alberta, Osko & Glasgow, 2010.

7. Dolmatov S. N., Sukhenko N. V. Vliyaniye parametrov rabocheho organa diskovogo rykhlyatelya na tekhnologicheskiiy protsess narezki borozd pri lesovosstanovlenii // Khvoynyye boreal'noy zony. 2022. T. 40, № 6. S. 529–537. DOI 10.53374/1993-0135-2022-6-529-537. EDN SZPLJF.

8. Hamzei J., Seyyedi M. (2016): Energy use and input-output costs for sunflower production in sole and intercropping with soybean under different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 157: 73–82.

9. Sutherland B. J. and Foreman F. F. 1995. Guide to the Use of Mechanical Site Preparation Equipment in Northwestern Ontario, MNR/NRCan/CFS-1995.

10. Forest Soil Conservation and Rehabilitation in British Columbia – Opportunities, Challenges, and Techniques. British Columbia, Forest Science Program. 2002 www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/bro/bro70.pdf.

11. Дручинин Д. Ю., Поздняков Е. В. Особенности работы лесохозяйственной техники на вырубках // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 6. С. 448–454. EDN DMOUSX.

12. Мартынов Б. Г., Дурманов М. Я., Михайлов О. А. Оценка затрат мощности лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата в пахотном режиме // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы третьей междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 года / под ред. В. М. Гед'ю. Т. 2. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова, 2018. С. 191–195. EDN YHQSTS.

© Долматов С. Н., Колесников П. Г., 2023

Поступила в редакцию 30.04.2023
Принята к печати 02.10.2023

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 664.8

DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-440-444

Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. XLI, № 5. С. 440–444

ЭКСТРАГИРОВАНИЕ ЖМЫХА *OXYCOCCUS PALUSTRIS* КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ПОЛУЧЕНИИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

О. Н. Еременко¹, Ж. А. Кох²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

²Красноярский государственный аграрный университет,
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90
E-mail: ¹oks.eriomenko@yandex.ru, ²jannetta-83@mail.ru

Бореальные лесные экосистемы предоставляют широкий спектр различных древесных и недревесных продукты леса, таких как ягоды, имеющих различное назначение и экономическую ценность. Важное место среди растительного сырья, содержащего необходимое количество биологически активных веществ, принадлежит дикорастущим ягодам – природным витаминосителям, которым свойственны различные лечебно-профилактические свойства. При традиционных способах переработки ягод, как культивируемых, так и дикорастущих, наблюдаются существенные потери биологически активных веществ, что приводит к снижению качества получаемой продукции. Развитие промышленного производства биологически активных веществ выдвигает на первое место необходимость создания ресурсосберегающих технологий, позволяющих более эффективно использовать потенциал пищевого сырья. Ягоды клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* L.) являются богатыми гетерогенным источником фитохимических веществ. Большая часть этих соединений извлекается при производстве ягодного сока. Однако значительная часть полифенолов остается в ягодном жмыхе, который не направляется на комплексную ресурсосберегающую технологию в пищевой промышленности. Целью исследования было сравнение методов экстракции полифенолов (микроволны и Соклета) из ягодных жмыхов клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* L.). Было изучено влияние основных параметров экстракции на выход экстрагированных полифенолов. Наибольший потенциал из всех исследованных методов показала микроволновая экстракция, учитывая ее быстроту, удобство применения. Наилучшими растворителями для экстракции были признаны водный этанол в присутствии кислоты (при экстракции антоцианов следует использовать уксусную кислоту, при экстракции полифенолов – HCl).

Ключевые слова: экстракция, ягодный жмых, *Oxycoccus palustris*, фенольные соединения, полифенольные вещества, антоцианы.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 5, P. 440–444

EXTRACTION OF *OXYCOCCUS PALUSTRIS* CAKE AS A RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR OBTAINING BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

O. N. Eremenko, Zh. A. Koch

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Krasnoyarsk State Agrarian University,
90, Mira prospekt, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
E-mail: ¹oks.eriomenko@yandex.ru, ²jannetta-83@mail.ru

Boreal forest ecosystems provide a wide range of different wood and non-wood forest products, such as berries, which have different purposes and economic value. An important place among plant raw materials containing the necessary amount of biologically active substances belongs to wild berries – natural vitamin carriers, which are characterized by various therapeutic and preventive properties. At traditional methods of processing of berries, both cultivated and wild-growing, there are significant losses of biologically active substances, which leads to a decrease in the quality of products. The development of industrial production of biologically active substances brings to the forefront the need to create resource-saving technologies that allow more efficient use of the potential of food raw

materials The berries of marsh cranberry (Oxycoccus palustris L.) are a rich heterogeneous source of phytochemicals. Most of these compounds are extracted during berry juice production. However, a significant part of polyphenols remains in berry cake, which is not directed to integrated resource-saving technology in the food industry. The aim of the study was to compare the methods of extraction of polyphenols (microwave and Soxhlet) from berry cake of marsh cranberry (Oxycoccus palustris L.). The influence of the main extraction parameters on the yield of extracted polyphenols was studied. Microwave extraction showed the greatest potential among all the studied methods, taking into account its rapidity and convenience of application. The best solvents for extraction were recognized as aqueous ethanol in the presence of acid (acetic acid should be used in the extraction of anthocyanins, HCl in the extraction of polyphenols).

Keywords: extraction, berry cake, *Oxycoccus palustris*, phenolic compounds, polyphenolic substances, anthocyanins.

ВВЕДЕНИЕ

Бореальные лесные экосистемы предоставляют широкий спектр различных древесных и недревесных продукты леса, таких как ягоды, имеющих различное назначение и экономическую ценность. Важное место среди растительного сырья, содержащего необходимое количество биологически активных веществ, принадлежит дикорастущим ягодам – природным витаминносителям, которым свойственны различные лечебно-профилактические свойства [2; 3]. Современные технологии позволяют производить биологически активные вещества из дикорастущих плодов и ягод, но при этом недостаточно используется их разнообразный и полезный химический состав. При переработке дикорастущих ягод необходимо учитывать, что они имеют более плотную морфологическую структуру, пониженную способность к сокоотделению. При традиционных способах переработки ягод, как культивируемых, так и дикорастущих, наблюдаются существенные потери биологически активных веществ, что приводит к снижению качества получаемой продукции (потери биологически активных веществ составляют от 20 до 80%) [4–8]. Развитие промышленного производства биологически активных веществ выдвигает на первое место необходимость создания ресурсосберегающих технологий, позволяющих более эффективно использовать потенциал пищевого сырья [9]. Дикорастущие ягоды являются высокотехнологичным сырьем, перерабатываемым различными способами, позволяющими получать полуфабрикаты, которые могут быть использованы как пищевые продукты, готовые к употреблению [3; 6–8]. Ягоды клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* L.) являются богатыми гетерогенным источником фитохимических веществ. В ней выявлено более 150 индивидуальных фитохимических веществ, проявляющих высокую биологическую активность, функциональные свойства и лечебно-профилактическое действие [10; 11]. Клюква отличается не только высоким содержанием красящих веществ антоцианового происхождения, но и стабильными и стойкими красящими свойствами [2; 5]. Основными флавоноидами, содержащимися в ягодах, являются антоцианы, проантоцианидины, флавонолы и катехины. Флавоноиды отвечают за красный цвет и являются наиболее распространенными фенольными соединениями в различных ягодах. Фенольные кислоты, присутствующие в ягодах, представляют собой гидроксилированные производные бензойной и коричной кислот.

Антиоксидантная активность фенольных соединений обусловлена в основном их окислительно-восстановительными свойствами. Экстракты из плодов клюквы проявляют антибактериальную и противогрибковую активность [2; 5]. Большое количество фенольных соединений находится в семенах и кожице ягод, что затрудняет их высвобождение. В настоящее время существует необходимость в изучении методов экстракции именно для ягодного жмыха [4; 9]. Условия экстракции одного растения не могут быть непосредственно использованы для извлечения фенольных соединений из другого растения в связи с особенностями локализации фенольных соединений в различных видах. Для разработки методов, пригодных для промышленного применения, необходима оптимизация условий экстракции [1; 7].

Целью данного исследования было установить оптимальный метод экстракции полифенолов, в частности антоцианов, из ягодного жмыха *Oxycoccus palustris* L. полученного после прессования, выяснить влияние основных параметров экстракции (время экстракции, соотношение твердого вещества и растворителя, тип растворителя и др.) на выход экстрагированных полифенолов и определить состав антоцианов *Oxycoccus palustris* L.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследований послужили образцы ягод *Oxycoccus palustris* L., которые были собраны на территории Красноярского края в Сухобузимском районе. Все ягоды были заморожены при температуре минус 15 °C для улучшения извлечения сока. Затем ягоды подвергали дефростации при температуре плюс 3 °C, затем ягоды помещали в бытовую соковыжималку объемом 1,5 л и извлекали сок. На этом этапе были получены остатки ягодного жмыха (семена, шкурки), содержащие остаточную влагу (9,5 %). Для извлечения антоцианов и полифенолов было применено два метода экстракции, метод Сокслета, который проводили с использованием этанола и уксусной кислоты, и метод микроволновой экстракции, с помощью микроволновой экстракционной установки. Общее содержание полифенолов определяли колориметрическим методом по галловой кислоте на спектрофотометре [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экстракция полифенолов и антоцианов из различных ягод интенсивно изучается и проводится до сих

пор, но существует значительное несоответствие в способах ее проведения. Учитывая различия в химических и физических свойствах разных полифенолов, эти полярные молекулы обычно экстрагируют метанолом, этанолом, ацетон или водой. Несмотря на то что ацетон является наиболее эффективными экстракционными растворителями, их применение в пищевой промышленности ограничено из-за токсичности. Этанол, в свою очередь, является растворителем, более подходящим для пищевой промышленности. Для экстракции антоцианов используются различные кислоты: уксусная, соляная, серная и муравьиная [3; 6]. Добавление кислот при экстракции антоцианов стабилизирует их, поэтому при низком pH антоцианы дают красный цвет. Выбор кислоты может влиять на стабильность антоцианов. Например, соляная кислота может катализировать гидролиз ацетилированных антоцианов. Поэтому для данного вида экстракции предпочтительнее использовать органическую кислоту – уксусную [9].

Для сравнения различных систем растворителей, используемых для экстракции фенольных соединений, были рассмотрены различные условия экстракции, предложенные в других исследованиях [3; 6; 8; 10; 11]. Предложенные смеси растворителей были протестированы на одном и том же типе образца – жмыха ягод *Oxycoccus palustris* L. после прессования, чтобы найти наилучший растворитель для конкретного типа образца, используемого в данном исследовании. Содержание сухих веществ, которое показывает общую эффективность экстракции, варьировалось в зависимости от используемых растворителей. Так, при экстракции водой и 1,5 %-ной HCl наблюдался значительно более низкий выход экстракта по всем измеряемым параметрам, за исключением общих углеводов (15,66 г на 100 г ягодного жмыха). Таким образом, учитывая область применения экстракта, следует избегать системы растворителей, в которой используется вода, поскольку низкое содержание фенольных (0,94 г на 100 г ягодного жмыха) и антоциановых (0,102 г на 100 г ягодного жмыха) веществ и высокое содержание общих углеводов может оказаться неприменимым для дальнейшего аналитического

изучения состава экстракта. Однако если экстракты предполагается использовать в производственных целях, то большое количество сахаров может приводить к увеличению продолжительности технологического процесса, так как сахара превращают конечный продукт в густую, вязкую массу, которую трудно обрабатывать и перерабатывать. Сравнение различных смесей растворителей для экстракции фенольных соединений приведено в табл. 1.

Проведенный анализ результатов проведенного эксперимента показывает, что наибольший выход экстракта (42,19 г на 100 г-1 ягод) был получен при использовании этанола + 1,5 % HCl. Эта экстракция также дала наибольшее количество общих антоцианов (0,451 г 100 г ягодного жмыха) и полифенолов (4,63 г 100 г ягодного жмыха). Однако при использовании этой системы необходимо учитывать стабильность молекул антоцианов. Простота использования и низкая стоимость этанола, а также высокий выход фенольных соединений при использовании этого растворителя позволяют оптимизировать процесс экстракции (табл. 1).

Наиболее часто используемыми методами экстракции полифенолов являются экстракция по методу Сокслета и экстракция с использованием микроволн, поскольку эти методы надежны для рутинного использования и дают воспроизводимые результаты. Экстракцию по методу Сокслета проводили преимущественно с растворителем (этанолом), а не с кислотой, так как уксусная кислота образует азеотропную смесь с водой в этаноле, повышая температуру кипения смеси и не позволяя кислоте контактировать с образцом. Сравнительный анализ различных методов экстракции представлен в табл. 2.

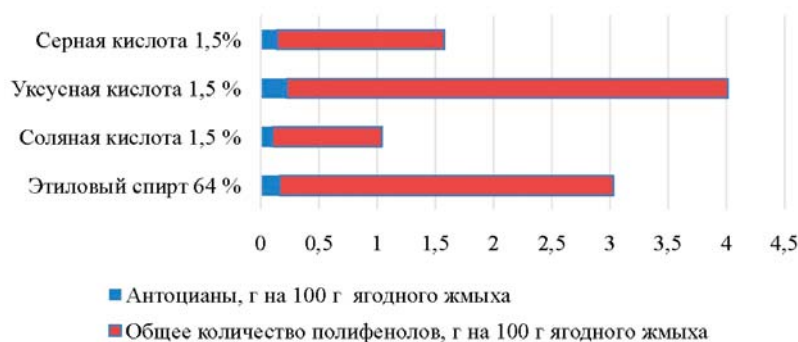
Анализ табл. 2 показал, что экстракция по методу Сокслета и метод настаивания дали значительно меньший выход сухих веществ, чем микроволновая экстракция (23,64 г и 22,64 г на 100 г ягодного жмыха, соответственно). Кроме того, метод Сокслета и метод настаивания также дали более низкое содержание извлеченных антоцианов (0,069 и 0,061 г на 100 г ягодного жмыха) и полифенолов (1,44 и 1,11 на 100 г ягодного жмыха).

Таблица 1
Сравнение различных смесей растворителей для экстракции фенольных соединений

Растворитель	Содержание сухих веществ, г на 100 г жмыха ягод	Общее количество углеводов, г на 100 г жмыха ягод	Антоцианы, г на 100 г жмыха ягод	Общее количество полифенолов, г на 100 г жмыха ягод
Уксусная кислота 1 %	36,62±0,24	7,24±0,14	0,221±0,02	3,79±0,05
Этанол 64 %	35,88±0,07	11,98±0,11	0,159±0,05	2,87±0,04
HCl 1,5 %	17,24±0,08	17,66±0,05	0,102±0,02	0,94±0,05
Этанол 64 % + HCl 1,5%	42,19±0,09	16,25±0,03	0,221±0,05	4,63±0,07

Таблица 2
Сравнение различных методов экстракции

Метод	Содержание сухих веществ, г на 100 г жмыха ягод	Общее количество углеводов, г на 100 г жмыха ягод	Антоцианы, г на 100 г жмыха ягод	Общее количество полифенолов, г на 100 г жмыха ягод
Сокслета	23,64±0,08	9,45±0,13	0,069±0,05	1,44±0,04
Микроволновая печь	38,11±0,04	13,41±0,18	0,108±0,04	1,62±0,05
24 ч настаивание	22,64±0,16	8,95±0,03	0,061±0,04	1,11±0,05



Сравнение эффективности экстракции общего количества полифенолов и общего количества антоцианов из ягодного жмыха *Oxycoccus palustris* L. с использованием различных кислот в концентрации 1,5 % с 64 %-ным этанолом

При обработке образца в микроволновой печи происходит разрушение матрикса клеточной стенки, что обеспечивает выход различных соединений, в том числе и полифенолов, в окружающую среду, что очень важно в данном случае, так как тип образца (кожица ягод, семян) имеет толстые клеточные стенки. Результаты, полученные при микроволновой экстракции, показали, что этот метод обладает наибольшим потенциалом из всех использованных методов. Учитывая быстроту, удобство использования и низкую стоимость, этот метод является методом выбора для экстракции фенолов из ягодного жмыха.

На экстракцию полифенольных веществ влияет не только выбор растворителя, но и выбор кислоты, используемой для экстракции. Для определения наиболее оптимальной кислоты для экстракции антоцианов и фенольных веществ был проведен последовательный ряд микроволновой экстракции, в которой растворитель этанол смешивался с органическими кислотами, используемыми для экстракции полифенолов. Сравнение эффективности экстракции общего количества полифенолов и общего количества антоцианов с использованием различных кислот приведена на рисунке выше.

Часто используемой для экстракции антоцианов, является уксусная кислота, но в меньших концентрациях (0,1 % и 0,5 %), а при использовании 1,5 % уксусной кислоты выход обнаруженных антоцианов был примерно в два раза выше (0,221 г на 100 г 1 ягодного жмыха), чем при экстракции соляной и серной кислотой. Фенольные соединения, экстрагированные 1,5%-ной уксусной кислотой, показали увеличенный выход (3,79 г на 100 г ягодного жмыха). Наименьшее количество экстрагированных полифенолов наблюдалось при использовании HCl (0,94 г на 100 г ягодного жмыха). В то же время количество извлеченных антоцианов (0,102 г на 100 г ягодного жмыха), что может свидетельствовать о том, что HCl способствует извлечению неантоциановых фенольных веществ (см. рисунок). В целом использование кислот для повышения выхода полифенольных экстрактов является необходимым шагом. Учитывая, что используемые кислоты не будут мешать аналитическим измерениям, экстракцию антоцианов следует проводить с помощью уксусной кислоты, а экстракцию полифенолов – с помощью HCl.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе определены наиболее оптимальные параметры экстракции полифенолов и антоцианов из ягодного жмыха *Oxycoccus palustris* L. после получения сока методом прессования. Были рассмотрены различные комбинации растворителей и кислот, а также методы экстракции. Проведенные эксперименты показали, что оптимальными растворителями для экстракции антоцианов являются этанол с 1,5 % уксусной кислотой, а для экстракции неантоциановых полифенолов – 1,5 % HCl. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют рекомендовать воспроизводимый метод экстракции полифенолов и антоцианов из ягодного жмыха *Oxycoccus palustris* L. полученного способом прессования, с возможностью использовать данный метод для других ягодных жмыхов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Калинина И. В., Фаткуллин Р. И. Перспективы использования ультразвуковой экстракции в технологии производства морсов // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. 2013. № 3(3). С. 55–59.
2. Киселева Т. Ф., Зайцева И. С., Пеков Д. Б., Бабий Н. В. Выявление предпосылок комплексной переработки плодово-ягодного сырья Сибирского региона // Техника и технология пищевых производств. 2009. № 3(14). С. 7–11.
3. Нилова Л. П., Вытовтов А. А., Малютенкова С. М. Растительное сырье в формировании антиоксидантных свойств сокодержущих напитков // Международный научный журнал. 2017. № 4. С. 83–87.
4. Нилова Л. П., Икрамов Р. А., Малютенкова С. М. Влияние СВЧ-нагрева на оптические характеристики ягодных экстрактов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81, № 1(79). С. 218–224. DOI 10.20914/2310-1202-2019-1-218-224.
5. Овсянникова Е. А., Киселева Т. Ф., Потапов А. Н., Дюжев А. В. Исследование процесса экстрагирования дикорастущих ягод Сибири с использованием биокаталитических методов // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 4(27). С. 110–114.
6. Петров Н. В. Сравнительная оценка запасов ягод *Vaccinium myrtillus* и *V. vitis-idaea* (Ericaceae)

в коренных и производных типах леса среднетаежных ландшафтов Карелии // Растительные ресурсы. 2019. Т. 55, № 1. С. 23–35. DOI 10.1134/S0033994619010102.

7. Потапов А. Н., Просин М. В., Магилина А. М., Понамарева М. В. Разработка экстракторов для системы «твердое тело – жидкость» // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 3(30). С. 80–84.

8. Савельев Ю. В. Биотехнологический потенциал лесных регионов России и технико-экономическое обоснование комплексной переработки лесного биотехнологического сырья // Отходы и ресурсы. 2022. Т. 9, № 1. DOI 10.15862/02NZOR122.

9. Федоренко Б. Н., Бородулин Д. М., Просин М. В. [и др.] Определение рациональных технологических параметров работы экстрактора Сокслета при получении спиртовой настойки из ягод клюквы // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 1. С. 115–123. DOI 10.21603/2074-9414-2020-1-115-123.

10. Червяк С. Н., Погорелов Д. Ю., Ермихина М. В., Михеева Л. А. Исследование физико-химических показателей природных и синтетических красителей // Магарач. Виноградарство и виноделие. 2017. № 3. С. 31–33.

11. Четчина А. Ю., Мурадов М. Б., Проскура А. В. [и др.] Комплексная переработка ягод брусники и клюквы // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 75–81. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.010.

REFERENCES

1. Kalina I. V., Fatkulina R. I. Perspektivy ispol'zovaniya ul'trazvukovoy ekstraktsii v tekhnologii proizvodstva morsov // Problemy ekonomiki i upravleniya v torgovle i promyshlennosti. 2013. № 3(3). S. 55–59.

2. Kiseleva T. F., Zaytseva I. S., Pekov D. B., Babiy N. V. Vyyavleniye predposylok kompleksnoy pererabotki plodovo-yagodnogo syr'ya Sibirskogo regiona // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2009. № 3(14). S. 7–11.

3. Nilova L. P., Vytovtov A. A., Malyutenkova S. M. Rastitel'noye syr'ye v formirovani antioksidantnykh svoystv sokosoderzhashchikh napitkov // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal. 2017. № 4. S. 83–87.

4. Nilova L. P., Ikramov R. A., Malyutenkova S. M. Vliyaniye SVCh-nagreva na opticheskiye kharakteristiki yagodnykh ekstraktov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy. 2019. T. 81, № 1(79). S. 218–224. DOI 10.20914/2310-1202-2019-1-218-224.

5. Ovsyannikova E. A., Kiseleva T. F., Potapov A. N., Dyuzhev A. V. Issledovaniye protsessa ekstragirovaniya dikorastushchikh yagod Sibiri s ispol'zovaniyem biokataliticheskikh metodov // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2012. № 4(27). S. 110–114.

6. Petrov N. V. Sravnitel'naya otsenka zapasov yagod Vaccinium myrtillus i V. vitis-idaea (Ericaceae) v korennykh i proizvodnykh tipakh lesa srednetayezhnykh landshaftov Karelii // Rastitel'nyye resursy. 2019. T. 55, № 1. S. 23–35. DOI 10.1134/S0033994619010102.

7. Potapov A. N., Prosin M. V., Magilina A. M., Ponomareva M. V. Razrabotka ekstraktorov dlya sistemy «tvrdoye telo – zhidkost'» // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2013. № 3(30). S. 80–84.

8. Savel'ev Yu. V. Biotekhnologicheskiy potentsial lesnykh regionov Rossii i tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye kompleksnoy pererabotki lesnogo biotekhnologicheskogo syr'ya // Otkhody i resursy. 2022. T. 9, № 1. DOI 10.15862/02NZOR122.

9. Fedorenko B. N., Borodulin D. M., Prosin M. V. [i dr.] Opredeleniye ratsional'nykh tekhnologicheskikh parametrov raboty ekstraktora Sokslita pri poluchenii spirtovoy nastoyki iz yagod klyukvy // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. 2020. T. 50, № 1. S. 115–123. DOI 10.21603/2074-9414-2020-1-115-123.

10. Chervyak S. N., Pogorelov D. Yu., Ermikhina M. V., Mikheyeva L. A. Issledovaniye fiziko-khimicheskikh pokazateley prirodnykh i sinteticheskikh krasiteley // Magarach. Vinogradarstvo i vinodeliye. 2017. № 3. S. 31–33.

11. Chechetkina A. Yu., Muradov M. B., Proskura A. V. [i dr.] Kompleksnaya pererabotka yagod brusniki i klyukvy // Polzunovskiy vestnik. 2021. № 2. S. 75–81. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.010.

© Еременко О. Н., Кох Ж. А., 2023

Поступила в редакцию 30.04.2023
Принята к печати 02.10.2023

АВТОРСКАЯ ССЫЛКА

Артемьев О. С. К юбилею Сергея Леонидовича Шевелёва, с. 377–378

Бакшеева Е. О., см. Иванов В. А.

Баяндин М. А., см. Ермолин В. Н.

Баяндина М. М., см. Ермолин В. Н.

Братилова Н. П., см. Коновалова Д. А.

Вайс А. А., см. Артемьев О. С.

Воронин В. И. Современная структурно-динамическая организация и тенденции развития лесов предгорий хребта Хамар-Дабан (Юго-Западное Забайкалье), 412–418

Гриценюк А. П., см. Воронин В. И.

Долматов С. Н. Совершенствование технологии подготовки почвы отвальной вспашкой при лесовосстановлении, с. 431–439

Еременко О. Н. Экстрагирование жмыха *Oxycoccus palustris* как ресурсосберегающая технология в получении биологически активных веществ, с. 440–444

Ермолин В. Н. Влияние термомеханической активации на свойства древесных плит без связующих, с. 425–430

Зверева Д. В., см. Иванов В. А.

Иванов В. А. Антропогенная пожарная опасность лесов среднесибирского подтаежно-лесостепного района, с. 390–398

Иванова Г. А., см. Иванов В. А.

Иншаков Е. М., см. Сунцова Л. Н.

Колесников П. Г., см. Долматов С. Н.

Коновалова Д. А. Выращивание сеянцев сосны кедровой сибирской с закрытой корневой системой на экспериментальных субстратах, с. 379–383

Коротков А. А., см. Коновалова Д. А.

Кох Ж. А., см. Еременко О. Н.

Лисотова Е. В., см. Сунцова Л. Н.

Маленко А. А., см. Чичкарев А. С.

Мантулина А. В., см. Коновалова Д. А.

Михайлов П. В., см. Шевелев С. Л.

Мориц Р. С., см. Воронин В. И.

Намятов А. В., см. Ермолин В. Н.

Осколков В. А., см. Воронин В. И.

Пономарев Д. Д., см. Коновалова Д. А.

Сизых А. П., см. Воронин В. И.

Сунцова Л. Н. О состоянии пигментного аппарата хвойных в условиях урбанизированной среды города Красноярска, с. 399–405

Суслина М. А., см. Сунцова Л. Н.

Усольцев В. А. Высота древостоев ели (род *Picea*) как характеристика их продуктивности: климатические аспекты, с. 419–424

Цепордей И. С., см. Усольцев В. А.

Часовских В. П., см. Усольцев В. А.

Чичкарев А. С. Рост и продуктивность сосново-лиственничных культур в условиях степи Юго-Западной Сибири, с. 384–389

Шевелев С. Л. Связь между густотой и относительной полнотой в еловых древостоях Енисейского края, с. 406–411

AUTHOR'S LINK

Artemyev O. S. To the anniversary of Sergey Leonidovich Shevelev, p. 377–378

Baksheeva E. O., see Ivanov V. A.

Bayandin M. A., see Ermolin V. N.

Bayandina M. M., see Ermolin V. N.

Bratilova N. P., see Konovalova D. A.

Chasovskikh V. P., see Usoltsev V. A.

Chichkarev A. S. Growth and productivity of pine and larch crops in the steppe of Southwestern Siberia, p. 384–389

Dolmatov S. N. Improvement of the technology of soil preparation by slow powing during forest reforestation, p. 431–439

Eremenko O. N. Extraction of *Oxycoccus palustris* cake as a resource-saving technology for obtaining biologically active substances, p. 440–444

Ermolin V. N. The effect of thermomechanical activation on the properties of wood slabs without binders, p. 425–430

Gritsenyuk A. P., see Voronin V. I.

Inshakov E. M., see Suntsova L. N.

Ivanov V. A. Anthropogenic fire hazard of forests in the central siberian subtaiga-forest-steppe region, p. 390–398

Ivanova G. A., see Ivanov V. A.

Kolesnikov P. G., see Dolmatov S. N.

Konovalova D. A. Growing seedlings of *pinus sibirica* du tour with a closed root system on experimental substrates, p. 379–383

Korotkov A. A., see Konovalova D. A.

Koch Zh. A., see Dolmatov S. N.

Lisotova E. V., see Suntsova L. N.

Malenko A. A., see Chichkarev A. S.

Mantulina A. V., see Konovalova D. A.

Mikhaylov P. V., see Shevelev S. L.

Moritz R. S., see Voronin V. I.

Namyatov A. V., see Ermolin V. N.

Oskolkov V. A., see Voronin V. I.

Ponomarev D. D., see Konovalova D. A.

Shevelev S. L. Correlation between stocking and relative density in spruce stands of the Yenisei ridge, p. 406–411

Sizykh A. P., see Voronin V. I.

Suntsova L. N. On the state of the pigment apparatus of conifers in the urbanized environment of Krasnoyarsk, p. 399–405

Suslina M. A., see Suntsova L. N.

Tsepordey I. S., see Usoltsev V. A.

Usoltsev V. A. Height of spruce stands (genus *Picea*) as a characteristic of their productivity: climatic aspects, p. 419–424

Vais A. A., see Artemyev O. S.

Voronin V. I. Modern structural-dynamic organization and trends in the development of forests in the foothills of the Khamar-Daban ridge (South-Western Trans-Baikal), p. 412–418

Zvereva D. V., see Ivanov V. A.

