

СОДЕРЖАНИЕ

Том 58, вып. 4, 2022

ОБЗОРЫ

Вторичные метаболиты и биологическая активность *Dictamnus dasycarpus* (Rutaceae)

Л. М. Беленовская, Н. В. Битюкова

327

СТАТЬИ И СООБЩЕНИЯ

Ресурсы полезных растений и растительных сообществ

Оценка надземной биомассы *Abies sibirica* (Pinaceae) на Северо-Востоке европейской части России (Республика Коми)

С. И. Тарасов, Н. В. Герлинг

342

Структура популяций растений

Характеристики структуры ценопопуляций *Betula pubescens* (Betulaceae) в северотаежных лесах

Н. И. Ставрова, В. В. Горшков, П. Н. Катютин

354

Интродукция ресурсных видов

Биоэкологические особенности *Juglans regia* (Juglandaceae) при интродукции в условиях Среднего Предуралья

Н. М. Кузьмина, А. В. Федоров

366

Компонентный состав ресурсных видов

Особенности макро- и микроэлементного состава некоторых лекарственных растений Горного Алтая (Россия) в условиях геохимической аномалии

И. Г. Боярских, Т. И. Сиромля

376

Оценка накопления микроэлементов в талломах эпифитных лишайников в сосняке кустарничково-зеленомошном (Юго-Восточное Приладожье)

М. Н. Катаева, А. И. Беляева

388

Содержание химических элементов в корнях *Saposhnikovia divaricata* (Apiaceae) в Забайкальском крае

В. П. Макаров, М. А. Солодухина, О. Ф. Малых, Н. Ю. Михеева,
Е. А. Банищикова, В. С. Ларин, В. В. Бронников, Т. В. Желибо

402

Антропогенное воздействие на растительные ресурсы

Мониторинг состояния *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в сосняках лишайниковых при загрязнении выбросами сыктывкарского лесопромышленного комплекса (Республика Коми)

Е. А. Робакидзе, К. С. Бобкова

417

Методика исследований

Оптимизация условий стерилизации и культивирования эксплантов *Pinus sylvestris* (Pinaceae)

М. А. Ершова, Р. В. Игнатенко, Е. В. Новичонок, О. В. Чирва, Н. А. Галибина

431

Contents

Vol. 58, issue 4, 2022

REVIEW

Secondary Metabolites and Biological Activity of *Dictamnus dasycarpus* (Rutaceae)

L. M. Belenovskaya, N. V. Bityukova

327

ARTICLES AND COMMUNICATIONS Resources of Useful Plants and Plant Associations

Estimation of *Abies sibirica* (Pinaceae) Aboveground Biomass in the Northeast of European Russia

S. I. Tarasov, N. V. Gerling

342

Structure of Plant Populations

Structural Characteristics of *Betula pubescens* (Betulaceae) in Northern Taiga Forests

N. I. Stavrova, V. V. Gorshkov, P. N. Katyutin

354

Introduction of Resource Species

Bioecological Features of *Juglans regia* (Juglandaceae) under Introduction in the Middle Urals

N. M. Kuzmina, A. V. Fedorov

366

Component Composition of Resource Species

Macro- and Trace Elements Composition of Some Medicinal Plants in the Geochemically Abnormal Environment in the Altai Mountains (Russia)

I. G. Boyarskykh, T. I. Siromlya

376

Assessment of Trace Elements Accumulation in Thalli of the Epiphytic Lichens in Dwarf Shrub–Green Moss Pine Forest of the Middle Taiga (South Eastern Ladoga Region)

M. N. Kataeva, A. I. Belyaeva

388

Elemental Content of Roots of *Saposhnikovia divaricata* (Apiaceae) in the Trans-Baikal Territory

V. P. Makarov, M. A. Solodukhina, O. F. Malykh, N. Yu. Mikheeva, E. A. Banshchikova, V. S. Larin, V. V. Bronnikov, T. V. Zhelibo

402

Anthropogenic Effect on Plant Resources

Monitoring the State of Scots Pine in Lichen Pine Forests Affected by Emissions from Mondi Syktyvkar Timber Industry Complex (Komi Republic)

E. A. Robakidze, K. S. Bobkova

417

Methods of Research

Optimization of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Explants Sterilization Protocol and Cultivation Conditions

M. A. Ershova, R. V. Ignatenko, E. V. Novichonok, O. V. Chirva, N. A. Galibina

431

ВТОРИЧНЫЕ МЕТАБОЛИТЫ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ *DICTAMNUS DASYCARPUS* (RUTACEAE)

© 2022 г. Л. М. Беленовская¹, Н. В. Битюкова¹, *

¹Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: NBityukova@binran.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принята к публикации 06.10.2022 г.

Предлагаемая статья является обзором литературных данных о результатах химических и фармакологических исследований *Dictamnus dasycarpus* Turcz. и его вторичных метаболитов, таких как терпеноиды, лимонноиды, кумарины, флавоноиды и алкалоиды, а также фенольные соединения. Для соединений, впервые выделенных за последние десять лет (2012–2022 гг.), приведены структурные формулы. Рассматриваются различные аспекты биологической активности растения и его компонентов.

Ключевые слова: *Dictamnus dasycarpus*, Rutaceae, терпеноиды, лимонноиды, кумарины, фенольные соединения, биологическая активность

DOI: 10.31857/S0033994622040033

Dictamnus dasycarpus Turcz. (ясенец мохнато-плодный) – многолетнее травянистое растение семейства Rutaceae, 35–80 см высотой, с непарноперистыми листьями и сиреневыми цветками, собранными в кистевидные соцветия. Произрастает в светлых лесах, по опушкам и среди кустарников, на каменистых склонах оврагов и на суходольных лугах. На территории России встречается в Восточной Сибири, Приамурье и Приморском крае [1¹], за пределами России – в Восточной Монголии, Маньчжурии, Корее и Северном Китае. Настои и отвары из коры корня *D. dasycarpus* издавна используются в корейской и китайской народной медицине. В Китае и Корее проводятся активные исследования с целью подтвердить известные и выявить новые виды биологической активности, в результате которых выделено и идентифицировано более 200 соединений, включая алкалоиды и их гликозиды, лимонноиды, сесквитерпены, кумарины, флавоноиды, стероиды, а также фенилпропаноиды. В экспериментах *in vivo* и *in vitro* установлен широкий спектр биологической активности экстрактов и соединений *D. dasycarpus*, включая противовоспалительную, противомикробную, антигельминтную, инсектицидную и цитотоксическую активность, а также нейропротекторное, антитромбоцитарное и сосудорасширяющее дей-

ствие [2²–4]. В литературе есть указания как на гепатопротективные свойства *D. dasycarpus*, так и на случаи поражения печени при лечении им пациентов [5–7]. Поскольку традиционно в лечебных целях используется кора корня *D. dasycarpus* (Cortex Dictamni), большинство работ посвящено изучению именно этой части растения, однако есть сведения о наличии биологической активности и у экстракта его листьев [8].

Обзор составлен по литературе, доступной в сети интернет, с использованием баз данных PubMed, Scopus, Google Scholar и др. Преимущественно анализировали данные, опубликованные в течение последних десяти лет (2012–2022 гг.)

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ *DICTAMNUS DASYCARPUS* ТЕРПЕНОИДЫ

Моно-и сесквитерпеноиды

Ранние химические исследования *Dictamnus dasycarpus* были посвящены терпеноидам. В корнях растения был обнаружен новый бикарбоциклический сесквитерпеноид триноргвайанового типа, названный диктамнолом [9] (рис. 1a). Изучение состава коры корней привело к обнаруже-

¹ Введенский А. И. 1949. Сем. Rutaceae – В кн.: Флора СССР. Т. XIV. М.-Л., с. 229.

² Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. 2010. Т. 3. Семейства Fabaceae–Ariaceae. СПб.; М. 602 с.

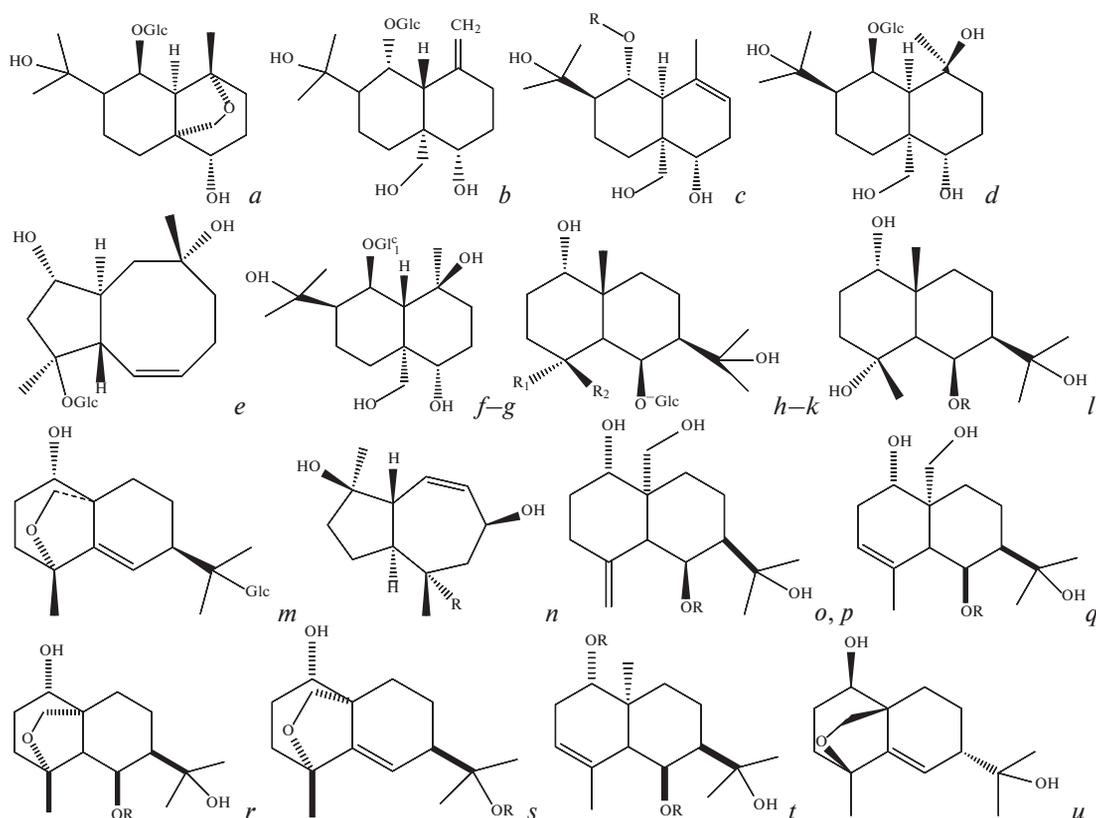


Рис. 1. Новые терпеноиды, выделенные из *Dictamnus dasycarpus*.

a – диктамнозид А; *b* – диктамнозид В; *c* – диктамнозид С; *d* – диктамнозид D; *e* – диктамнозид E; *f* – диктамнозид F; *g* – диктамнозид G; *h* – диктамнозид H ($R_1 R_2 = \text{CH}_2$; $R_3 = \text{CH}_3$; $R_4 = \beta\text{-D-Glc}$); *i* – диктамнозид I ($R_1 = \text{OH}$; $R_2 = R_3 = \text{CH}_3$); *j* – диктамнозид J ($R_1 = \text{CH}_3$; $R_2 = \text{OH}$); *k* – диктамнозид K ($R_1 = \text{CH}_3$; $R_2 = \text{OH}$); *l* – диктамнозид L ($R = -\beta\text{-D-Glc-(6 > 1)-}\alpha\text{-D-Glc}$); *m* – диктамнозид M; *n* – диктамнозид N ($R = O\text{-}\beta\text{-D-Glc}$); *o* – диктамэйдесмозид A₁ ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 > 3)-}\beta\text{-D-Glc}$); *p* – диктамэйдесмозид A₂ ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 4)-}\beta\text{-D-Glc}$); *q* – диктамэйдесмозид B ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 6)-}\beta\text{-D-Glc}$); *r* – диктамэйдесмозид C ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 4)-}\beta\text{-D-Glc}$); *s* – диктамэйдесмозид D ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 6)-}\beta\text{-D-Glc}$); *t* – диктамэйдесмозид E ($R = -\beta\text{-D-Glc-6-O-}\beta\text{-D-Glc}$); *u* – диктамнадиол.

Fig. 1. New terpenoids isolated from *Dictamnus dasycarpus*.

a – dictamnocide A; *b* – dictamnocide B; *c* – dictamnocide C; *d* – dictamnocide D; *e* – dictamnocide E; *f* – dictamnocide F; *g* – dictamnocide G; *h* – dictamnocide H ($R_1 R_2 = \text{CH}_2$; $R_3 = \text{CH}_3$; $R_4 = \beta\text{-D-Glc}$); *i* – dictamnocide I ($R_1 = \text{OH}$; $R_2 = R_3 = \text{CH}_3$); *j* – dictamnocide J ($R_1 = \text{CH}_3$; $R_2 = \text{OH}$); *k* – dictamnocide K ($R_1 = \text{CH}_3$; $R_2 = \text{OH}$); *l* – dictamnocide L ($R = -\beta\text{-D-Glc-(6 > 1)-}\alpha\text{-D-Glc}$); *m* – dictamnocide M; *n* – dictamnocide N ($R = O\text{-}\beta\text{-D-Glc}$); *o* – dictameudesmnoside A₁ ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 > 3)-}\beta\text{-D-Glc}$); *p* – dictameudesmnoside A₂ ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 4)-}\beta\text{-D-Glc}$); *q* – dictameudesmnoside B ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 6)-}\beta\text{-D-Glc}$); *r* – dictameudesmnoside C ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 4)-}\beta\text{-D-Glc}$); *s* – dictameudesmnoside D ($R = -\alpha\text{-D-Glc-(1 \rightarrow 6)-}\beta\text{-D-Glc}$); *t* – dictameudesmnoside E ($R = -\beta\text{-D-Glc-6-O-}\beta\text{-D-Glc}$); *u* – dictamnadiol.

нию ряда новых сесквитерпеновых гликозидов эйдесманового типа, названных диктамнозидами А–D, а также гликозида триноргвайянского типа – диктамнозида E [10]. Дальнейшие химические исследования корней также привели к установлению наличия в них новых сесквитерпеновых дигликозидов – диктамнозидов F и G, ряда новых гликозидов эйдесманового типа структуры, названных диктамнозидами H–M, а также нового гликозида триноргвайянского типа – диктамнозида N [11, 12] (рис. 1a–t).

Изучение компонентного состава эфирного масла, полученного из коры корней *Dictamnus dasycarpus* методом газо-жидкостной хроматографии, привело к установлению наличия в нем известных моно- и сесквитерпеноидов, идентифи-

цированных как α -пинен, β -пинен, α -мирцен, β -фелландрен, β -маалиен, (–)- α -гурьюнен, 2-ацетил-2-карен, β -маалиен, *n*-цимол, линалоол, терпинен-4-ол, α -терпинеол, β -элемен, каларен, α -элеомол, β -элеомол, (*E*)-кариофиллен, *транс*-кариофиллен, 9-эпи-(*E*)-кариофиллен, *транс*-кадина-1(6),4-диен, гвайазулен, α -эйдесмол, 10-эпи- γ -эйдесмол, патчулол, (*Z,Z*)-фарнезол, 8*S*,13-цедрандиол, *L*-криптон. Кроме того, в составе масла был обнаружен 8-эпидиктамнол и сесквитерпеновые лактоны – гейгерин, прегейгерин, изогейгерин С и (*E*)- β -дамасценон [13, 14].

Химическое исследование коры корней привело к выделению и установлению структуры нового сесквитерпеноида эйдесманового типа, названного диктамнадиолом (рис. 1t) [15]. Химиче-

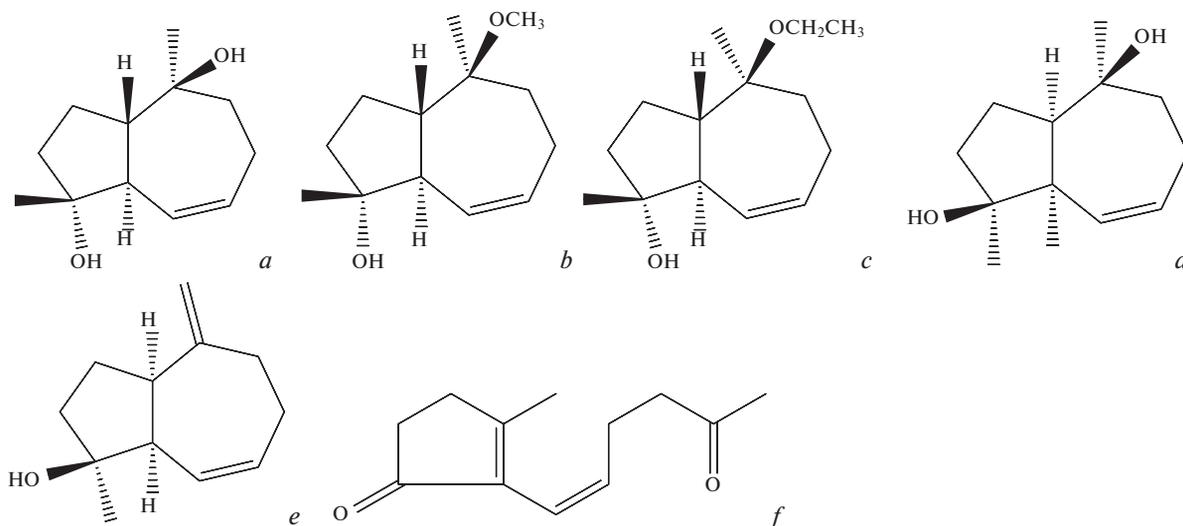


Рис. 2. Новые изопреноиды, выделенные из *Dictamnus dasycarpus*.

a – диктамтриноргвайанол А; *b* – диктамтриноргвайанол В; *c* – диктамтриноргвайанол С; *d* – диктамтриноргвайанол D; *e* – диктамтриноргвайанол Е; *f* – диктамнорсесквитерпенол А.

Fig. 2. New isoprenoids, isolated from *Dictamnus dasycarpus*.

a – dictamtrinorguajanol A; *b* – dictamtrinorguajanol B; *c* – dictamtrinorguajanol C; *d* – dictamtrinorguajanol D; *e* – dictamtrinorguajanol E; *f* – dictamnorsesquiterpenol A.

ское изучение компонентов Cortex Dictamni наряду с выделением известных гликозидов – диктамнозидов А, В, С, D, G, К и L привело к обнаружению новых сесквитерпеновых гликозидов эйдесманового типа, названных диктамэйдесмозидами А₁, А₂, В₁, С, D и Е (рис. 1*c–h*) [16, 17].

Исследование компонентного состава коры корней установило наличие ряда новых изопреноидов: диктамнорсесквитерпенола А, диктамнорсесквитерпенозидов В и С, а также – диктамтриноргвайанолов А, В, С, D и Е, химические структуры которых были установлены на основании данных спектроскопических исследований (рис. 2*a–f*) [18].

Тритерпеноиды

Новые тритерпеноиды, названные диктаминами А, В и С, также были обнаружены в коре корней *Dictamnus dasycarpus*. Изучение их химических структур установило, что они являются первыми примерами тринортритерпеноидов апотирукалланового типа, обнаруженными в природе (рис. 3*a–c*) [19]. Продолжение химических исследований коры корней растения привело к выделению двух новых изомерных тритерпеноидов этого типа структуры, названных диктаминами А и В (рис. 3*d, e*) [20]. Дальнейшие исследования, проведенные с использованием бионаправленного фракционирования хлороформного экстракта, также обнаружили в числе компонентов коры корней новые тритерпеноиды глабреталового типа, получившие названия диктабретолов А, В, С и D (рис. 3*f–i*) [21, 22].

Химическое изучение компонентов коры корней *Dictamnus dasycarpus* привело к выделению и уста-

новлению структуры нового тритерпенового спирта, названного диктамтритерпенолом А (рис. 3*j*). Кроме того, в процессе исследования были обнаружены известные тритерпеноиды даммаранового типа структуры: (3 α ,7 α ,13 α ,17 α ,20*S*,21*S*,23*R*,24*S*)-3-(3-метилбутаноил)-21,23-эпокси-21-метокси-13,30-циклодаммаран-3,7,24,25-тетрол и (3 α ,7 α ,13 α ,17 α ,20*S*,21*R*,23*R*,24*S*)-3-(3-метилбутаноил)-21,23-эпокси-21-метокси-13,30-циклодаммаран-3,7,24,25-тетрол [18].

СТЕРОИДЫ

В коре корней *Dictamnus dasycarpus* было также установлено наличие известных фитостероидов – β -ситостерина, даукостерина, и, кроме того, обнаружены 3 β -гидроксистерост-5-ен и стероидный гормон – прегненолон [23].

ЛИМОНОИДЫ

Химические исследования *Dictamnus dasycarpus* показали, что растение является богатым источником лимонидов – биологически активных природных продуктов с высокоокисленным и модифицированным тритерпеновым скелетом. Известные соединения этого типа структуры – лимонин, лимонин-диосфенол, 7 α -ацетилдигидрономинин, калодендролит, рутаевин, фраксинеллон, 6 β -гидроксифраксинеллон (дазикарпол), 9 β -гидроксифраксинеллон, изофраксинеллон, обакунон, 7 α -ацетилобакунон, дигидрообакунон и обакуноновая кислота были обнаружены в

Рис. 3. Новые лимониды, выделенные из *Dictamnus dasycarpus*.

a – диктамнусин; *b* – диктамдиол А; *c* – диктамдиол В; *d* – дазикарпол; *e* – 23-метоксидазилактон А; *f* – 9-*O*-β-D-глюкозид 9α-гидроксифраксинеллона; *g* – кихаданин С; *h* – диктамлимонол А; *i* – диктамлимонозид В; *j* – диктамлимонол С; *k* – диктамлимонол D; *l* – диктамлимонол E; *m* – диктамлимонол А; *n* – диктамлимонол F; *o* – дазикаринон; *p* – изодиктамдиол С ($R_1 = R_2 = \alpha\text{-OH}$); *q* – дазикаринон А ($R_1 = \alpha\text{-O-Et}$; $R_2 = \alpha\text{-OH}$).

Fig. 3. New limonoids, isolated from *Dictamnus dasycarpus*.

a – dictamnusin; *b* – dictamdiol A; *c* – dictamdiol B; *d* – dasycarpol; *e* – 23-methoxydasylacton A; *f* – 9α-hydroxyfraxinellone-9-*O*-β-D-glucoside; *g* – kihadanin C; *h* – dictamlimonol A; *i* – dictamlimonoside B; *j* – dictamlimonol C; *k* – dictamlimonol D; *l* – dictamlimonol E; *m* – dictamlimonol A; *n* – dictamlimonol F; *o* – dasycarinon; *p* – isodictamdiol C ($R_1 = R_2 = \alpha\text{OH}$); *q* – dasycarinon A ($R_1 = \alpha\text{-O-Et}$; $R_2 = \alpha\text{-OH}$).

корнях растения в ранние годы исследований растения [10, 24].

Дальнейшие исследования химического состава корней *Dictamnus dasycarpus* привели к выделению новых лимонидов, получивших названия – диктамнусин, дазикарпол, диктамдиолы А и В, дазикарпусиды А и В, а также 9-*O*-β-D-глюкозид 9α-гидроксифраксинеллона (рис. 3*a–d*) [25–27]. В коре корней также были обнаружены новые лимониды – 23-метоксидазилактон А, кихаданины А, В и С, наряду с установлением наличия известных соединений, из числа которых были идентифицированы обакунон, 7α-обакуниацетат, диктамдиол, рутаевин, фраксинеллон, фраксинеллонон, изофраксинеллон, кихаданины А и D, а также дазилактоны А и В [20, 28, 29].

Химическое изучение компонентов Cortex *Dictamni* также привело к обнаружению новых соединений – диктамлимонола А, диктамлимонозида В и диктамлимонолов С, D, E, F, J (рис. 4*h–n*) [30]. Кроме того, было установлено наличие новых лимонидов, получивших названия – дазикаринон, изодиктамдиол С и дазикаринон А (рис. 4*o–q*) [31].

ФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Изучению фенольных компонентов растения было уделено особое внимание на первых этапах исследования компонентного состава *Dictamnus dasycarpus*. Фенольные гликозиды были обнаружены в корнях и их химические структуры были определены как 1-*O*-α-L-рамнопиранозил-1" → 6')-глюкопиранозид 2-метокси-4-гидроксиметилфенола, 1-*O*-α-L-рамнопиранозил-(1" → 6')-глюкопиранозид 2-метокси-4-ацетилфенола, 1-*O*-α-L-рамнопиранозил-1" → 6')-глюкопиранозид 2-метокси-4-(8-гидроксиэтил)фенола [25]. Известные фенольные соединения – стирол, α-метил-4-изопропилстирол, метиловый эфир тимола, диметиловый эфир тимолгидрохинона, 3-*трет*-бутил-4-метоксифенол, 1-метокси-4-метил-2-(1-метилэтил)бензол были идентифицированы в числе компонентов эфирного масла, полученного из коры корней растения [14].

Более поздние химические исследования коры корней *Dictamnus dasycarpus* привели к обнаружению новых производных ароматических бутиролактонов, получивших названия – дазикарпусфе-

нол-кислота А и дазикарпусфенол-кислота В и установлению их химических структур (рис. 4*a, b*) [32]. Новые моно- и дигликозидированные фенольные соединения, названные диктамфенозидами А–Е, были обнаружены при исследовании компонентов водно-этанольного экстракта Cortex *Dictamni*, предложены их химические структуры на основании анализа данных ЯМР- и масс-спектрологии (рис. 4*c–e*). В процессе этого химического исследования было также установлено наличие известных лигнанов и неолигнанов, в числе которых – (8*S*, 8'*S*)-матаирезинол, пикраквассиозид С, цитрусин В, глелинозид С, 3α-*O*-β-D-глюкопиранозид (+)-лионирезинола, диглюкозид сирингарезинола и глюкозид 8,8'-бисдигидросирингенина [17].

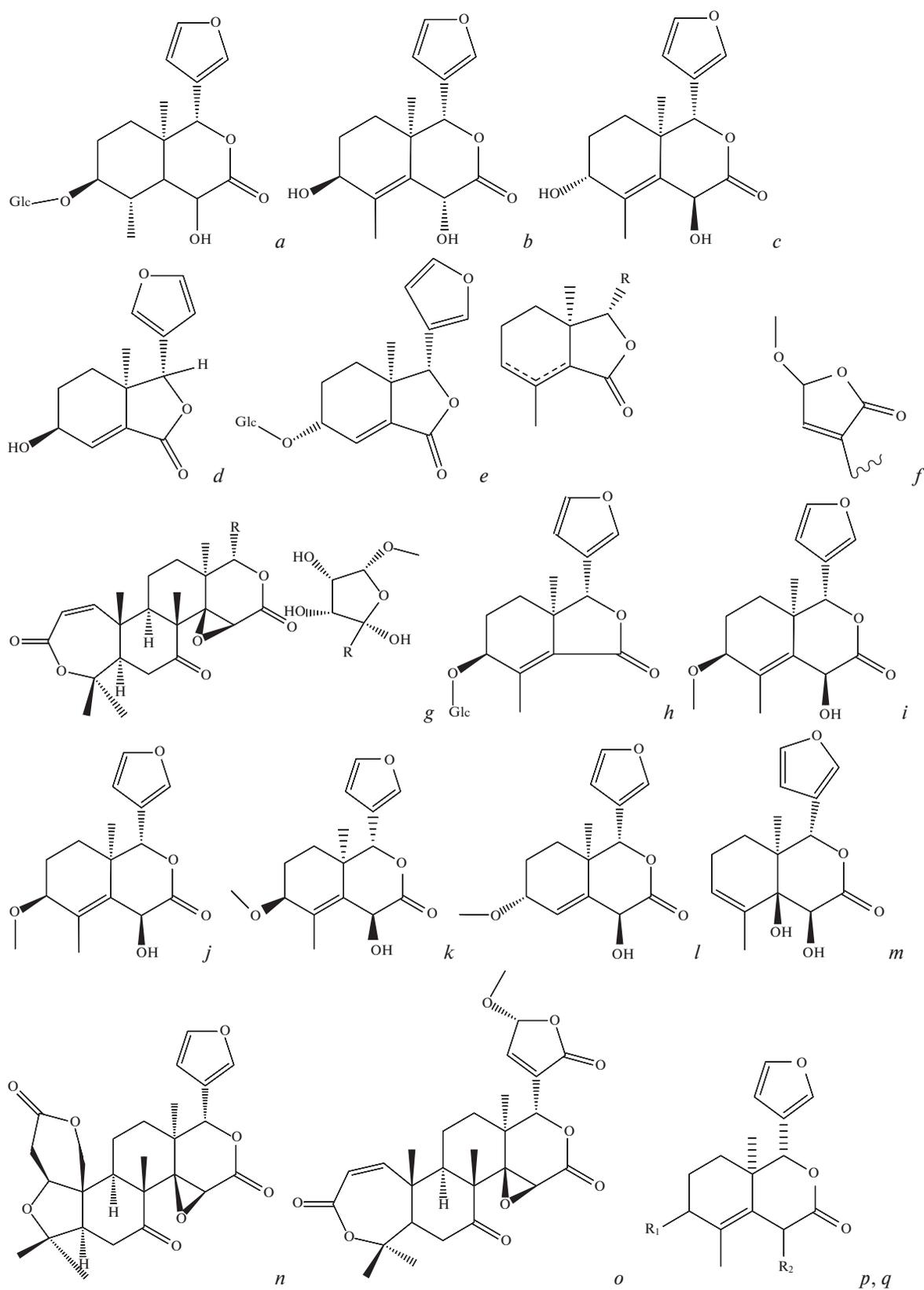
Продолжение химического изучения коры корней привело к обнаружению новых фенолпропаноидов, получивших названия – дазикар-этер и дазикар-эстер (рис. 4*f, g*). Их структуры были определены как (1*S*,2*S*)-1-(2, диметил)-2*H*-хромен-6-ил)пропан-1,2-диол и (*E*)-метил-4-[4-(*E*)-метокси-3-оксопроп-1-енил]феноксид-2-метилбут-2-еноат (соответственно). Кроме того, было установлено наличие ряда известных фенольных соединений, в числе которых – магнолол, 6,7-диметокси-4-гидрокси-1-нафтойная кислота, 2-(4"-метокси-3"-гидроксibenзил)-3-(3'-метокси-4'-гидроксibenзил)-γ-бутиролактон, 1-метокси-2-(3-метилбут-2-енил)бензол и (*E*)-метил-4-[4-(*E*)-3-метокси-3-оксопроп-1-енил]феноксид-2-метилбут-2-еноат [33, 34].

КУМАРИНЫ, ФЛАВОНОИДЫ И ДРУГИЕ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИЕ ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

На ранних этапах химического изучения компонентов *Dictamnus dasycarpus* из наземной части и плодов были выделены известные кумарины – псорален и ксантотоксин; в плодах и коре корней были обнаружены скополетин, скополин и остхол [33, 35³, 36⁴]; в коре корней – флавоноиды –

³ Комиссаренко Н.Ф. 1968. Фурукумарины *Dictamnus dasycarpus* — Химия природ. соедин. 6: 377–378.

⁴ Комиссаренко Н.Ф., Левашова И.Г., Надежина Т.Н. 1983. Флавоноиды и кумарины *Dictamnus dasycarpus* — Химия природ. соедин. 4: 529–530.



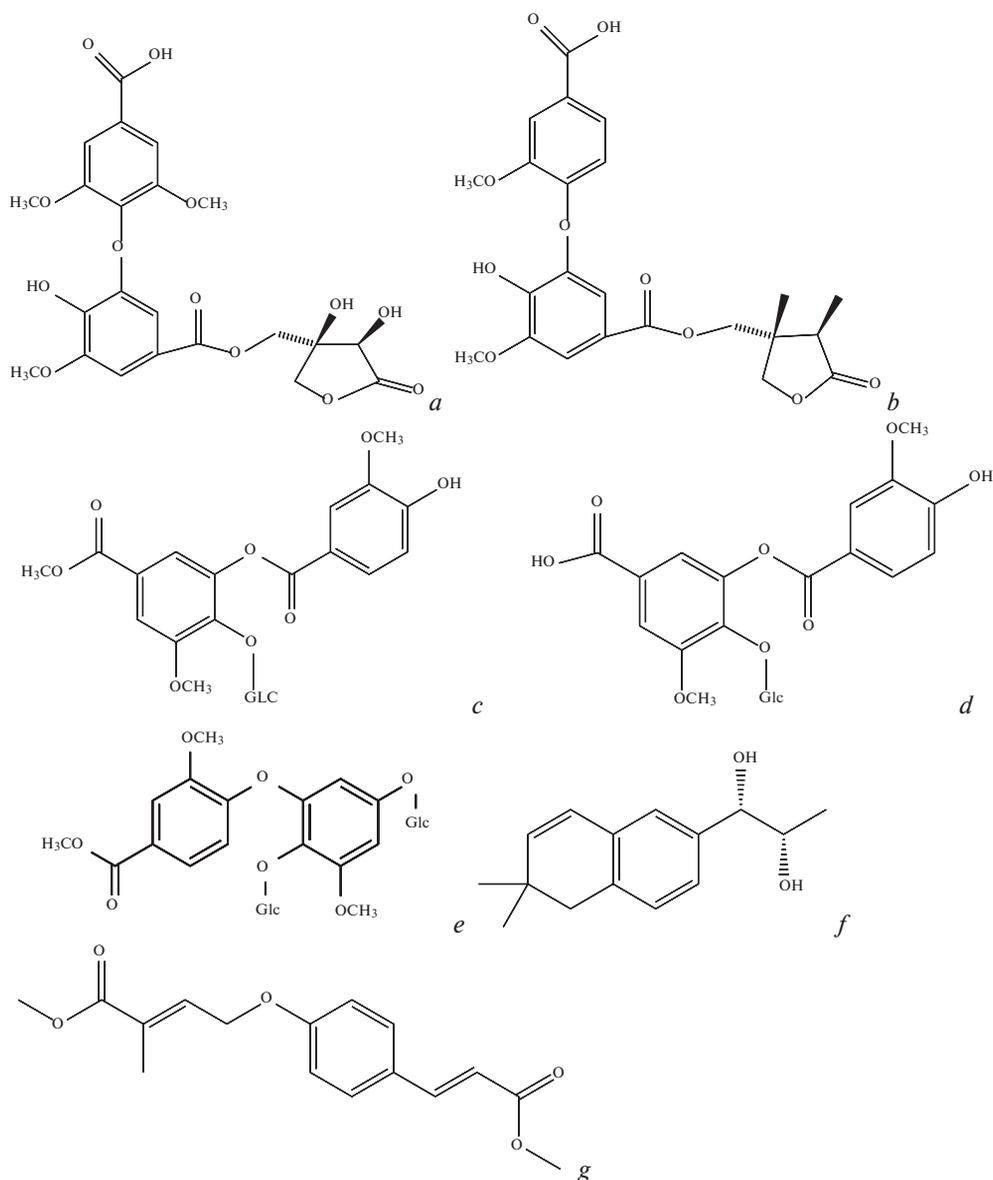


Рис. 4. Новые фенольные соединения, выделенные из *Dictamnus dasycarpus*.

a – дазикарпусфенол кислота А; *b* – дазикарпусфенол кислота В; *c* – диктамфенозид А; *d* – диктамфенозид В; *e* – диктамфенозид С; *f* – дазикарэфтер; *g* – дазикарэфстер (Glc=β-D-глюкопиранозид).

Fig. 4. New phenolic compounds, isolated from *Dictamnus dasycarpus*.

a – dasycarpusphenolacid A; *b* – dasycarpusphenolacid B; *c* – dictamphenoside A; *d* – dictamphenoside B; *e* – dictamphenoside C; *f* – dasycarether; *g* – dasycarester (Glc=β-D-глюкопиранозид).

кверцетин, рутин, лютеолин, нарингенин, диосметин, вогонин; 3'-*O*-метилтаксифолин, 5,7,4'-тригидрокси-3'-метоксиизофлавоон [23, 29, 34].

Исследование этилацетатного экстракта корней привело к выделению новых гетероциклических кислородсодержащих соединений, получивших названия – дазикарпусенэфир А и дазикарпусэфир В (рис. 5*a, b*). Их структуры были определены как метиловый эфир (2*S*)-4-(2,2-диметил-5-оксотетрагидрофуран-3-ил)-2-гидроксипент-3-еновой кислоты и метиловый эфир

(2*R*)-4-(2,2-диметил-5-оксотетрагидрофуран-3-ил)-2-гидроксипентан-3-овой кислоты (соответственно) [37].

В корнях также было установлено наличие нового соединения, названного дазикарпускислотой, химическая структура которого была определена как (2*S*)-4-(2,2-диметил-5-оксотетрагидрофуран-3-ил)-2-гидроксипентан-3-овая кислота (рис. 5*c*) [37]. Другое соединение, получившее название – дазикарпусэфир С, структура которого была установлена как этиловый эфир (2*R*)-4-(2,2-

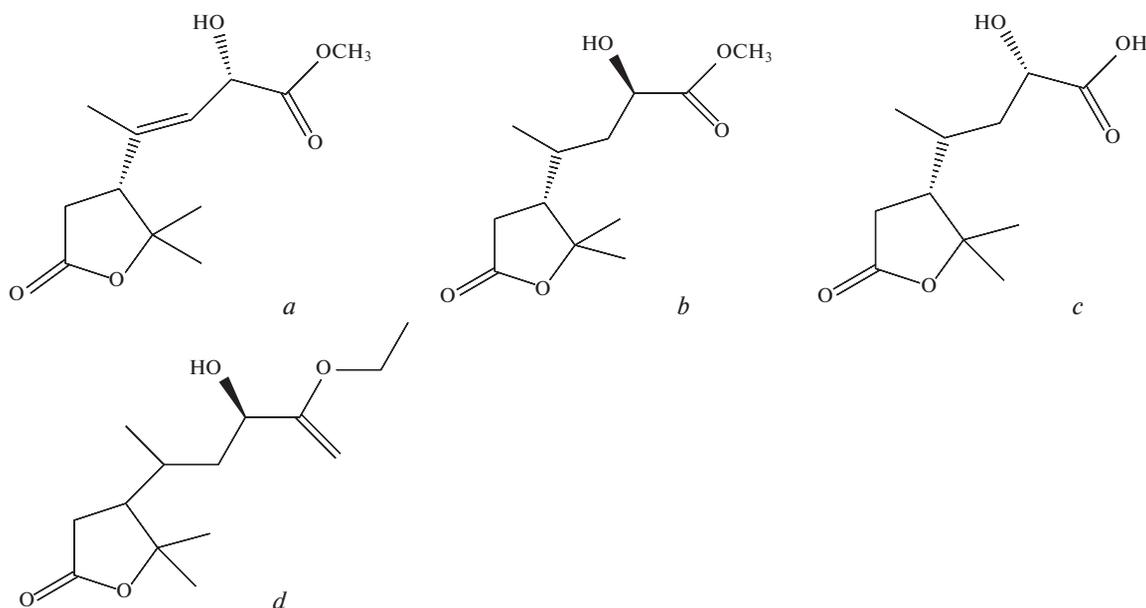


Рис. 5. Новые гетероциклические соединения, выделенные из *Dictamnus dasycarpus*. *a* – дазикарпусенэфир А; *b* – дазикарпусэфир В; *c* – дазикарпускислота С; *d* – этиловый эфир (2*R*)-4-(2,2-диметил-5-оксотетрагидрофуран-3-ил)-2-гидроксипент-3-ановой кислоты.

Fig. 5. New heterocyclic compounds, isolated from *Dictamnus dasycarpus*. *a* – dasycarpusenester A; *b* – dasycarpusester B; *c* – dasycarpusacid; *d* – (2*R*)-4-(2,2-dimethyl-5-oxotetrahydrofuran-3-yl)-2-hydroxypent-3-anoic acid ethyl ether.

диметил-5-оксотетрагидрофуран-3-ил)-2-гидроксипент-3-ановой кислоты) (рис. 5*d*), было обнаружено в коре корней растения. Кроме того, в корнях было установлено наличие 5-гидроксиметилфуральдегида [23, 33, 38].

АЛКАЛОИДЫ

На ранних этапах химических исследований компонентов *Dictamnus dasycarpus* был выделен новый хинолиновый алкалоид, названный дазикарином (рис. 6*a*) [24, 39, 40].

Более поздние исследования коры корней растения привели к выделению новых соединений: пирролидинового алкалоида – диктамнаиндиола и гликозидированного хинолинового алкалоида, структура которого была определена как 3-[1β-гидрокси-2-(β-D-глюкопиранозилокси)этил]-4-метокси-2(1*H*)-хинолинон (рис. 6*b, c*) [15, 23, 37, 41, 42].

Химическое изучение экстрактов Cortex *Dictamnii* привело к обнаружению и установлению химических структур новых гликозидированных алкалоидов, названных диктамалкозидами А, В и С (рис. 6*d–f*), а также выявлению большого числа известных алкалоидов, представленных в табл. 1 [17, 29].

Недавние публикации результатов исследования коры корней также сообщают о выделении новых хинолиновых алкалоидов – дазикаринов А – Г (рис. 6*g–m*). В процессе этих исследова-

ний были определены химические структуры двух новых фурухинолиновых алкалоидов – 1'-оксо-изоплатидесмина и деметоксиacrofilлина, а также установлено наличие оптических изомеров димерного фурухинолинового алкалоида дазикарина А: (+)-дазикарин А и (–)-дазикарин А [33, 43]. Кроме того, исследование коры корней также привело к выделению и установлению структур двух новых фурухинолиновых алкалоидов – 1'-оксоизоплатидесмина и деметоксиacrofilлина (рис. 6*n, o*) [31].

ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ

В составе эфирного масла из коры корней были обнаружены додекановая, тетрадекановая, пентадекановая и пальмитиновая кислоты, а также – гексилловый спирт и (*E,E*)-2,4-декадиеналь [14].

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ *DICTAMNUS DASYCARPUS*

В последние годы большинство работ посвящено изучению механизмов действия экстрактов и соединений на клеточном уровне, обеспечивающих тот или иной вид активности *Dictamnus dasycarpus*.

В эксперименте *in vitro* дазикарин Е, прескиммианин и 4-метокси-1-метил-хинолин-2-он, полученные из коры корня, ингибировали выделение оксида азота (NO) клетками микроглии BV-2,

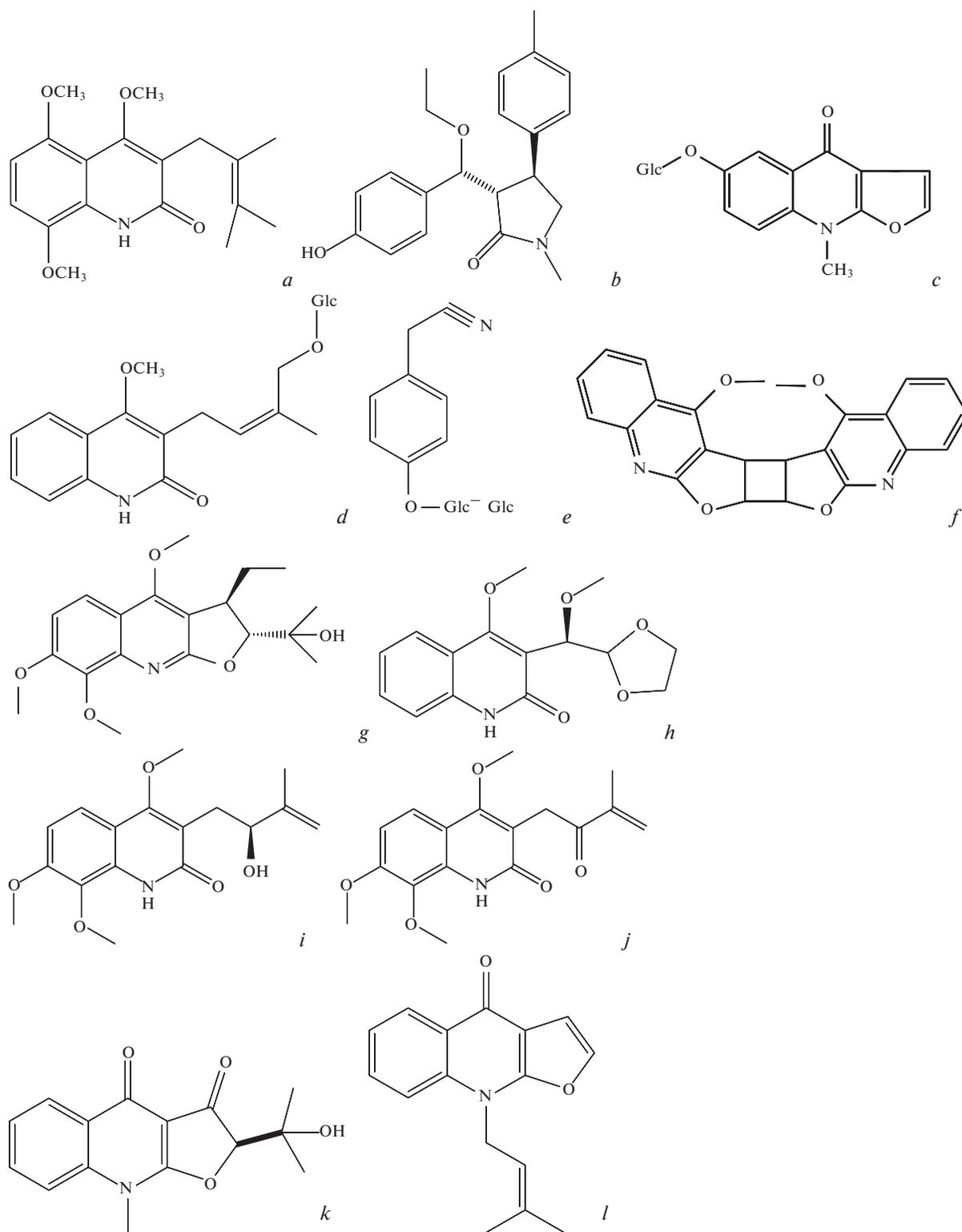


Рис. 6. Новые алкалоиды, выделенные из *Dictamnus dasycarpus*.

a – дазикарин; *b* – диктамнаиндиол; *c* – диктамалкозид А; *d* – диктамалкозид В; *e* – диктамалкозид С; *f* – дазикарин А; *g* – дазикарин В; *h* – дазикарин С; *i* – дазикарин D; *j* – дазикарин E; *k* – 1'-оксо-изолатидесмин; *l* – деметоксиacroфиллин.

Fig. 6. New alkaloids, isolated from *Dictamnus dasycarpus*.

a – dasycarin; *b* – dictamnaindiol; *c* – dictamalkoside A; *d* – dictamalkoside B; *e* – dictamalkoside C; *f* – dasycarine A; *g* – dasycarine B; *h* – dasycarine C; *i* – dasycarine D; *j* – dasycarine E; *k* – 1'-oxo-isoplatidesmin; *l* – demethoxyacrofilline.

Таблица 1. Известные алкалоиды, обнаруженные в *Dictamnus dasycarpus*
Table 1. Known alkaloids detected in *Dictamnus dasycarpus*

Название соединения Name of compound	Часть растения Part of plant	Ссылка Reference
Диктамнин Dictamnin	Корни, надз. ч.; кора корней Cortex <i>Dictamni</i> , roots, root bark	[17, 23, 24, 34, 59]
γ-Фагарин γ-Fagarin	Кора корней; root bark Cortex <i>Dictamni</i>	[17, 34, 42, 59]
О-Этилнордиктамнин O-Ethylnordictamnin	Целое растение Whole plant	[60]
О-Этилнор-γ-фагарин O-Ethylnor-γ-fagarin	»	»
О-Этилнорскиммианин O-Ethylnorskimmianin	»	»
Платидесмин Platydesmin	Кора корней Root bark	[39, 42]
Хаплопин Haplopin	»	[17, 24, 34, 41, 42]
7,8-Диметокси-платидесмин 7,8-Dimethylplatydesmin	Целое растение Whole plant	[10]
Конфусамелин Konfusamelin	»	[10]
8-Гидрокси-9-метилфуоро-[2,3- <i>b</i>]хинолин-4-(9 <i>H</i>)-он 8-Hydroxy-9-methylfuro-[2.3- <i>b</i>]quinolin-4-(9H)-on	Кора корней Root bark	[25]
Скиммианин Skimmianine	Кора корней Root bark	[34, 42]
8-Метокси- <i>N</i> -метилфлиндерсин 8-Methoxy- <i>N</i> -methylflindersine	»	[42]
Прескиммианин Preskimmianin	»	[17, 29, 42]
Изо-γ-фагарин Iso-γ-fagarin	»	[42]
Изомакулозидин Isomaculosidine	»	»
Диктангустин А Dictangustin A	»	»
Кокусагинин Kokusaginine		[57]
Фуоро[2,3- <i>b</i>]хинолин-4-ол Furo[2,3- <i>b</i>]quinoline 4-ol	Кора корней Root bark	[17, 29]
Робустин Robustin	Cortex <i>Dictamni</i>	[17]
3-[1β-Гидрокси-2-(β-D-глюкопиранозилокси)этил]-4-метокси-2(1 <i>H</i>)хинолинон 3-[1β-Hydroxy-2-(β-D-glucopyranosyloxy)ethyl]-4-methoxy-2-(1H)-quinolinone	»	[17]

Таблица 1. Окончание

Название соединения Name of compound	Часть растения Part of plant	Ссылка Reference
Гликолон Glycolone	Кора корней <i>Cortex Dictamni</i>	[17, 34]
8,9-Диметоксигейбалансин 8,9-Dimethoxygeibalansine	Растение Plant	[34]
3-Формилиндол 3-Formylindol	»	»
Индол-3-карбоксальдегид Indol-3-carboxaldehyde	»	[33]
8-Метоксифлиндерсин 8-Methoxyflindersine	»	[34]
7,8-Диметоксимиртопсин 7,8-Dimethoxymyrtopisine	»	»
Метилвый эфир 4-(2-формил-5-метоксиметилпиррол-1-ил)масляной кислоты 4-(2-formyl-5-methoxymethylpyrrol-1-yl)butyric acid methyl ether	»	[33]
Индол-3-карбоксальдегид Indol-3-carboxaldehyde	»	»
8-Гидрокси-9-метил-фуоро [2,3- <i>b</i>]хинолин-4-(9 <i>H</i>)-он 8-Hydroxy-9-methyl-furo[2,3- <i>b</i>]quinoline-4-(9 <i>H</i>)-on		[25]

индуцированными липополисахаридом, со значениями IC_{50} ниже 5.0 мкМ, а дазикарин G, 4-(2-формил-5-метоксиметилпиррол-1-ил) масляной кислоты метилвый эфир, 2-(4"-метокси-3"-гидроксибензил)-3-(3'-метокси-4'-гидроксибензил)- γ -бутиролактон, остхол, 1-метокси-2-(3-метилбут-2-енил)бензол, ((+)-7,8-диметоксимиртопсин, диктамнин, γ -фагарин, скиммианин, 3-хинолинкарбоновая кислота, 2,6-дигидро-2,2,7-триметил-5*H*-пирано[3,2-*c*]хинолин-5-он, 8-метокси-*N*-метилфлиндерсин и 8-метоксифлиндерсин проявляли ингибирование со значениями IC_{50} в диапазоне 7.8–28.4 мкМ [33, 42, 44], диктамтринор-гвайанола В, С и Е; диктамнорсесквитерпенол А, диктамнорсесквитерпенозид С, диктамтритерпенол А, элемол, 8 α ,11-элеодиол, цитрозид А, (3 α ,7 α ,13 α ,17 α ,20*S*,21*S*,23*R*,24*S*)-3-(3-метилбутаноил)-21,23-эпокси-21-метокси-13,30-циклодаммаран-3,7,24,25-тетрол и (3 α ,7 α ,13 α ,17 α ,20*S*,21*R*,23*R*,24*S*)-3-(3-метилбутаноил)-21,23-эпокси-21-метокси-13,30-циклодаммаран-3,7,24,25-тетрол значительно ингибировали выделение NO стимулированными липополисахаридом клетками RAW264.7 [18], дазикарином проявлял сильную противовоспалительную активность (IC_{50} – 1.8 мкМ), подавляя высвобождение воспалительных цитокинов, таких как фактор некроза опухоли α (TNF- α), интерлейкин 6

(IL-6), путем инактивации сигнальных путей NF- κ B [31]; в экспериментах на мышах с контактным дерматитом метанольный экстракт и отвар лиофилизированного экстракта коры корня ингибировали продукцию TNF- α , IFN- γ и IL-6, что приводило к уменьшению эпидермальной гиперплазии, гиперкератоза и спонгиозных изменений, предотвращали увеличение толщины кожи и дальнейшее развитие кожных поражений, при этом в отличие от дексаметазона не влияли на отношение массы селезенки к массе тела [45, 46]. Аналогичное действие производил и метанольный экстракт коры корня в эксперименте на кератиноцитах человека (клетки HaCaT) [47], в эксперименте на модели псориаза, индуцированного имиквимодом (IMQ), на мышах C57BL/6 – экстракт снижал уровень интерлейкинов IL-17 на 44.37% ($p < 0.05$) и количество клеток Th17, секретирующих IL-17, γ DT и Th1, продуцирующих IFN- γ , – на 45.98, 62.21 и 44.42% соответственно ($p < 0.05$) [48]; диктабретол А специфически ингибировал пролиферацию лимфоцитов (Т, В-клеток и макрофагов), блокируя переход клеточного цикла из фазы G₁ в фазу S, что подавляло развитие индуцированного коллагеном ревматоидного артрита [22], диктамлимонол Е, фраксинеллон и дазиллактон А в клетках RAW 264.7 дозозависимо ингибируют индуцированную липо-

полисахаридами продукцию оксида азота (NO) и снижают экспрессию интерлейкина-6 (IL-6), фактора некроза опухоли (TNF- α), а также iNOS, NF- κ B и циклооксигеназы-2 (COX-2) на уровне дексаметазона [30]. Этанольный экстракт листьев в эксперименте на клетках RAW 264.7, обработанных липополисахаридами, подавлял выделение NO в зависимости от концентрации на 10 (0.5 мг/мл) и 33% (1 мг/мл), снижал экспрессию мРНК ключевого фактора транскрипции ядерного фактора- κ B на 7 и 24% соответственно, а также дозозависимо ингибировал экспрессию противовоспалительных цитокинов (TNF- α и IL-1 β) и ферментов (iNOS и COX-2) [8].

Дазикарпусфенол-кислоты А и В проявляли **антиоксидантную активность** с IC₅₀ 28.95 и 41.76 мг/мл соответственно [32].

Лимоноид обакунон, изолированный из высушенной коры корня, дозозависимо способствовал дифференциации остеобластов и минерализации костной ткани, влияя на пути BMP2, β -катехин и RUNX2, что может быть использовано при лечении таких заболеваний, как остеопороз и пародонтит [49].

Алкалоиды диктамнин, робустин и γ -фагарин, выделенные из коры корня, проявляли умеренную противомикробную активность в отношении *Bacillus subtilis*, *Candida albicans* и *Pseudomonas aeruginosa* с МИК 32–64 мкг/мл, что подтверждает обоснованность применения препаратов *D. dasycarpus* для лечения кожных заболеваний [43], этанольный экстракт коры корня проявлял антикокцидийную активность в отношении *Eimeria tenella* [50].

Сесквитерпеновые гликозиды эйдесманового типа, извлеченные из 70%-го этанольного экстракта коры корня (диктамэйдесмозиды В, С, D, диктамнозиды А, В, С, D, К, L) ингибировали накопление триглицеридов в клетках гепатобластомы HepG2 человека [16]. Однако было отмечено, что при превышении рекомендованной дозировки препарата *Baixianpi* (порошка из коры корня *D. dasycarpus*) возникает риск поражения печени [51].

Фраксинеллон эффективно подавлял экспрессию CUGBP1 в фиброзных тканях почек человека и мышей, дозозависимо ингибировал накопление коллагена α 1 (I) в тканях почек мышей, снижал количество гидроксипролина и уменьшал площадь вызванного фоллиевой кислотой фиброза [52].

Тритерпеноиды глабреталового типа, диктабретолы А-D ингибировали пролиферацию активированных Т-клеток (IC₅₀ 1.5 мкМ) в эксперименте *in vitro* на двух клеточных линиях рака поджелудочной железы снижал пролиферацию клеток и вызывал остановку клеточного цикла и их апоптоз, кроме того, предотвращал эпители-

ально-мезенхимальный переход, что отражалось в снижении способности клеток к миграции и инвазии; в исследовании *in vivo* приводил к заметному ингибированию роста опухоли на модели голых мышей с ксенотрансплантатом [53]; диктамнин подавлял рост клеток рака легких *in vitro* и *in vivo*, а также ослаблял активацию сигнальных путей PI3K/AKT/mTOR и митоген-активируемой протеинкиназы (MAPK) путем ингибирования фосфорилирования и активации рецепторной тирозинкиназы c-Met, синергетически улучшал химиочувствительность клеток рака легких, устойчивых к рецептору эпидермального фактора роста и ингибитору тирозинкиназы (EGFR-TKI), к gefитинибу и осимертинибу [54]; диктамнины А и В снижали пролиферацию клеток рака легких линии A549 в фазе G1 с IC₅₀ 29.6 \pm 1.78 и 24.7 \pm 1.13 мкМ [20]; диктамнин снижал миграцию и инвазию, ингибировал пролиферацию клеток HCT116 и способствовал апоптозу клеток HCT116 путем подавления HIF-1 α и Slug [55].

Кихаданин D, выделенный из метанольного экстракта коры корня, проявлял цитотоксическую активность в отношении трех линий раковых клеток человека: MDA-MB-231, A549 и HT29 со значениями IC 2 16.22, 21.72 и 31.06 мкмоль \cdot L соответственно [29]; метанольный экстракт коры корня дозозависимо ингибировал рост атипичных железистых клеток (AGS), при этом увеличивалось количество клеток с развивающимся апоптозом в фазе sub-G1 [56]; кокусагинин продемонстрировал сильное ингибирующее действие на сублинию клеток рака молочной железы MCF-7 с множественной лекарственной устойчивостью MCF-7/ADR (до 63.29% при концентрации 24 мкмоль за 24 ч) и сублинию с множественной лекарственной устойчивостью к MDA-MB-231 – MDA-MB-231/ADR, дозозависимо индуцировал апоптоз в клетках MCF-7/ADR (до 63.29% при концентрации 24 мкмоль за 24 ч), снижал уровни мРНК и белка P-гр и подавлял функцию P-гр, особенно в клетках MCF-7/ADR. Кроме того, было показано, что кокусагинин ингибирует сборку тубулина и связывание колхицина с тубулином за счет непосредственного связывания с тубулином и влияет на образование тубулина *in vitro* [57].

Эфирное масло корня при контакте со взрослыми особями табачного жука *Lasioderma serricorne* и сеноеда *Liposcelis bostrychophila* оказывало на них сильное токсическое действие (LD₅₀ – 12.4 мкг/особь и 27.2 мкг/см² соответственно) и проявляло репеллентную активность в отношении этих видов насекомых, живущих в продуктах питания [58].

Таким образом, результаты изучения компонентного состава и биологической активности *Dictamnus dasycarpus* свидетельствуют о перспек-

тивности дальнейших исследований этого вида и возможности использования его в качестве сырья для создания новых лекарственных препаратов, актуальных для лечения ревматологических и онкологических заболеваний.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госзадания Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (тема “Сосудистые растения Евразии: систематика, флора, растительные ресурсы” № АААА-А19-119031290052-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

см. REFERENCES.

Secondary Metabolites and Biological Activity of *Dictamnus dasycarpus* (Rutaceae)

L. M. Belenovskaya^a, N. V. Bitjukova^a, *

^aKomarov Botanical Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: NBityukova@binran.ru

Abstract—The proposed article is a review of the literature data on the results of chemical and pharmacological studies of *Dictamnus dasycarpus* Turcz. and its secondary metabolites such as terpenoids, limonoids, coumarins, flavonoids and alkaloids, as well as phenolic compounds. Structural formulas are given for new compounds. Various aspects of the biological activity of the plant and its components are considered.

Keywords: *Dictamnus dasycarpus*, Rutaceae, terpenoids, limonoids, coumarins, phenolic compounds, biological activity

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of state assignments to the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences (no. АААА-А19-119031290052-1).

REFERENCES

1. Vvedenskiy A.I. 1949. Fam. Rutaceae. — In: Flora URSS, Vol. XIV. Moscow-Leningrad, p. 229. (In Russian)
2. [Plant Resources of Russia: Wild flowering plants and their component composition and biological activity. Family Fabaceae—Apiacea]. 2010. V. 3. St. Petersburg; Moscow. 602 p. (In Russian)
3. Lv M., Xu P., Tian Y., Liang J., Gao Y., Xu F., Zhang Z., Sun J. 2015. Medicinal uses, phytochemistry and pharmacology of the genus *Dictamnus* (Rutaceae). — J. Ethnopharmacol. 171: 247–263. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.05.053>
4. Qin Y., Quan H.F., Zhou X.R., Chen S.J., Xia W.X., Li H., Huang H.L., Fu X.Y., Dong L. 2021. The traditional uses, phytochemistry, pharmacology and toxicology of *Dictamnus dasycarpus*: a review. — J. Pharm. Pharmacol. 73(12): 1571–1591. <https://doi.org/10.1093/jpp/rgab141>
5. Lee W.J., Kim H.W., Lee H.Y., Son C.G. 2015. Systematic review on herb-induced liver injury in Korea. — Food Chem. Toxicol. 84: 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.06.004>
6. Peng X., Shuai-Shuai C., Di S., Jing-Xiao Z., Ya-Lei L., Yu-Ming G., Zhao-Fang B., Hai-Ping Z., Jia-Bo W., Xiao-He X. 2020. [Clinical cases and experimental evaluation of liver injury related to anti-psoriasis Keyin Pills]. — Zhongguo Zhong Yao Za Zhi. 45(20): 5017–5023. <https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20200302.507> (In Chinese)
7. Zhou H., Liu Q., Zhang J., Yao J., Wang C., Zhang Y., Li Y., Zhang X., Zhang L. 2020. Cytochrome P450-mediated bioactivation: implication for the liver injury induced by fraxinellone, a bioactive constituent from Dictamni Cortex. — Chem. Res. Toxicol. 33(7): 1960–1968. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.0c00141>
8. Ghosh C., Hong B., Batabyal S., Jeon T.I., Yang S.H., Hwang S.G. 2014. Anti-inflammatory activity of the ethanol extract of *Dictamnus dasycarpus* leaf in lipopolysaccharide-activated macrophages. — BMC Complement Altern. Med. 14: 330. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-14-330>
9. Takeuchi N., Fujita T., Goto K., Morisaki N., Osone N., Tobinaga S. 1993. Dictamnol, a new trinor-guaiane type sesquiterpene, from the roots of *Dictamnus dasycarpus* Turcz. — Chem. Pharm Bull. 41(5): 923–925. <https://doi.org/10.1248/cpb.41.923>

10. Zhao W., Wolfender J.L., Hostettmann K., Li H.Y., Stoecli-Evans H., Xu R., Qin G. 1998a. Sesquiterpene glycosides from *Dictamnus dasycarpus*. – *Phytochemistry*. 47(1): 63–68.
[https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(97\)00542-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(97)00542-6)
11. Chang J., Xuan L.J., Xu Y.M., Zha J.Sh. 2001. Seven new sesquiterpene glycosides from the root bark of *Dictamnus dasycarpus*. – *J. Nat. Prod.* 64(7): 935–938.
<https://doi.org/10.1021/np000567t>
12. Zhao W., Wang S., Qin G., Xu R., Hostettmann K. 2001. Dictamninsides F and G.— two novel sesquiterpene diglycosides with α -configuration glucose units from *Dictamnus dasycarpus*. – *Indian J. Chem. Sect. B: Org. Chem. Incl. Med. Chem.* 40B (8): 748–750.
<https://doi.org/10.1002/chin.200149148>
13. Wu Q., Ye Ch., Song P., Han W. 2007. [Analysis of volatile oil in *Dictamnus dasycarpus* Turcz. by SPME-GC-MS]. – *Shizhen Guoyi Guoyao*. 18(1): 137–139; *Chem. Abstr.* 2009. 151: 204843. (In Chinese)
14. Lei J., Yu J., Yu H., Liao Z. 2008. Composition, cytotoxicity and antimicrobial activity of essential oil from *Dictamnus dasycarpus*. – *Food Chem.* 107(3): 1205–1209.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.09.050>
15. Guo L.N., Pei Y.H., Chen G., Lu X., Xu H., Liu J.C. 2012a. Two new compounds from *Dictamnus dasycarpus*. – *J. Asian Nat. Prod. Res.* 14(2): 105–110.
<https://doi.org/10.1080/10286020.2011.628316>
16. Yang S., Li Z., Wang J., Ruan J., Zheng C., Huang P., Han L., Zhang Y., Wang T. 2018. Eudesmane-type sesquiterpene glycosides from *Dictamnus dasycarpus* Turcz. – *Molecules*. 23(3): 642.
<https://doi.org/10.3390/molecules23030642>
17. Yang S., Sun F., Ruan J., Yan J., Huang P., Wang J., Han L., Zhang Y., Wang T. 2019. Antiinflammatory constituents from Cortex Dictamni. – *Fitoterapia* 134 465–473.
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2019.03.026>
18. Zheng D., Sun F., Wang H., Yang J., Yang Sh., Ruan J., He W., Wang J., Guo Y., Zhang Y., Wang T. 2019. Isoprenoids obtained from Cortex Dictamni and their nitric oxide inhibitory activity. – *Fitoterapia* 139. 104358.
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2019.104358>
19. Chen H.Y., Hu Z.Y., Tang C.P., Quinn R.J., Feng Y., Yao Sh., Ye Y. 2013. Dictamins A–C, three unprecedented apotirucallane-type trinortriterpenoids from *Dictamnus dasycarpus*. – *Tetrahedron Lett.* 54: 4150–4153.
<http://doi.org/10.1016/j.tetlet.2013.05.130>
20. Bai Y., Jin X., Jia X., Tang W., Wang X., Zhao Y. 2014a. Two new apotirucallane-type isomeric triterpenoids from the root bark of *Dictamnus dasycarpus* with their antiproliferative activity – *Phytochem. Lett.* 10: 118–122.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.phytol.2014.06.017>
21. Kim N., Cho K.W., Hong S.S., Hwang B.Y., Chun T., Lee D. 2015. Antiproliferative glabretal-type triterpenoids from the root bark of *Dictamnus dasycarpus* – *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 25(3): 621–625.
<https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2014.12.007>
22. Choi S.P., Choi C.Y., Park K., Kim N., Moon H.S., Lee D., Chun T. 2016. Glabretal-type terpenoid from the root bark of *Dictamnus dasycarpus* ameliorates collagen-induced arthritis by inhibiting Erk-dependent lymphocyte proliferation. – *J. Ethnopharmacol.* 178: 13–16.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jep.2015.10.043>
23. Bai Y.Y., Tang W.Z., Wang X.J. 2014b. [Chemical constituents from root bark of *Dictamnus dasycarpus*]. – *Zhong Yao Cai*. 37(2): 263–265. (In Chinese)
24. Zhao W., Wolfender J.L., Hostettmann K., Xu R., Qin G.W. 1998b. Antifungal alkaloids and limonoid derivatives from *Dictamnus dasycarpus*. – *Phytochemistry*. 47(1): 7–11.
[https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(97\)00541-4](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(97)00541-4)
25. Chang J., Xuan L.J., Xu Y.M., Zhang J.S. 2002. Cytotoxic terpenoid and immunosuppressive phenolic glycosides from the root bark of *Dictamnus dasycarpus*. – *Planta medica*. 68(5): 425–429.
<http://dx.doi.org/10.1055/s-2002-32077>
26. Du Ch., Yang X., Tu P. 2005. [Studies on chemical constituents in bark of *Dictamnus dasycarpus*]. – *Zhongguo Zhong-yao Zazhi*. V. 30(21): 1663–1666; *Chem. Abstr.* 2007(147): 318318.
27. Yoon J.S., Sung S.H., Kim Y.C. 2008. Neuroprotective limonoids of root bark of *Dictamnus dasycarpus*. – *J. Nat. Prod.* 71(2): 208–211.
<https://doi.org/10.1021/np070588o>
28. Wang L.L., Jiang C.S., Fu Y., Chen F.F., Lan L.F., Zhang H.Y., Guo Y.W. 2014. Two new limonoids from the root bark of chinese medicinal plants *Dictamnus dasycarpus*. – *Helv. Chim. Acta.* 97(9): 1301–1306.
<https://doi.org/10.1002/hlca.201400027>
29. Guo X.X., Zhao L.N., Wang J., Liu S., Bi Q.R., Wang Z., Tan N.H. 2018. [Chemical constituents from root barks of *Dictamnus dasycarpus* and their cytotoxic activities]. – *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi*. 43(24): 4869–4877.
<https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20180926.002> (In Chinese)

30. Chen Y., Ruan J., Sun F., Wang H., Yang S., Zhang Y., Yan J., Yu H., Guo Y., Zhang Y., Wang T. 2020. Anti-inflammatory limonoids from Cortex Dictamni. – *Front. Chem.* 8: 73.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00073>
31. Gao P., Wang L., Zhao L., Lu Y.Y., Zeng K.W., Zhao M.B., Jiang Y., Tu P.F., Guo X.Y. 2021. Rapid identification, isolation, and evaluation on anti-neuroinflammatory activity of limonoids derivatives from the root bark of *Dictamnus dasycarpus*. – *J. Pharm. Biomed. Anal.* 200: 114079.
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114079>
32. Guo L.N., Pei Y.H., Xie F.X., Liu L., Cong H., Cui H.X., Wang X.L., Li W.J., Jian B.Y., Liu J.C. 2016. Identification of antioxidant activity of two aromatic ring butyrolactone derivatives from *Dictamnus dasycarpus* Turcz. – *Chin. J. Nat. Med.* 14(11): 876–880.
[https://doi.org/10.1016/S1875-5364\(16\)30105-4](https://doi.org/10.1016/S1875-5364(16)30105-4)
33. Gao P., Wang L., Zhao L., Zhang C., Zeng K.W., Zhao M.B., Zhang Q.Y., Jiang Y., Tu P.F., Guo X.Y. 2020a. Three new compounds from *Dictamnus dasycarpus* and their anti-inflammatory activities. – *J. Asian Nat. Prod. Res.* 22(8): 716–723.
<https://doi.org/10.1080/10286020.2019.1620213>
34. Yan Y., Liu X., Zhang L., Wang Y., Chen Q., Chen Z., Xu L., Liu T. 2020. Chemical constituents from *Dictamnus dasycarpus* Turcz. – *Biochem. Syst. Ecol.* 93: 104134.
<https://doi.org/10.1016/j.bse.2020.104134>
35. Komissarenko N.F. 1968. Furocoumarins of *Dictamnus dasycarpus*. – *Chem. Nat. Compd.* 4(6): 319.
<https://doi.org/10.1007/BF00569816>
36. Komissarenko N.F., Levashova I.G., Nadezhina T.N. 1983. Flavonoids and coumarins of *Dictamnus dasycarpus*. – *Chem. Nat. Compd.* 19(4): 502.
<https://doi.org/10.1007/BF00575725>
37. Guo L.N., Pei Y.H., Chen G., Lu X., Xu H., Liu J.C. 2012b. Three new compounds from *Dictamnus dasycarpus*. – *J. Asian Nat. Prod. Res.* 14(3): 210–215.
<https://doi.org/10.1080/10286020.2011.628316>
38. Zhang J.L., Song S.C., Liu J.C., Ni P.H., Liu L., Ma Y.K., Sun Y., Liu Q., Guo L.N. 2019. Chemical constituents from the root bark of *Dictamnus dasycarpus* Turcz. (Rutaceae) and their chemotaxonomic significance. – *Biochem. Syst. Ecol.* 86: 103931.
<https://doi.org/10.1016/j.bse.2019.103931>
39. Wu T.S., Wang L.M., Shyur H.J., Leu Y.L., Chan Y.Y., Teng C.M., Kuo S.C. 1994. Chemical constituents and bioactive principles from the root bark of *Dictamnus dasycarpus*. – *Chin. Pharm. J. (Taipei)*. 46(5): 447–455.
40. Chen J., Tang J.S., Tian J., Wang Y.P., Wu F.E. 2000a. Dasycarin, a new quinoline alkaloid from *Dictamnus dasycarpus*. – *Chin. Chem. Lett.* 11(8): 707–708.
41. Jeong G.S., Byun E., Li B., Lee D.S., An R.B., Kim Y.C. 2010. Neuroprotective effects of constituents of the root bark of *Dictamnus dasycarpus* in mouse hippocampal cells. – *Arch. Pharm. Res.* 33(8): 1269–1275.
<https://doi.org/10.1007/s12272-010-0818-9>
42. Yoon J.S., Jeong E.J., Yang H., Kim S.H., Sung S.H., Kim Y.C. 2012. Inhibitory alkaloids from *Dictamnus dasycarpus* root barks on lipopolysaccharide-induced nitric oxide production in BV2 cells. – *J. Enzyme Inhib. Med. Chem.* 27(4): 490–494.
<https://doi.org/10.3109/14756366.2011.598151>
43. Tian M.Y., Bao J., Li X., Zhang Q.R., Li S.S., Gan M.L., Wang S.J. 2021. Antimicrobial alkaloids from the root bark of *Dictamnus dasycarpus*. – *Asian Nat. Prod. Res.* 30: 1–7.
<https://doi.org/10.1080/10286020.2021.1939311>
44. Gao P., Wang L., Zhao L., Zhang Q.Y., Zeng K.W., Zhao M.B., Jiang Y., Tu P.F., Guo X.Y. 2020b. Anti-inflammatory quinoline alkaloids from the root bark of *Dictamnus dasycarpus*. – *Phytochemistry*. 172: 112260.
<https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112260>
45. Kim H., Kim M., Kim H., Lee G.S., An W.G., Cho S.I. 2013. Anti-inflammatory activities of *Dictamnus dasycarpus* Turcz., root bark on allergic contact dermatitis induced by dinitrofluorobenzene in mice. – *J. Ethnopharmacol.* 149(2): 471–477.
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.06.055>
46. Yang B., Lee H.B., Kim S., Park Y.C., Kim K., Kim H. 2017. Decoction of *Dictamnus dasycarpus* Turcz. Root Bark Ameliorates Skin Lesions and Inhibits Inflammatory Reactions in Mice with Contact Dermatitis. – *Pharmacogn. Mag.* 13(51): 483–487.
<https://doi.org/10.4103/0973-1296.211034>
47. Han H.Y., Ryu M.H., Lee G., Cheon W.J., Lee C., An W.G., Kim H., Cho S.I. 2015. Effects of *Dictamnus dasycarpus* Turcz., root bark on ICAM-1 expression and chemokine productions *in vivo* and *in vitro* study. – *J. Ethnopharmacol.* 159: 245–252.
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.11.020>
48. Choi M., Yi J.K., Kim S.Y., Ryu J.H., Lee J., Kwon W., Jang S., Kim D., Kim M., Kim H., Kim S.H., Choi S.K., Ryoo Z.Y. 2019. Anti-inflammatory effects of a methanol extract of *Dictamnus dasycarpus* Turcz. root bark on imiquimod-in-

- duced psoriasis. – BMC Complement. Altern. Med. 19(1): 347.
<https://doi.org/10.1186/s12906-019-2767-2>
49. Park K.R., Kim S., Cho M., Yun H.M. 2021. Limonoid triterpene, obacunone increases runt-related transcription factor 2 to promote osteoblast differentiation and function. – Int. J. Mol. Sci. 22(5): 2483.
<https://doi.org/10.3390/ijms22052483>
50. Hong S., Lee H.A., Kim D.W., Oh G.W., Kim O. 2014. Anticoccidial effects of the root bark of *Dictamnus dasycarpus* Turcz. extract on experimental *Eimeria tenella* infection. – Lab. Anim. Res. 30(4): 169–173.
<https://doi.org/10.5625/lar.2014.30.4.169>
51. Huang Y.X., Guo Y.M., Zhou Y.F., Zhang C.E., Jing J., Liu S.J., Zhang N.N., Song J.Y., Xiao X.H., Wang J.B. 2017. [Dictamni Cortex powder-induced liver injury based on integrated evidence chain] – Zhongguo Zhong Yao Za Zhi. 42(3): 600–606.
<https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.2017.0015> (In Chinese)
52. Zheng B., Yuan M., Wang S., Tan Y., Xu Y., Ye J., Gao Y., Sun X., Wang T., Kong L., Wu X., Xu Q. 2021. Fraxinellone alleviates kidney fibrosis by inhibiting CUG-binding protein 1-mediated fibroblast activation. – Toxicol. Appl. Pharmacol. 420: 115530.
<https://doi.org/10.1016/j.taap.2021.115530>
53. Zhang Z.Q., Xuan W.L., Huang Y., Ren S., Wulan T.Y., Song Y., Xue D.B., Zhang W.H. 2022. Dictamnine inhibits pancreatic cancer cell growth and epithelial-mesenchymal transition by blocking the PI3K/AKT signaling pathway. – Neoplasma. 69(3): 603–619.
https://doi.org/10.4149/neo_2022_211016N1474
54. Yu J., Zhang L., Peng J., Ward R., Hao P., Wang J., Zhang N., Yang Y., Guo X., Xiang C., An S., Xu T.R. 2022. Dictamnine, a novel c-Met inhibitor, suppresses the proliferation of lung cancer cells by downregulating the PI3K/AKT/mTOR and MAPK signaling pathways. – Biochem. Pharmacol. 195: 114864.
<https://doi.org/10.1016/j.bcp.2021.114864>
55. Wang J.Y., Wang Z., Li M.Y., Zhang Z., Mi C., Zuo H.X., Xing Y., Wu Y.L., Lian L.H., Xu G.H., Piao L.X., Ma J., Jin X. 2018. Dictamnine promotes apoptosis and inhibits epithelial-mesenchymal transition, migration, invasion and proliferation by downregulating the HIF-1 α and Slug signaling pathways. – Chem. Biol. Interact. 296: 134–144.
<https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.09.014>
56. Park H.S., Hong N.R., Ahn T.S., Kim H., Jung M.H., Kim B.J. 2015. Apoptosis of AGS human gastric adenocarcinoma cells by methanolic extract of *Dictamnus*. – Pharmacogn. Mag. 11(Suppl 2): S329–336.
<https://doi.org/10.4103/0973-1296.165994>
57. Chen H., Li S., Wang S., Li W., Bao N., Ai W. 2018. The inhibitory effect of kokusaginine on the growth of human breast cancer cells and MDR-resistant cells is mediated by the inhibition of tubulin assembly. – Bioorg. Med. Chem. Lett. 28(14): 2490–2492.
<https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2018.05.059>
58. Yang K., Guo S.-S., Geng Z.-F., Du S.-S., Wang C.-F., Deng Z.-W. 2015. Contact toxicity and repellency of the essential oil of *Dictamnus dasycarpus* roots from China against two stored-product insects. – Chem. Biodivers. 12(6): 980–986.
<https://doi.org/10.1002/cbdv.201400262>
59. Mizuta M., Kanamori H. 1985. Mutagenic activities of dictamnine and gamma-fagarine from dictamni radice cortex (Rutaceae). – Mutat. Res. 144(4): 221–225.
[https://doi.org/10.1016/0165-7992\(85\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0165-7992(85)90054-5)
60. Lin T.P., Shieh B. 1986. Furoquinoline alkaloids from pal-shen pi (*Dictamnus dasycarpus* Turcz.) in Rutaceae. – Hua Hsueh. 44(3): 96–100; Chem. Abstrs. 1987. 106: N 30033

**СТАТЬИ И СООБЩЕНИЯ
РЕСУРСЫ ПОЛЕЗНЫХ РАСТЕНИЙ
И РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ**

**ОЦЕНКА НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ *ABIES SIBIRICA* (PINACEAE)
НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ
(РЕСПУБЛИКА КОМИ)**

© 2022 г. С. И. Тарасов¹, Н. В. Герлинг¹, *

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, г. Сыктывкар, Россия

*e-mail: gerling@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 04.05.2022 г.

После доработки 06.06.2022 г.

Принята к публикации 20.06.2022 г.

В задачи настоящего исследования входило: 1) получить аллометрические зависимости, связывающие морфометрические показатели и биомассу фракций надземной части деревьев пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), 2) выяснить применимость данных уравнений для оценки биомассы фракций деревьев пихты, произрастающих в различных климатогеографических районах, 3) оценить неопределенность оценки отдельных фракций биомассы. Для реализации поставленных задач в четырех районах таежной зоны Республики Коми, отличающихся лесорастительными условиями, были отобраны 47 модельных деревьев пихты сибирской. Единые аллометрические уравнения, связывающие биомассу фракций надземной части дерева пихты с высотой дерева и его диаметром на высоте груди, получены для абсолютно сухой биомассы древесины ствола (без коры), коры ствола, ветвей и хвои. Показано, что уравнения пригодны для оценки биомассы фракций дерева пихты, по крайней мере в пределах региона, где проводились исследования. Дана оценка неопределенности величин надземной биомассы фракций на основе видового числа.

Ключевые слова: *Abies sibirica*, морфометрические параметры дерева, биомасса, аллометрические уравнения, лесорастительные условия, Республика Коми

DOI: 10.31857/S0033994622030128

На Северо-Востоке европейской части России (Республика Коми) пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) является одной из лесобразующих пород темнохвойной тайги. В равнинной части южной тайги и южной части средней тайги на территории Республики Коми пихтовые леса отмечены по всем долинам в бассейнах рек Вычегды, Лузы и Летки. Довольно широко распространены пихтовые леса в предгорьях и на склонах Уральского хребта, в особенности в верхней части лесного пояса [1]. Самые северные древостои с участием пихты можно встретить на Приполярном Урале, в верховьях рек Маньи и Народы [2].

Хотя пихта сибирская не входит в число пород, представляющих интерес для лесной промышленности, она, являясь участником круговорота веществ в лесных экосистемах, оказывает непосредственное влияние на их состояние и функционирование. Оценка степени этого влияния определяется количественными характеристиками биологического круговорота веществ, одной из которых является запас органического вещества или биомасса деревьев и древостоев. Исследования по оценке биомассы пихты сибирской в

условиях европейского Севера отсутствуют [3]. В совокупности это определило выбор пихты сибирской как объекта исследования.

Наиболее практикуемым методом для определения запасов органического вещества древостоя в лесных экосистемах является метод модельного дерева, который включает разделение дерева на фракции, отбор аликвот, определение абсолютно сухой массы фракций и нахождение аллометрических уравнений для оценки биомассы отдельных фракций. Полученные уравнения используются затем для оценки биомассы древостоя в целом [4–6].

Особый интерес представляет вопрос о влиянии лесорастительных условий на применимость аллометрических моделей. Мнения по этой проблеме различны. Так, в одной из работ [7] показано, что единая модель для оценки надземной биомассы сохраняется для всех типов тропической растительности, при этом не выявлено влияния региональных различий или факторов окружающей среды. В тоже время, отмечается [8], что необходимо проявлять осмотрительность при применении модельных уравнений к другим террито-

Таблица 1. Районы проведения исследования и координаты мест отбора модельных деревьев *Abies sibirica*
Table 1. Study regions and location of *Abies sibirica* model tree selection sites

№ ППП № PSP	Административный район Administrative district	Координаты места Site coordinates	Число модельных деревьев Number of model trees
1	Прилузский Priluzsky	60°28'55" N, 49°38'26" E	12
2	Троицко-Печорский Troitsko-Pechora	62°04'18" N, 58°26'33" E	12
3	Княжпогостский Knyazhpogostsky	62°15'50" N, 50°40'39" E	11
4	Вуктыльский Vuktylsky	63°59'39" N, 57°28'33" E	12

риям, другим стадиям развития древостоя и другим диапазонам размеров деревьев. С целью изучения вопроса о возможности использования для оценки биомассы надземных фракций дерева пихты сибирской единых уравнений, сбор фактического материала проводился в четырех географических районах.

Целью работы являлась оценка надземной биомассы дерева *Abies sibirica* и подбор аллометрических уравнений, связывающих надземную биомассу отдельных фракций дерева пихты с его морфометрическими показателями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования были проведены в лесных насаждениях с участием пихты сибирской, расположенных в таежной зоне Северо-Востока европейской части России в Прилузском, Княжпогостском, Троицко-Печорском и Вуктыльском административных районах Республики Коми (табл. 1, рис. 1).

Особенностью выбранных лесных насаждений является приуроченность к поймам рек Печора, Вымь, Луза, Козла-ю. В лесных насаждениях были заложены постоянные пробные площади (ППП) размером 0.25 га. Лесотаксационные описания пробных площадей проводили по стандартной методике [9]. Характеристики древостоев пробных площадей приведены в табл. 2.

По ботанико-географическому районированию территория, где заложены постоянные пробные площади ППП1, ППП2, ППП3, относится к подзоне средней тайги, ППП4 – к подзоне северной тайги [1]. Лесорастительные условия, а именно комплекс климатических, орографических, гидрологических и почвенных факторов, определяющих условия роста лесной растительности и динамику леса в местах отбора модельных деревьев, согласно многолетним исследованиям [10, 11], различаются (табл. 3, 4).

Комплекс климатогеографических условий, соответствующий месту отбора модельных деревьев в

Прилузском климатическом районе (Вычегодско-Мезенская равнина), обозначали как – 1, соответственно, комплекс климатогеографических условий, соответствующий точке отбора модельных деревьев в Печоро-Вычегодском климатическом районе (Печорская низменность), – 2, комплекс климатогеографических условий, соответствующий месту отбора модельных деревьев в Вычегодском климатическом районе (Вычегодско-Мезенская равнина), – 3, комплекс климатогеографических условий, соответствующий месту отбора модельных деревьев в Среднепечорском климатическом районе (Уральский хребет), – 4.

В рамках поставленной в настоящем исследовании проблемы решались следующие задачи: сбор данных по биомассе фракций деревьев пихты сибирской; оценка однородности полученных выборок, подбор аллометрических уравнений, связывающих надземную биомассу отдельных фракций дерева пихты с его морфометрическими показателями, оценка неопределенности результата определения биомассы фракций.

Вблизи пробных площадей было выбрано 47 модельных деревьев пихты сибирской. Отбор моделей проводили в третьем квартале 2017, 2018, 2019 и 2020 гг. Деревья пихты отбирали с диаметрами на высоте 1.3 м, близкими к следующим значениям: 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 см. В среднем было отобрано по 2 дерева каждого диаметра. В надземной биомассе дерева пихты выделяли следующие фракции: ствол (без коры), кора ствола, ветви и хвоя. После рубки дерева измерялась его длина и протяженность кроны (от нижней живой ветви до верхушки). Крону, в зависимости от ее протяженности, разделяли на части (максимально – на 3 части), ветви каждой части взвешивались. Из каждой части отбирали образцы ветвей и хвои. Хвою разделяли по возрастам: хвоя текущего года формирования, хвоя второго года, хвоя третьего года и т.д. Ствол дерева распиливали на фрагменты длиной 1–2 м и взвешивали. От каждого фрагмента ствола отпиливали диск и проводили его взвешивание с корой и без коры (весы WH-C100

Series Micro Crane Scale, Guangzhou WeiHeng Electronics Co., Ltd., стандартная неопределенность результата измерения массы $u(m) = \pm 25.5$ г).

Полученные образцы доставляли в лабораторию для сушки. Все образцы высушивали при 105°C в сушильном шкафу (Binder FD 115, Германия) до прекращения изменения их массы. Затем оценивалась абсолютно сухая масса каждого образца (весы ВЛТ-6100-П, Россия, стандартная неопределенность результата измерения массы $u(m) = \pm 0.15$ г).

Для обозначения переменных в уравнениях соответствующим фракциям надземной биомассы дерева, присваивали следующие индексы: ствол – S , кора – B , ветви – Br , хвоя – N . Значения биомассы фракции обозначали $b_i = \{b_{ij}\}$, где $i = S; B; Br; N$; $j = 1, 2, \dots, n$; n – число деревьев. Переменные, связанные с морфометрическими параметрами обозначали d_j и h_j , где d_j – диаметр j -того дерева на высоте 1.3 м, h_j – высота j -того дерева.

Статистическую проверку гипотезы о принадлежности выборок надземной биомассы фракций дерева пихты к одной генеральной совокупности проводили, следуя имеющимся рекомендациям [12]. Для проверки однородности функций распределения выборок биомассы фракций применяли статистику типа омега-квадрат. Выборки надземной биомассы для каждой фракции дерева пихты, отобранные в разных районах, сравнивались попарно. Сравнение выборок надземной биомассы по каждой фракции проводили на основе непараметрического критерия Лемана–Розенблатта. Критическое значение критерия для уровня значимости $\alpha = 0.05$ равно 0.46.

Дополнительно для сравнения выборок использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). В качестве нулевой гипотезы рассматривали предположение, что фактор климатогеографических условий не оказывает статистически значимого влияния на изменение случайной величины надземной биомассы дерева. Предварительно проверялось соответствие распределений значений переменных в выборках нормальному закону (критерий Колмогорова–Смирнова) и равенство выборочных дисперсий (критерий Левена). Проверка показала, что условия применимости One Factor ANOVA соблюдаются.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Проверка однородности выборочных данных

Поскольку места отбора модельных деревьев относятся к разным климатогеографическим районам, на первом этапе оценивалась возможность объединения имеющихся данных по биомассе отдельных фракций надземной части дерева пихты в единую выборку, объединяющую данные по каждой фракции, полученные в разных районах исследования. Формирование единой выборки значений биомассы каждой фракции означало бы возможность перенесения результатов данного исследования с локального уровня пробной площади на уровень региона. Кроме того, это позволило бы значительно сократить статистическую обработку исходных данных. В рамках математико-статистического моделирования эта проблема сводится к выяснению вопроса, можно ли имеющиеся наборы данных биомассы фракций надземной части дерева пихты из разных районов считать выборками из одной и той же генеральной совокупности.

Результаты попарного сравнения выборок надземной биомассы каждой фракции из разных пунктов исследования, полученные с помощью непараметрического критерия Лемана–Розенблатта ($Z_{0.95}$) показали, что величины критерия Z_{ij} для образцов биомассы стволовой древесины (b_S) находятся в пределах 0.029–0.088, для образцов биомассы коры (b_B) – 0.025–0.110, для образцов биомассы ветвей (b_{Br}) – 0.039–0.096, для образцов биомассы хвои (b_N) – 0.039–0.216 (исключением являлось значение критерия для биомассы хвои 2 и 3 районов исследования, составившее 0.488). Таким образом, поскольку $Z_{ij} < Z_{0.95}$ для всех фракций, нулевая гипотеза H_0 об однородности выборок принимается на уровне 0.05, то есть можно полагать, что выборки каждой фракции надземной биомассы дерева пихты получены из одной генеральной совокупности.

Согласно результатам однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), во всех рассмотренных случаях расчетное значение критерия Фишера ($F = 0.259$ – 0.889) меньше критического ($F < F_{кр}$), что можно интерпретировать как отсутствие статистически значимого влияния фактора ($P = 0.455$ – 0.855) на величины анализируемых параметров объекта исследования – биомассы соответствующих фракций дерева пихты.

Рис. 1. Республика Коми. Расположение мест отбора модельных деревьев: 1 – ППП 1 ($60^\circ 28' 55''$ N, $49^\circ 38' 26''$ E); 2 – ППП 2 ($62^\circ 04' 18''$ N, $58^\circ 26' 33''$ E); 3 – ППП 3 ($62^\circ 15' 50''$ N, $50^\circ 40' 39''$ E); 4 – ППП 4 ($63^\circ 59' 39''$ N, $57^\circ 28' 33''$ E). Красной пунктирной линией обозначена граница Уральских гор.

Fig. 1. The Komi Republic. Sampling locations: 1 – PSP 1 ($60^\circ 28' 55''$ N, $49^\circ 38' 26''$ E); 2 – PSP 2 ($62^\circ 04' 18''$ N, $58^\circ 26' 33''$ E); 3 – PSP 3 ($62^\circ 15' 50''$ N, $50^\circ 40' 39''$ E); 4 – PSP 4 ($63^\circ 59' 39''$ N, $57^\circ 28' 33''$ E). The red dashed line indicates the border of the Ural Mountains.

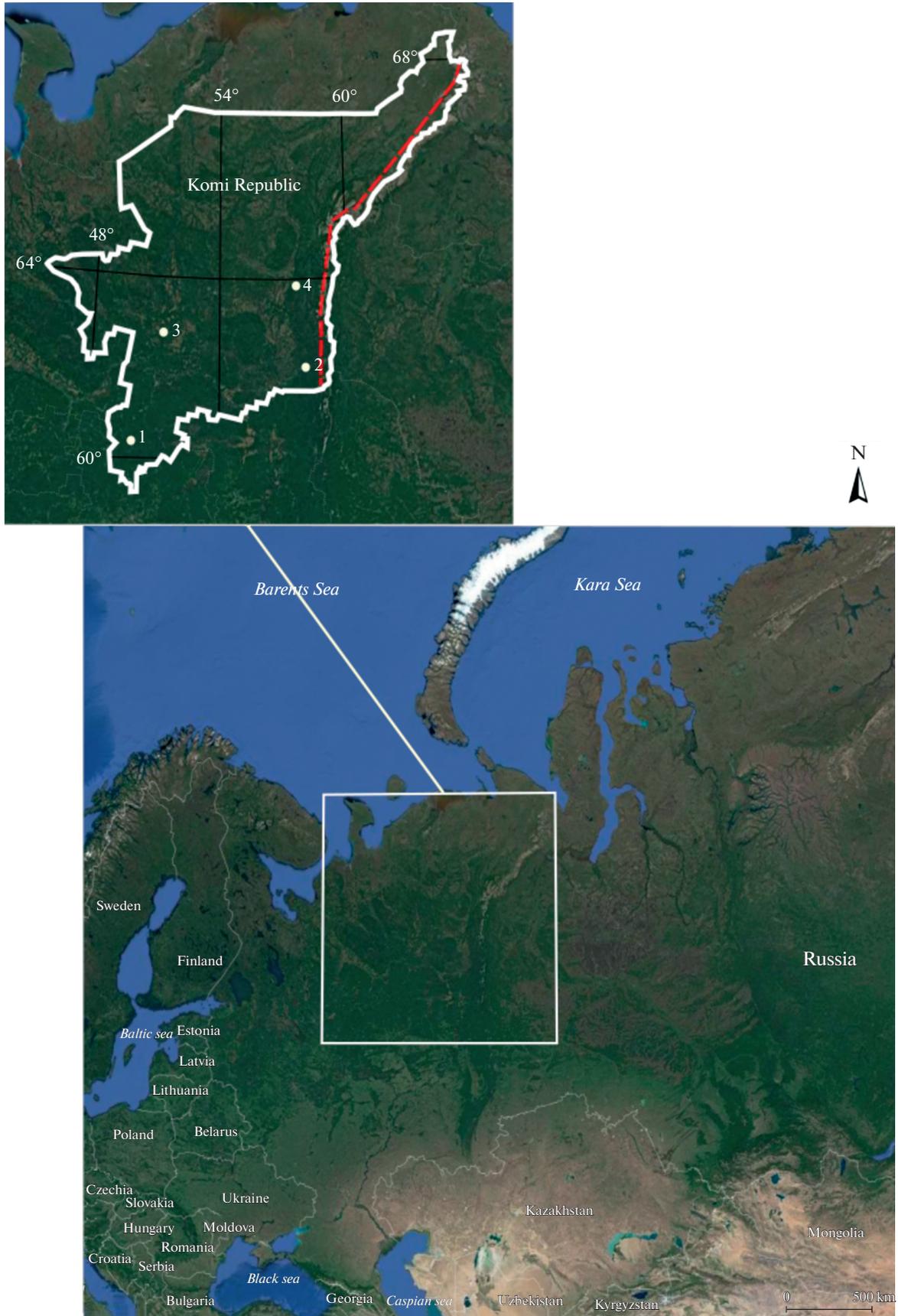


Таблица 2. Лесотаксационные характеристики древостоев на пробных площадях
Table 2. Mensurational characteristics of stands in sample plots

№ ППП № PSP	Класс возраста Age class	Состав Stand composition	Порода Species	Густота, экз./га Density, ind./ha	Запас, м ³ /га Stand volume, m ³ /ha	Средний диаметр, см Mean diameter, cm	Средняя высота, м Average height, m
1	IV	6Пх2Б1С1Е	<i>Abies sibirica</i>	1084	162.6	15.4	18.9
			<i>Betula</i> sp. <i>Pinus sylvestris</i> <i>Picea obovata</i>	152 120 56	52.9 26.8 24.5	36.2 19.1 24.5	23.3 17.3 17.0
Всего Total				1412	226.9		
2		5Е2Пх2К1Б	<i>Picea obovata</i>	479	128	13	10
			<i>Abies sibirica</i>	517	50	13	10
			<i>Pinus sibirica</i>	21	47	44	24
			<i>Betula</i> sp.	21	13	26	18
Всего Total				1038	238		
3	VIII	3Ос3Пх2Е2Б	<i>Populus tremula</i>	145	93.3	31.3	24.9
			<i>Abies sibirica</i>	159	73.1	23.4	24.7
			<i>Picea obovata</i>	309	66.8	18.0	18.8
			<i>Betula</i> sp.	132	49.0	24.7	22.5
Всего Total				745	282.3		
4	VII	5Е3Пх1К1Б	<i>Picea obovata</i>	220	131.3	28.8	19.9
			<i>Abies sibirica</i>	760	82.7	14.3	15.4
			<i>Pinus sibirica</i>	28	27.1	37.1	19.0
			<i>Betula</i> sp.	100	16.0	28.2	16.5
Всего Total				1108	257.1		

Примечание: Пх – пихта сибирская; Б – береза; С – сосна обыкновенная; Е – ель сибирская; К – сосна сибирская; Ос – осина.
Note: Пх – Siberian fir; Б – birch; С – Scots pine; Е – Siberian spruce; К – Siberian pine; Ос – aspen.

Таблица 3. Характеристики климата в местах отбора модельных деревьев пихты сибирской
Table 3. Climatic characteristics of *Abies sibirica* model tree selection sites

№ППП № PSP	Район, климатическая характеристика Region, climatic characteristics	Среднегодовая температура воздуха, °С Average annual air temperature, °С	Число дней со среднесуточной температурой воздуха выше 5 °С Number of days with an average daily temperature above 5 °С	Средне-годовая продолжительность солнечного сияния, часы Average annual duration of sunshine, hours	Среднегодовая сумма осадков, мм Average annual precipitation, mm	Число дней со снежным покровом, дни Number of days with snow cover, days
1	Прилузский район; пояс теплого лета Priluzsky district; warm summer zone	+1–0	>150	>1600	600–700	<180
2	Печоро-Вычегодский район; пояс умеренно теплого лета Pechoro-Vychegodsky district; moderately warm summer zone	–1...–2	130–140	1500–1600	900–1000	220–240
3	Вычегодский район; пояс умеренно теплого лета Vychegodsky district; moderately warm summer zone	0...–1	140–150	1400–1500	500–600	180–190
4	Среднепечорский район; пояс прохладного лета Middle Pechora region; cool summer zone	–2...–3	120–130	<1400	700–800	210–220

В целом, на основании проведенного анализа, по крайней мере для имеющегося множества эмпирических данных, можно заключить, что выборки биомассы фракций дерева пихты, отобранные в разных лесорастительных условиях, однородны. Это позволяет объединить все имеющиеся данные по каждой из фракций надземной биомассы дерева пихты, произрастающей в разных лесорастительных условиях, в одну совокупность с целью создания единой модели биомассы каждой фракции, пригодной для использования во всех климатогеографических подзонах Республики Коми, где проводились исследования.

Выбор регрессионной модели

Основные параметры, измеряемые при таксации древостоев, это диаметр ствола на высоте груди и высота дерева. Следовательно, каждому значению биомассы любой фракции дерева естественно сопоставить значение высоты дерева h_j и значение его диаметра на высоте 1.3 м d_j . Очевид-

но, исключение из модели для оценки биомассы фракции переменной h_j приведет к потере части информации. Наиболее востребованной и апробированной моделью с двумя предикторными переменными является модель вида:

$$b_{ij} = k_i (h_j d_j^2)^{c_i}, \quad (1)$$

где b_{ij} – биомасса фракции, кг абсолютно сухого вещества; d_j – диаметр j -того дерева на высоте 1.3 м, см; h_j – высота j -того дерева, м; k_i, c_i – параметры уравнения; $i = S; B; Br; N$ [5, 6].

На практике расчет коэффициентов регрессионного уравнения (1) показывает, что возможна ситуация, когда коэффициент уравнения k_i близок к нулю. При проверке значимости коэффициентов уравнений это может приводить к формальному принятию нулевой гипотезы $H_0 : k_i = 0$. Чтобы избежать этого, использовались модифицированные уравнения:

Таблица 4. Почвенно-орографические характеристики мест отбора модельных деревьев пихты сибирской
Table 4. Soil and geomorphological characteristics of *Abies sibirica* model tree selection sites

№ ППП № PSP	Природный район Natural area	Почвенно-географический район Soil and geographic region	Тип почв Soil type
1	Вычегодско-Мезенская равнина Vychegodsko-Mezenskaya plain	Лузо-Сысольский округ типичных подзолистых и болотно-подзолистых почв Luzo-Sysolsky district of typical podzolic and swamp-podzolic soils	Аллювиальные дерново-глеевые, аллювиальные болотные и аллювиальные дерновые почвы Alluvial sod-gley, alluvial marsh and alluvial sod soils
2	Печорская низменность Pechora lowland	Ижма-Печорский округ подзолов иллювиально-гумусово-железистых, торфянисто- и торфяно-подзолисто-глееватых иллювиально-гумусовых, глееподзолистых и болотно-подзолистых почв Izhma-Pechora district of illuvial-humus-irony podzols, peaty- and peaty-podzolic-gleyey illuvial-humus, gley-podzolic and bog-podzolic soils	Аллювиальные болотные и аллювиальные дерново-глеевые почвы Alluvial boggy and alluvial sod-gley soils
3	Вычегодско-Мезенская равнина Vychegodsko-Mezenskaya plain	Вымь-Вычегодский округ типичных подзолистых, иллювиально-железистых подзолов, торфянисто-подзолисто-глееватых иллювиально-гумусовых почв Vym-Vychegodsky District of typical podzolic, illuvial-gleyey podzols, peaty-podzolic-gleyey illuvial-humus soils	Подзолы иллювиально-гумусово-железистые почвы, по гранулометрическому составу песчаные почвы Podzols illuvial-humus-iron soils, sandy soils by granulometric composition
4	Уральский хребет Ural Ridge	Округ Северного Урала горно-лесных глееподзолистых иллювиально-гумусовых и горно-тундровых почв District of the Northern Urals mountain-forest gley-podzolic illuvial-humus and mountain-tundra soils	Горные глееподзолистые почвы Mountain gley-podzol soils

$$b_{ij} = (1 - a_i)(h_j d_j^2)^{c_i}, \quad (2)$$

где $(1 - a_i) = k_i$.

Оценка параметров модели

Задачу нелинейной оптимизации натуральных данных решали методом наименьших квадратов, оценка параметров проводилась для уровня значимости $\alpha = 0.05$ с использованием программного продукта KyPlot 6.0, Version: 6.0.2. Для исключения влияния непостоянства дисперсии ошибок на качество оценок параметров при аппроксимации использовали весовую функцию $w_i = 1/b_{ij}^2$.

Результаты взвешенной нелинейной регрессии объединенных данных биомассы по всем фракциям приведены в табл. 5. Анализ результатов показывает, что уравнения регрессии адекватны, параметры уравнений статистически значимы. Таким образом, уравнение (2) с соответствующими коэффициентами, приведенными в табл. 5, может использоваться для оценки биомассы фракций надземной части дерева пихты, произрастающего в районах, где проводились исследования.

Неопределенность результата оценки биомассы фракции дерева пихты

С практической точки зрения представляет интерес точность оценки биомассы фракций де-

рева пихты с помощью полученных моделей. Обычно оценка проводится на основе информации, полученной в дополнительных исследованиях. Получение дополнительной информации трудоемко и в данной ситуации вряд ли целесообразно.

Неопределенность оценок биомассы, полученных на основании ограниченного числа выборок, следует использовать с осторожностью. Дисперсия ошибки σ^2 в случае отсутствия хотя бы нескольких наблюдений y по меньшей мере для одного значения x формируется из суммы квадратов остатков или ошибок [13, 14], что, может быть, допустимо при гомоскедастичности ошибок. При работе с биологическими объектами это не выполняется [6], что делает такую оценку сомнительной. При двух предикторных переменных требуются наблюдения для заданных x_1 и x_2 . В контексте данного исследования это означает необходимость наличия выборки значений биомассы фракции дерева пихты для заданных диаметра и высоты, получение которой представляет значительные трудности. Поэтому все оценки дисперсии ошибки σ^2 свидетельствуют только об адекватности модели имеющимся данным и являются результатом вынужденного упрощения реальной взаимосвязи переменных. Более надежная оценка интервала неопределенности биомассы фракций надземной части дерева может быть получена, по нашему мнению, на следующем основании.

Зависимость биомассы ствола от высоты и диаметра на высоте 1.3 м может быть выражена в виде уравнения:

$$b_{Sj} = \frac{\rho \pi h_j d_j^2}{4} f, \quad (3)$$

где ρ – плотность абсолютной сухой древесины пихты, равная 350 кг м^{-3} [15]; h_j – высота дерева, м; d_j – диаметр на уровне груди, м; f – видовое число.

Уравнение (3) с оценкой $\hat{f} = 0.452172$, полученной нелинейной оптимизацией натуральных данных методом наименьших квадратов, обеспечивает точно такую же аппроксимацию экспериментальных данных, как и уравнение (2) и может рассматриваться как эквивалентное:

$$\hat{b}_{Sj} = (1 - a_S) (h_j d_j^2)^{c_S} = 0.452172 \frac{\rho \pi h_j d_j^2}{4}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что биомасса ствола для заданной высоты и диаметра зависит только от видового числа, которое может изменяться в зависимости от формы ствола.

Видовое число для любого дерева, согласно М.Е. Ткаченко [16], в зависимости от коэффициента формы ствола может изменяться от 0.438 до 0.592 для малых высот, и от 0.390 до 0.560 для больших высот. Таким образом, в зависимости от высоты дерева его видовое число может изменяться от 15 до 18%. Следовательно, биомасса ствола будет меняться аналогичным образом.

Соответственно, изменение интервала неопределенности результата оценки биомассы ствола можно выразить в виде:

$$\hat{b}_{Sj} = b_{Sj} \pm \delta_S = b_{Sj} \pm \delta_f, \quad (5)$$

где δ_S – относительная неопределенность результата оценки биомассы ствола, δ_f – относительная неопределенность результата оценки видового числа.

Средняя величина коэффициента формы q_2 ствола пихты равно 0.70 [17], данному коэффициенту соответствует среднее видовое число, изменяющееся в зависимости от высоты дерева от 0.474 до 0.509. Таким образом, в зависимости от высоты дерева видовое число пихты также может изменяться от 15 до 18%. С практической точки зрения, лучше использовать среднее значение для всех высот, для пихты оно составит 16.5%, соответственно, можно записать:

$$\hat{b}_{Sj} = b_{Sj} \pm 16.5\%. \quad (6)$$

Далее, можно показать, что биомасса других фракций дерева пихты может быть выражена через биомассу древесины ствола.

$$\begin{aligned} b_{Bj} &= (1 - a_B) (h_j d_j^2)^{c_B} = \frac{(1 - a_S) (h_j d_j^2)^{c_S}}{k_B (h_j d_j^2)^{\Delta_B}} = \\ &= g_{Bj} (1 - a_S) (h_j d_j^2)^{c_S}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} b_{Brj} &= (1 - a_{Br}) (h_j d_j^2)^{c_{Br}} = \frac{(1 - a_S) (h_j d_j^2)^{c_S}}{k_{Br} (h_j d_j^2)^{\Delta_{Br}}} = \\ &= g_{Brj} (1 - a_S) (h_j d_j^2)^{c_S}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} b_{Nj} &= (1 - a_N) (h_j d_j^2)^{c_N} = \frac{(1 - a_S) (h_j d_j^2)^{c_S}}{k_N (h_j d_j^2)^{\Delta_N}} = \\ &= g_{Nj} (1 - a_S) (h_j d_j^2)^{c_S}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $g_{ij} = \frac{1}{k_i (h_k d_j^2)^{\Delta_i}}$. Значения параметров Δ_i , k_i и уравнения для их расчета приведены в табл. 6.

С учетом (4), это означает, что биомасса любой фракции будет изменяться с изменением формы

Таблица 5. Показатели качества и параметры общих регрессионных моделей для биомассы фракций пихты сибирской**Table 5.** Quality indices and parameters of generalized regression models for fir biomass fractions.

Фракция Fraction	Параметры модели Model summary			Оценка коэффициентов ($t_{0.05} = 2.0141$) Coefficient estimation ($t_{0.05} = 2.0141$)			
	R	R^2	взвешенный остаток SE Weighted residual SE	коэффициент coefficient	величина value	критерий Стьюдента (t) Student's criterion (t)	уровень значимости P -Value
Ствол (без коры) Barkless stem	0.9996	0.9992	2.0717	a_S	0.9844	413.0046	0.0
				c_S	0.9715	51.4453	0.0
Кора Bark	0.9975	0.9951	0.6263	a_B	0.9956	745.5209	0.0
				c_B	0.8737	22.9904	0.0
Ветви Branches	0.9911	0.9823	1.4342	a_{Br}	0.9772	67.6555	0.0
				c_{Br}	0.6401	8.0094	0.0
Хвоя Needles	0.9918	0.9837	0.8494	a_N	0.9958	434.9708	0.0
				c_N	0.8238	12.6778	0.0

Таблица 6. Значения параметров уравнений (7)–(9)**Table 6.** Values of the equations (7) – (9) parameters

Параметры Parameters	Ствол Stem	Кора Bark	Ветви Branches	Хвоя Needles
a_i	0.9844	0.9956	0.9772	0.9958
c_i	0.9715	0.8737	0.6401	0.8238
$\Delta_i = c_S - c_i$	0.0	0.0964	0.3299	0.1463
$1 - a_i$	0.0156	0.0044	0.0228	0.0043
$k_i = \frac{(1 - a_S)}{(1 - a_i)}$	1	3.5863	0.6850	3.6826

ствола (видового числа) также как и биомасса древесины ствола.

Следовательно, интервал неопределенности результата оценки биомассы любой фракции дерева пихты можно выразить в виде:

$$\hat{b}_{ij} = b_{ij} \pm 16.5\%. \quad (10)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования показали, что выборки значений биомассы фракций дерева пихты, полученные в разных локациях Республики Коми, однородны и могут рассматриваться как выборки, взятые из одной генеральной совокупности. По нашему мнению, это является аргументом в пользу того, что распределение органического вещества, запасаемого пихтой сибирской в процессе жизнедеятельности, не зави-

сит от условий произрастания и определяется генетическими особенностями вида.

Климатогеографические условия в местах отбора модельных деревьев соответствуют условиям произрастания пихты сибирской на территории Республики Коми, ограниченной следующими координатами: в широтном направлении от 60° с.ш. до 64° с.ш., в долготном направлении от 49° в.д. до 57° в.д. (рис. 1). Поскольку типы лесорастительных условий в районах исследования не оказывают влияния на распределение органического вещества по фракциям дерева пихты, естественно предположить, что в границах данной территории характер зависимости биомассы фракций дерева пихты сибирской от его морфометрических параметров не изменяется. Возможность экстраполяции полученных выводов в широтном и долготном направлении на области, примыкающие к данной территории, требует до-

полнительных исследований. Можно предположить, что в западном направлении лесорастительные условия не подвергаются трансформациям [10, 11]. Долгота крайней точки Республики Коми равна $45^{\circ}29'$ в.д., площадь территории республики, заключенная между 49° в.д. и $45^{\circ}29'$ в.д., невелика. Однако в восточном направлении в районе Уральского хребта климатические и агрографические показатели среды претерпевают значительные изменения. Уральские горы являются естественным ограничением территории, на которой наблюдается постоянство коэффициентов регрессионных уравнений для оценки биомассы фракций дерева пихты. Таким образом, можно считать, что в долготном направлении территория, на которой действительны установленные величины коэффициентов уравнений протянулась от Уральских гор до $45^{\circ}29'$ в.д. В северном направлении в равнинной части ареал распространения пихты сибирской ограничен примерно $64^{\circ}10'$ с.ш. [1] и только незначительно выходит за границы области исследования. На юге точка отбора модельных деревьев почти совпадает с южной границей республики ($59^{\circ}14'$ с.ш.). То есть, в равнинной части в широтном направлении территория, для которой действительны коэффициенты, распространяется от южной границы республики до 64° с.ш. Таким образом, можно считать, что, исключая горные районы республики, климатогеографические условия на территории Республики Коми в пределах от $59^{\circ}14'$ с.ш. до 64° с.ш. не оказывают влияния на распределение органического вещества, запасаемого пихтой сибирской (рис. 1).

Принимая во внимание вышесказанное, полученные в ходе исследования регрессионные уравнения для оценки надземной биомассы фракций дерева пихты сибирской могут использоваться для прогноза на территории Республики Коми, по крайней мере в пределах обозначенной области.

Единые уравнения, предлагаемые для оценки биомассы фракций надземной части дерева пихты сибирской, адекватны, статистически значимы и имеют вид:

$$\begin{aligned} & \text{древесина ствола (без коры)} \\ \hat{b}_{Sj} &= (1 - 0.984367)(h_j d_j^2)^{0.971479}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{кора ствола } \hat{b}_{Bj} = (1 - 0.995641)(h_j d_j^2)^{0.873661}, \quad (12)$$

$$\text{ветви } \hat{b}_{Brij} = (1 - 0.977181)(h_j d_j^2)^{0.640089}, \quad (13)$$

$$\text{хвоя } \hat{b}_{Nj} = (1 - 0.995755)(h_j d_j^2)^{0.82378}. \quad (14)$$

Общая надземная биомасса дерева пихты может оцениваться по уравнению:

$$\hat{b}_{Tj} = \hat{b}_{Sj} + \hat{b}_{Bj} + \hat{b}_{Brij} + \hat{b}_{Nj}. \quad (15)$$

Оценка интервала неопределенности при определении биомассы фракций дерева пихты может быть проведена на основе вариабельности видового числа. Согласно этой оценке, неопределенность результата оценки биомассы любой фракции дерева пихты может быть выражена в виде:

$$\hat{b}_{ij} = b_{ij} \pm 16.5\%. \quad (16)$$

Предлагаемый подход к оценке неопределенности результата оценки биомассы может быть применен к любой другой древесной породе. Интервал неопределенности может быть сужен, если рассматривать видовое число как случайную величину с нормальной функцией распределения, в данной работе это не обсуждается.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России” (122040100031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин Ю.П. 1954. Темнохвойные леса. — В кн.: Производительные силы Коми АССР. М.; Л.:Т.3. Ч. 1. Растительный мир. С. 42–126.
2. Мамаев С. А. 1983. Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. Свердловск: УНЦ АН СССР. 111 с.
3. Усольцев В.А., Часовских В.П., Норицин Д.В. 2015. Возрастная динамика и структура фитомассы деревьев ели и пихты в лесах Евразии. — Эко-потенциал. 4(12): 11–13. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5224>
4. Sato T., Madgwick H.A.I. 1982. Forest biomass. London. 160 p.
5. Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Silva Fennica Monographs. 4. 63 p. <https://doi.org/10.14214/sf.sfm4>
6. Picard N., Saint-André L., Henry M. 2012. Manual for Building Tree Volume and Biomass Allometric Equations: From Field Measurement to Prediction. Rome, Montpellier. 215 p. <https://www.fao.org/3/i3058e/i3058e.pdf>

7. Chave J., Rejou-Mechain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M. S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martinez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G., Vieilledent G. 2015. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. — *Global Change Biology*. 20(10): 3177–3190.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
8. Clair J.B.ST. 1993. Family Differences in Equations for Predicting Biomass and Leaf Area in Douglas–Fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). — *Forest Science*. 39(4): 743–755.
<https://doi.org/10.1093/forestscience/39.4.743>
9. ОСТ 56-69-83. 1983. Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР. 60 с.
10. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. 1997. Москва. 116 с.
11. Атлас почв Республики Коми 2010. Сыктывкар. 356 с.
12. Орлов А.И. 2004. Прикладная статистика М. 656 с.
13. Baskerville G.L. 1972. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. — *Can. J. For. Res.* 2(1): 49–53.
<https://doi.org/10.1139/x72-009>
14. Montgomery D.C., Peck E.A. 1982. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons. 504 p.
15. Уголев Б.Н. 2006. Древесиноведение и лесное товароведение. М. 272 с.
16. Лесотаксационный справочник 1980. М. 288 с.
17. Анучин Н.П. 1982. Лесная таксация. М. 552 с.

Estimation of *Abies sibirica* (Pinaceae) Aboveground Biomass in the Northeast of European Russia

S. I. Tarasov^a, N. V. Gerling^{a, *}

^a Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS),
Syktyvkar, Russia

*e-mail: gerling@ib.komisc.ru

Abstract—The objectives of this study were: 1) to obtain allometric relationships linking Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) morphometric parameters and biomass of the aboveground fractions, 2) to assess the applicability of these equations for estimating biomass of aboveground fractions in Siberian fir from different climatic and geographical regions, and 3) to evaluate the uncertainty in estimation of individual biomass fractions. A total of 47 model Siberian fir trees from four regions of the Komi Republic taiga zone with different forest site conditions were selected and studied by destructive method. Unified allometric equations linking biomass of the aboveground fractions with tree height and diameter at breast height were obtained for absolutely dry barkless stem wood biomass, stem bark, branches and needles. It is shown that the obtained unified equations are suitable for estimating the Siberian fir biomass of the aboveground fractions, at least within the study region. The uncertainty of individual biomass fractions based on species number is estimated.

Keywords: Siberian fir, woody plant biomass, allometric equations, tree morphometric parameters, forest site conditions

ACKNOWLEDGMENTS

This study was conducted as part of the research topic “Zonal patterns in the dynamics of the structure and productivity of primary and anthropogenically modified phytocenoses of forest and swamp ecosystems of European North-East of Russia” (122040100031-8).

REFERENCES

1. Yudin Y.P. 1954. [Dark coniferous forests]. In: [Productive power of the Komi ASSR]. Moscow; Leningrad. Vol. 3. Part. 1. [Flora]. P. 42–126. (In Russian)
2. Mamaev S.A. 1983. [Coniferous species in the Urals and their use in landscaping]. Sverdlovsk. 111 p. (In Russian)
3. Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P., Noritsin D.V. 2015. [Age dynamics and phytomass structure of spruce and fir trees in Eurasian forests]. — *Eco-potential*. 4(12): 11–13.
<https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5224> (In Russian)

4. *Satoo T., Madgwick H.A.I.* 1982. Forest biomass. London. 160 p.
5. *Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M.* 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*. 4. 63 p.
<https://doi.org/10.14214/sf.sfm4>
6. *Picard N., Saint-André L., Henry M.* 2012. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Rome, Montpellier. 215 p.
<https://www.fao.org/3/i3058e/i3058e.pdf>
7. *Chave J., Rejou-Mechain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P. M., Goodman R.C., Henry M., Martinez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B. W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J. G., Vieilledent G.* 2015. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. – *Global Change Biology*. 20(10): 3177–3190.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
8. *Clair J.B.ST.* 1993. Family Differences in Equations for Predicting Biomass and Leaf Area in Douglas–Fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). – *Forest Science*. 39(4): 743–755.
<https://doi.org/10.1093/forestscience/39.4.743>
9. *OST 56-69-83.* 1983. [Sample areas for forest management. Method of establishment.] Moscow. (In Russian)
10. [*Atlas of the Komi Republic Climate and Hydrology*]. 1997. Moscow. 356 p. (In Russian)
11. [*Atlas of soils of the Komi Republic*]. 2010. Syktyvkar. 116 p. (In Russian)
12. *Orlov A.I.* 2004. [Applied Statistics]. M. 656 p. (In Russian)
13. *Baskerville G.L.* 1972. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. – *Can. J. For. Res.* 2(1): 49–53. <https://doi.org/10.1139/x72-009>
14. *Montgomery D.C., Peck E.A.* 1982. Introduction to Linear Regression Analysis. New York. 504 p.
15. *Ugolev B.N.* 2006. [Wood Science and Forest Merchandising]. Moscow. 272 p. (In Russian)
16. [*Forest Mensuration Handbook*]. 1980. Moscow. 288 p. (In Russian)
17. *Anuchin N.P.* 1982. [Forest mensuration]. M. 552 p. (In Russian)

**СТРУКТУРА
ПОПУЛЯЦИЙ РАСТЕНИЙ**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ
BETULA PUBESCENS (BETULACEAE) В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ**© 2022 г. Н. И. Ставрова^{1, *}, В. В. Горшков^{1, 2}, П. Н. Катютин^{1, 3}¹Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Санкт-Петербург, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nstavrova@gmail.com

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принята к публикации 07.10.2022 г.

Изучена структура пространственных элементов (простых и сложных индивидов, клональных колоний) ценопопуляций березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) в северотаежных кустарничково-зеленомошных сосново-еловых лесах, находящихся на разных стадиях послепожарной сукцессии (давность пожара от 8 до 380 лет). Установлено, что в процессе сукцессии в составе ценопопуляций березы пушистой существенно изменяется соотношение элементов, образованных единичными особями и разным числом партикул; компонентное разнообразие элементов (наличие в их составе деревьев, крупного и мелкого подроста); доля участия каждого из компонентов. Выявлены особенности структуры ценопопуляций березы пушистой, характерные для разных стадий послепожарного восстановления северотаежных сосново-еловых лесов. Охарактеризованы сукцессионные процессы в северотаежных сосново-еловых лесах, которые могут являться факторами структурных трансформаций ценопопуляций исследованного вида.

Ключевые слова: *Betula pubescens*, ценопопуляции, структура, сукцессионная динамика, сосново-еловые леса, Кольский полуостров

DOI: 10.31857/S0033994622040100

Анализ работ, исследующих характер пространственного размещения древесных растений [1–18], показывает, что выявление закономерностей формирования пространственной структуры ценопопуляций лесобразующих видов на протяжении многих лет остается одной из актуальных проблем фитоценологии.

Наиболее сложная пространственная структура характерна для видов, имеющих не только семенное, но и вегетативное возобновление. В этих случаях в качестве пространственных элементов ценопопуляций выступают не только простые индивиды – отдельные особи семенного происхождения, но и сложные индивиды и клональные колонии – группы из нескольких (многих) особей вегетативного происхождения [19–21]. Таким образом, каждый из этих элементов имеет не только индивидуальную пространственную позицию, но и различия в составе и структуре (размерной, возрастной, онтогенетической и т.д.). Именно таким характером структуры ценопопуляций отличается *Betula pubescens* Ehrh., произрастающая в редкостойных лесах северной тайги.

Согласно данным Федерального Агентства Лесного Хозяйства России, в разных районах на севере Европейской части России мелколиственные леса, формирующиеся на территориях с нарушенным в результате рубок и пожаров лесным покровом, составляют от 20 до 50% лесопокрывной площади [22]. Их основными лесобразующими видами являются береза пушистая и береза повислая (*Betula pendula* Roth). Березовые леса в таежной зоне Европейской России характерны для начальных стадий восстановительных сукцессий темнохвойных лесов после катастрофических нарушений – сплошных рубок, пожаров, ветровалов. В средней и южной тайге они с течением времени при отсутствии нарушений сменяются еловыми или пихтово-еловыми лесами с единичным участием мелколиственных видов в составе древостоя. Береза пушистая и береза повислая выступают здесь как серийные виды. В редкостойных лесных сообществах северной тайги ценотическая роль березы пушистой является совершенно иной. Этот вид выступает как серийный лесобразующий в первые 100 лет после пожара, затем на средних стадиях сукцессии в



Рис. 1. Расположение района исследований на территории Кольского полуострова.
Fig. 1. Location of the study area on the Kola Peninsula.

период максимума развития первого послепожарного темнохвойного древостоя его роль резко снижается, а на поздних стадиях восстановления в результате развития процессов оконной динамики вновь существенно возрастает. При давности пожара 350–500 лет доля участия березы пушистой в составе северотаежных еловых и сосново-еловых лесов по числу стволов составляет до 40%, по запасу – 20–40% [23, 24]. Несмотря на биологическое и ресурсное значение разных видов р. *Betula* в современном, существенно нарушенном лесном покрове России, сведения о структурных особенностях и сукцессионной динамике их ценопопуляций остаются весьма ограниченными [17, 25–27].

Цель настоящего исследования состояла в анализе структуры пространственных элементов ценопопуляций *Betula pubescens* на разных этапах восстановительных послепожарных сукцессий северотаежных сосново-еловых лесов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Структура ценопопуляций березы пушистой изучалась на территории Кольского полуострова (67°30'–68°10' с.ш., 33°57'–34°21' в.д.) (рис. 1) в северотаежных кустарничково-зеленомошных сосново-еловых лесах, в которых основными лесообразующими видами выступают *Picea obovata* Ledeb., *Pinus sylvestris* L., *Betula pubescens*. Исследованы сообщества, находящиеся на разных стадиях послепожарной восстановительной сукцессии (давность пожара 8, 80, 150, 200 и 380 лет). В районе исследований сосново-еловые леса располагаются на ровных участках и в нижних частях пологих склонов моренных равнин, сложенных

четвертичными супесчаными и песчаными завалунными отложениями. В этих условиях под сосново-еловыми лесами формируются иллювиально-гумусовые подзолы, имеющие профиль О-Е-ВН-(BF)-С, мелкоподзолистые, иллювиально-многогумусовые, песчано-супесчаные, средне скелетные [28]. По классификации Всемирной справочной базы (WRB) они идентифицированы как Albic Carbic Podzols (Arenic) [29]. Иллювиально-гумусовые подзолы отличаются небольшой мощностью (до 60–70 см) и четкими морфологическими и химическими различиями генетических горизонтов. Профильная дифференциация обусловлена перераспределением химических элементов с образованием иллювиального горизонта, для которого характерно накопление оксалоторастворимых соединений Al и Fe, а также фульватного гумуса, содержание которого составляет 4–5% [30].

Древесный ярус (особи с диаметром ствола на высоте 1.3 м более 4 см) в ненарушенных сосново-еловых лесах сформирован тремя видами: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris* и *Betula pubescens*. Особенности эдификаторного яруса изученных сообществ (табл. 1) являются разреженность, низкие значения средней высоты и диаметра лесообразующих видов и общей относительной суммы площадей сечений (13–17 м²/га). В составе полога подрост выделялись два компонента: крупный подрост – особи с диаметром на высоте 1.3 м менее 4 см и мелкий подрост – особи высотой менее 1.3 м. В изученных лесах в составе полога подрост представлены те же виды, что и в древесном ярусе.

Основу травяно-кустарничкового яруса во всех изученных сообществах формируют *Vaccini-*

Таблица 1. Характеристики древостоев на исследованных пробных площадях
Table 1. Forest stands data from the investigated simple plots

Пробная площадь Sample plot	Давность пожара, лет Time since last fire (years)	Вид Species	Сумма площадей сечений, м ² га ⁻¹ Basal area (m ² ha ⁻¹)	Густота, экз. га ⁻¹ Density (ind. ha ⁻¹)	Средние Average		
					возраст, лет age (years)	диаметр на высоте 1.3 м. см DBH (cm)	высота, м tree height (m)
L4	8	P*	3.4	79	102	23.5	13.7
		S*	0.14	6	120	17.0	10.5
		B*	0.1	22	82	7.7	5.0
L7	80	P*	1.1	13	220	32.0	18.0
		P	11.3	587	76	15.6	13.3
		S	0.7	160	58	12.3	0.7
L8	150	B	5.5	1262	77	7.4	9.1
		P	16.4	387	106	23.2	16.2
		S	6.0	433	125	13.3	13.3
L5	200	B	3.6	307	—	12.2	10.7
		P*	3.05	20	252	44.1	17.1
		P	7.1	173	140	22.8	14.1
L3	380	S	4.1	333	135	12.5	13.7
		B	1.5	400	86	6.9	6.3
		P	4.7	66	306	30.1	16.8
		S	4.4	182	215	16.4	13.9
		B	3.3	352	156	11.1	9.7

Примечание: P – *Pinus sylvestris*, S – *Picea obovata*, B – *Betula pubescens*. * – деревья допозарного происхождения; прочерк означает отсутствие данных.

Note: P – *Pinus sylvestris*, S – *Picea obovata*, B – *Betula pubescens*. * – individuals of pre-fire origin; dash means no data.

um myrtilus L., *V. vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup.; общее покрытие яруса составляет от 30 до 40% с максимумом в интервале от 50 до 100 лет [24, 31]. Видовой состав и проективное покрытие напочвенного покрова в изученных сообществах определяются давностью нарушения. В мохово-лишайниковом ярусе доминирует *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., участвуют виды р. *Dicranum* Hedw., *Hylacomium splendens* (Hedw.) B.S.G. Проективное покрытие яруса составляет 70–90%.

Давность пожара в изученных лесах устанавливалась по кернам, которые отбирались у живых деревьев с пожарными повреждениями стволов в радиусе 50–100 м от пробной площади (не менее 5 особей). В сообществе с давностью пожара 380 лет продолжительность беспожарного периода была оценена на основе протяженности непрерывного возрастного ряда, составленного из особей двух лесообразующих видов хвойных [32].

Во всех сообществах были заложены постоянные пробные площади размером 0.1–0.2 га. На каждой из них по квадратам размером 5 × 5 м был проведен учет всех особей древесных растений семенного и вегетативного происхождения высотой более 0.1 м. Учет особей меньшего размера (в воз-

расте более 1 года) был выполнен на 40–100 площадках, размером 1 × 1 м, равномерно расположенных в пределах пробной площади. У всех особей определялись основные размерные параметры (диаметр на высоте 1.3 м и у основания ствола, высота) и пространственные координаты.

Анализировалась сукцессионная динамика элементов ценопопуляций березы пушистой (простых и сложных индивидов, клональных колоний) по общей численности особей и партикул, компонентному разнообразию (доле участия деревьев, крупного и мелкого подроста), представленности каждого из компонентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Начальная стадия сукцессии – заселение гари древесными растениями (давность пожара 8 лет)

В начале восстановительного периода пространственные элементы ценопопуляций березы пушистой отличаются относительно высокой средней численностью особей и парциальных образований в своем составе (9.0 ± 0.7 экз.) и широким диапазоном их числа (1–57 экземпляров). В этот период одночленные элементы (одиночные

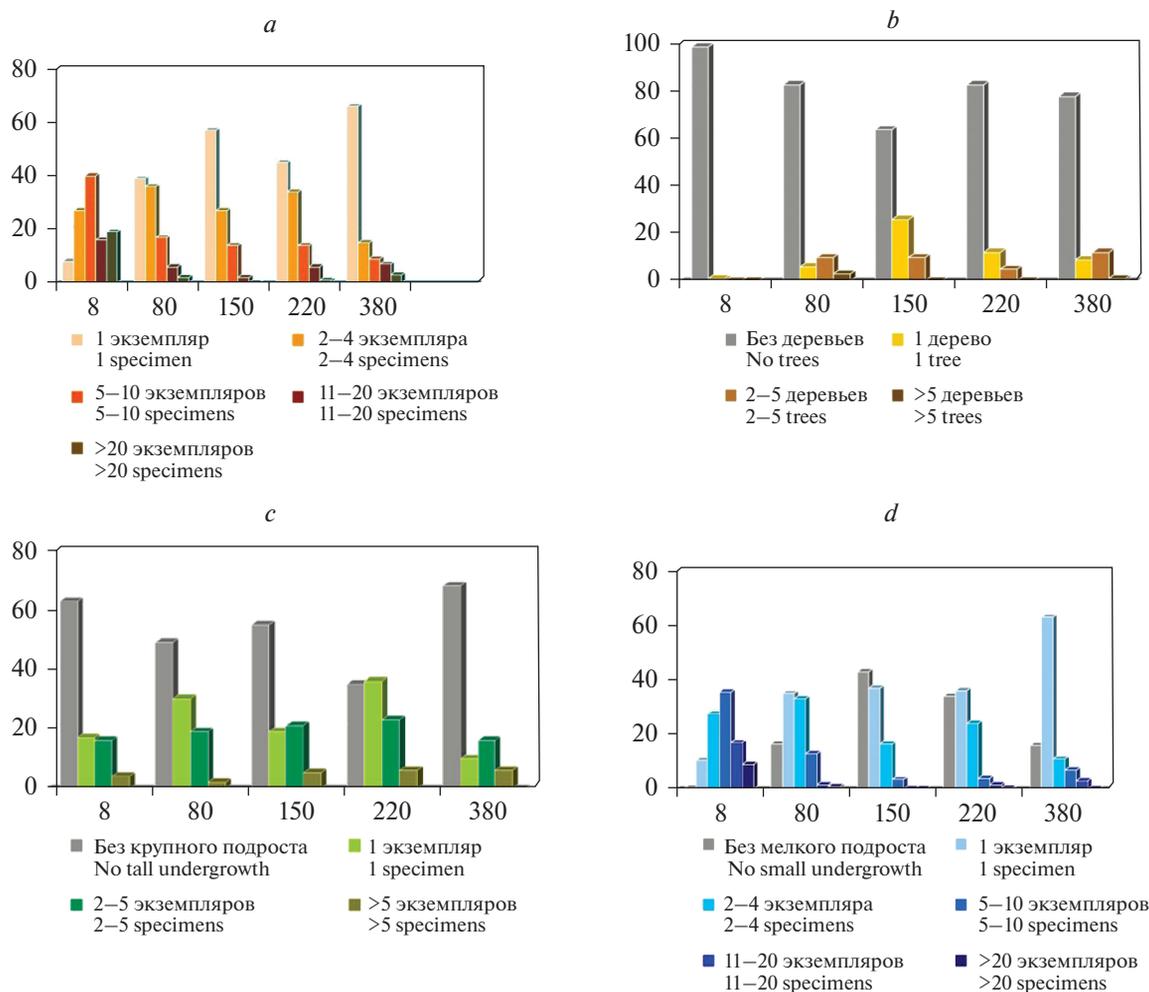


Рис. 2. Соотношение пространственных элементов, сформированных разным числом особей и партикул (a), имеющих в составе разное число деревьев (b), экземпляров крупного (c) и мелкого (d) подроста.

Fig. 2. The ratio of spatial elements formed by a different number of individuals and particles (a), having a different number of trees (b), specimens of large (c) and small (d) undergrowth.

деревья, одиночные особи крупного или мелко-го подроста) в составе ценопопуляции березы пушистой редки и составляют менее 10% (рис. 2a). Основная часть элементов (67%) состоит из 2–10 партикул. Примерно 20% приходится на крупные группы, включающие от 20 до 57 партикул.

Поскольку древостой и подрост березы пушистой практически полностью погибают во время пожаров средней и высокой интенсивности, на начальной стадии восстановления практически все (99%) пространственные элементы не имеют в своем составе деревьев (рис. 2b) и состоят только из подроста, возраст которого не превышает давности пожара. Крупный подрост представлен в составе примерно 40% пространственных элементов (рис. 2c), как правило, его количество ограничивается 1–5 экземплярами, максимум составляет 13 экземпляров. Мелкий подрост представлен практически во всех локусах (рис. 2d). Для ранней стадии сукцессии характерно наибо-

лее высокое среднее (8.1 ± 0.6 экз.) и максимальное (45 экз.) количество мелкого подроста в составе пространственных элементов ценопопуляций пушистой. В большинстве случаев они включают от 2 до 10 экземпляров мелкого подроста, но примерно 25% пространственных элементов состоят из более чем 10 партикул.

Анализ компонентной структуры пространственных элементов ценопопуляций березы показал, что в начале сукцессии преобладают (64%) однокомпонентные элементы (рис. 3a), состоящие только из мелкого подроста (рис. 3b). Доля двухкомпонентных элементов примерно в 2 раза меньше, они образованы крупным и мелким подростом. Единично встречаются однокомпонентные элементы, состоящие из особей крупного подроста или трехкомпонентные элементы, включающие деревья допожарного происхождения, крупный и мелкий подрост.

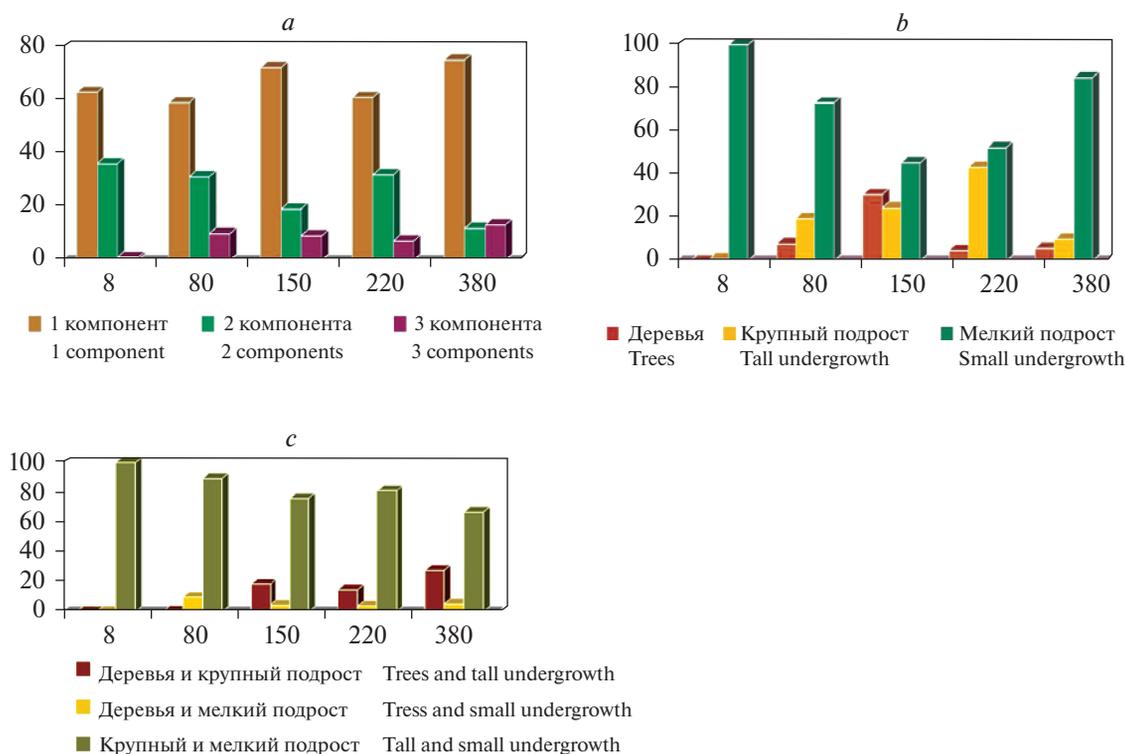


Рис. 3. Компонентное разнообразие пространственных элементов (a) и состав 1-компонентных (b) и 2-компонентных (c) элементов.

Fig. 3. Component diversity of spatial elements (a) and composition of 1-component (b) and 2-component (c) elements.

Стадия хвойно-лиственного древостоя (давность пожара 80 лет)

В течение первых десятилетий после пожара на гари формируется сначала послепожарный березовый, а через 50–70 лет – елово-березовый древостой, в котором на долю березы пушистой приходится около 60% по числу стволов и около 30% по запасу (табл. 1). Происходит последовательное нарастание напряженности внутри- и межпопуляционной конкуренции, что сказывается на выживаемости молодых поколений березы пушистой, в том числе мелкого и крупного подроста вегетативного происхождения в составе клональных колоний. Восстановление покрытия мохово-лишайникового яруса приводит к снижению активности семенного возобновления березы.

По сравнению с начальной стадией сукцессии существенно меняется соотношение пространственных элементов, образованных разным числом особей и партикул (рис. 2a). Доля элементов, состоящих из небольшого числа особей (1–4 экз.) возрастает в 2 раза (75%), а доля многочисленных клонов (более 10 партикул) снижается в 4 раза и составляет всего 8%. Существенно уменьшается среднее (4.0 ± 0.3 экз.) и максимальное (38 экз.) число партикул в составе пространственных элементов.

После формирования послепожарного березового древостоя появляются пространственные элементы, имеющие в своем составе не только подрост, но и взрослые деревья березы пушистой послепожарного происхождения, в основном в количестве от 1 до 5 экземпляров, суммарная доля таких элементов составляет около 15% (рис. 2b). Формируются многостольные клоны, включающие 5–7 стволов; их участие в этот период является максимальным за всю сукцессию. Однако продолжают существенно преобладать элементы, состоящие только из подроста. Примерно половина пространственных элементов отличается наличием в своем составе от 1 до 5 экземпляров крупного подроста (рис. 2c); максимальное число составляет 9 экземпляров. Мелкий подрост представлен примерно в 80% всех пространственных элементов. Существенное отличие от начальной стадии сукцессии состоит в том, что преобладающими (70%) становятся элементы с небольшим количеством (1–5 экземпляров) мелкого подроста в своем составе (рис. 2d). В соответствии с этим среднее (2.7 ± 0.2 экз.) и максимальное (28 экз.) число особей мелкого подроста в составе пространственных элементов ценопопуляций березы пушистой существенно снижаются.

В отношении компонентной структуры можно отметить лишь заметное повышение доли уча-

ствия 3-х компонентных пространственных элементов, включающих деревья, крупный и мелкий подрост, которая возрастает до 10% (рис. 3а). Преобладают по-прежнему 1-компонентные элементы (60%), среди которых примерно 30% составляют одиночные деревья и одиночные особи крупного подроста (рис. 3б). Двухкомпонентные элементы ценопопуляции березы состоят в 90% случаев из крупного и мелкого подроста (рис. 3с).

*Стадия лиственно-хвойного древостоя
(150 лет после пожара)*

Этот период характеризуется началом возрастного распада послепожарного березового древостоя. Доля березы в составе древесного яруса снижается до 25–40% по числу и до 10–15% по запасу (табл. 1). Конкурентное воздействие елового древостоя на березу пушистую неуклонно возрастает. Происходит усыхание и выпадение из состава соснового древостоя отдельных старых деревьев допожарного происхождения, которые, как правило, присутствуют в составе древостоев сосново-еловых лесов (табл. 1), что создает условия для активизации семенного возобновления древесных растений на ветровальных комплексах.

В составе ценопопуляций березы пушистой начинают существенно преобладать монотипные пространственные элементы, доля которых возрастает до 55% (рис. 2а). Представленность многочисленных клональных колоний сокращается до минимума (2%). Среднее и максимальное число особей и парциальных образований в составе пространственных элементов продолжают снижаться и составляют соответственно 2.7 ± 0.3 экз. и 20 экз.

На рассматриваемой стадии отмечается наиболее высокая за весь период сукцессии (около 40%) доля элементов, имеющих в своем составе деревья – от 1 до 5 экземпляров, однако многочисленные клоны отсутствуют (рис. 2б). Доля элементов с участием крупного подроста по сравнению с предшествующей стадией существенно не изменяется (рис. 2с). В абсолютном большинстве случаев число особей крупного подроста не превышает 5 экземпляров, и в среднем составляет 1.2 ± 0.2 экз. при максимуме 14 экз. Характерной особенностью этого периода является 2-кратное (до 45%) по сравнению с предшествующей стадией увеличение доли элементов, не имеющих в своем составе мелкого подроста (рис. 2д). Среднее число экземпляров мелкого подроста в составе пространственных элементов достоверно снижается (до 1.0 ± 0.1 экз.). Отсутствуют клоны, имеющие в своем составе более 7 экз. мелкого подроста. Все это указывает на подавление активности вегетативного возобновления березы из-за конкуренции подроста с взрослыми особями, достигшими максимума развития.

При давности пожара 150 лет, как и на предшествующих стадиях сукцессии, в составе ценопопуляций березы преобладают 1-компонентные элементы (рис. 3а), состоящие либо из одиночных деревьев, либо из одиночных особей крупного или мелкого подроста. Однако их соотношение между собой существенно отличается от соотношения на других стадиях. Доля элементов, состоящих из одиночных деревьев, является наиболее высокой (30%) за весь период сукцессии (рис. 3б), напротив, доля элементов, состоящих из одиночных особей мелкого подроста, является наиболее низкой по сравнению с другими стадиями (45%). Эти особенности свидетельствуют о высоком уровне конкуренции в клонах и подавлении процессов семенного возобновления березы в связи с завершением формирования плотного, высокого, непроницаемого для семян мохового покрова и восстановлением толщины лесной подстилки [33]. Значительно реже, по сравнению с однокомпонентными, встречаются 2-компонентные элементы (рис. 3с), состоящие преимущественно из крупного и мелкого подроста (75%). Их доля составляет около 20%. Низкой (около 10%) является доля элементов, включающих все три основных компонента ценопопуляций – деревья, крупный и мелкий подрост.

*Стадия хвойного древостоя с участием
березы пушистой (200 лет после пожара)*

К концу 2-го столетия после пожара завершается распад первого послепожарного березового древостоя, достигшего возрастного предела (максимальный зарегистрированный в районе исследований возраст березы составляет 240 лет). Его сменяет древостой, состоящий в основном из более молодых и малоразмерных деревьев, по сравнению с древостоем предшествующей стадии сукцессии (табл. 1): их диаметр и высота в 2 раза, а сумма площадей сечений – в 3 раза ниже, чем при давности пожара 150 лет. Березовый древостой испытывает в этот период наиболее сильное конкурентное воздействие первого послепожарного сосново-елового древостоя, который достигает максимума своего развития. В этот период с единичных деревьев начинается постепенный распад елового древостоя; продолжается выпадение из состава соснового древостоя отдельных старых деревьев допожарного происхождения (табл. 1). Количество ветровальных комплексов возрастает.

Соотношение в составе ценопопуляций березы пространственных элементов, сформированных разным числом особей и партикул, сходно с наблюдавшимся при давности пожара 150 лет (рис. 2а). Заметно (с 64 до 83%) возрастает доля элементов, в составе которых нет деревьев (рис. 2б), что на этой стадии является, прежде всего, следствием распада послепожарного древостоя березы.

В противоположность этому, доля пространственных элементов с участием крупного подроста возрастает в период от 150 до 200 лет после пожара с 45 до 65% (рис. 2с), что также, по-видимому, происходит из-за выпадения старых деревьев березы и снижения конкуренции внутри клональных колоний. В то же время среднее число экземпляров крупного подроста в составе пространственных элементов (1.5 ± 0.1 экз.) существенно не изменяется; максимальное число возрастает до 20 экземпляров. То же касается участия в составе пространственных элементов мелкого подроста березы (рис. 2d): при отсутствии достоверного изменения среднего числа экземпляров (1.5 ± 0.2 экз.), существенно (с 7 до 35 экз.) возрастает их максимальное количество. Кроме того, с 20 до 30% увеличивается доля элементов, включающих более 1 экземпляра мелкого подроста.

Компонентное разнообразие пространственных элементов несколько возрастает по сравнению с предшествующей стадией за счет небольшого увеличения (с 20 до 30%) доли 2- и 3-компонентных элементов (рис. 3a). Существенно меняется состав 1-компонентных элементов (рис. 3b): только 5% из них сформированы деревьями (при давности пожара 150 лет – 30%). При этом в 1.5 раза возрастает доля элементов, образованных крупным подростом (с 25 до 43%). Состав 2-компонентных пространственных элементов (рис. 3c) аналогичен наблюдаемому на предшествующей стадии: они в основном (80%) состоят из крупного и мелкого подроста. Наиболее низкой (4%) является доля элементов, включающих деревья и мелкий подрост.

*Стадия березово-сосново-елового древостоя
(380 лет после пожара)*

Характерной особенностью поздних стадий сукцессии является развитие процессов оконной динамики, в результате которых формируются относительно разновозрастные древостои ели, сосны и березы. Периодическое выпадение из состава хвойного древостоя наиболее старых и наиболее ослабленных деревьев создает неоднородность ценоотической среды, является причиной локального ослабления межпопуляционной конкуренции. Благодаря этому береза пушистая восстанавливает свою роль в составе древостоя по числу особей и сумме площадей сечений (табл. 1). Формируется разновозрастный березовый древостой. Наличие многочисленных ветровальных комплексов создает условия для активного семенного возобновления березы. В связи с этим в составе ее ценопопуляции достигает максимума доля участия моночленных пространственных элементов (рис. 2a). Одновременно увеличивается до 10% доля крупных клональных колоний, включающих от 10 до 30 партикул.

Восстановление на поздней стадии сукцессии характерного для ненарушенных северотаежных темнохвойных лесов разновозрастного березового древостоя проявляет себя в 2.5-кратном по сравнению с предшествующей стадией увеличении доли многоствольных клонов, включающих от 2 до 7 стволов березы пушистой (рис. 2b). В то же время (по-видимому, из-за внутривидовой конкуренции) в 2 раза возрастает доля пространственных элементов, в которых отсутствует крупный подрост (рис. 2c). При этом среднее число экземпляров крупного подроста в составе элементов ценопопуляции достоверно не изменяется (1.2 ± 0.2 экз.). Существенно изменяется соотношение элементов с разным участием мелкого подроста березы пушистой (рис. 2d). Мелкий подрост входит в состав абсолютного большинства (85%) элементов. При этом начинают существенно преобладать (63%) элементы, в которых представлен только один экземпляр мелкого подроста. Если сопоставить эту величину с величиной доли участия в составе ценопопуляций березы моночленных элементов (66%), становится очевидным, что они сформированы почти исключительно одиночными особями мелкого подроста, которые имеют, безусловно, семенное происхождение и произрастают на ветровальных комплексах. Следует также отметить, что доля элементов, имеющих в своем составе 2–4 экземпляра мелкого подроста, снижается, а включающих более 5 экземпляров – напротив, возрастает. Можно предполагать, что повышение участия крупного и мелкого подроста в составе клональных колоний березы пушистой на поздних стадиях сукцессии обусловлено улучшением световых условий и условий минерального питания в крупных окнах, которые по мере их образования осваиваются в первую очередь более быстро растущей березой пушистой. Что касается компонентного разнообразия пространственных элементов ценопопуляций березы, то можно отметить закономерное увеличение доли однокомпонентных элементов, снижение доли 2-компонентных, но при этом некоторое повышение доли 3-компонентных (рис. 3a). Однокомпонентные элементы образованы в подавляющем большинстве случаев (85%) мелким подростом, что заметно отличает позднюю стадию сукцессии от двух предшествующих стадий (рис. 3b). При этом доля элементов, состоящих из крупного подроста, существенно (в 4 раза) снижается, а состоящих из деревьев – остается без изменения. В отношении состава 2-компонентных элементов следует отметить существенное повышение доли элементов, сформированных деревьями и крупным подростом и снижение доли элементов, состоящих только из подроста (рис. 3c).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное на территории Кольского полуострова в северотаежных кустарничково-зеленомошных сосново-еловых лесах, находящихся на разных стадиях послепожарного восстановления (давность пожара 8, 80, 155, 200 и 380 лет), свидетельствует о существенной перестройке структуры пространственных элементов ценопопуляций березы пушистой в процессе сукцессии. Для начальной стадии восстановления (8 лет после пожара) характерна максимальная доля (75%) многочисленных элементов (> 5 партикул при максимуме 57 партикул) и их наиболее низкое компонентное разнообразие: они образованы преимущественно мелким подростом. На средних стадиях сукцессии при давности пожара 150–200 лет в составе пространственных элементов ценопопуляций березы отмечается максимальное участие деревьев (35% всех элементов через 150 лет после пожара) и крупного подроста (65% всех элементов через 200 лет после пожара); наиболее высокая доля элементов, состоящих только из деревьев и крупного подроста (35–45%); преобладание одноствольных клонов над многоствольными. Поздняя стадия сукцессии (давность пожара 380 лет) отличается максимально высокой (65%) долей монотипных пространственных элементов, образованных особями мелкого подроста и преобладанием многоствольных элементов (крупных клональных колоний) над одноствольными.

Наблюдаемые структурные изменения являются закономерной реакцией ценопопуляции березы на изменение условий ценоотической среды. Основным фактором выступает разнонаправленное изменение напряженности внутри-

межпопуляционной конкуренции в процессе сукцессионной динамики сообществ. Напряженность конкуренции внутри ценопопуляций березы пушистой повышается в процессе формирования послепожарного березового древостоя, снижается в период его распада и формирования разновозрастного березового древостоя. Степень конкурентного воздействия хвойных на березу пушистую возрастает при их включении в состав древесного яруса; достигает максимума в период максимального развития хвойного древостоя (~150–200 лет после пожара), снижается в результате его постепенного возрастного распада и перехода к непрерывному процессу оконной динамики. При этом происходит локальное изменение условий минерального питания и освещенности; исчезают, а затем вновь формируются участки нарушенного напочвенного покрова, появляется крупный древесный детрит. Благодаря этому на разных этапах сукцессии складываются условия, либо благоприятствующие росту и развитию, вегетативному и семенному возобновлению березы, либо, напротив, подавляющие рост особей, препятствующие появлению молодых поколений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания БИН РАН (тема № 121032500047-1).

Авторы выражают благодарность выпускникам Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова А.А. Субботиной и Е.А. Волковой (Тумаковой) за помощь в сборе и первичной обработке полевого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ипатов В.С., Тархова Т.Н.* 1975. Количественный анализ ценоотических эффектов в размещении деревьев по территории. — Бот. журн. 60(9): 1237–1250. <http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=4228>
2. *Корчагин А.А.* 1976. Строение растительных сообществ. Полевая геоботаника. Т. 5. Л. 319 с.
3. *Askew G.R.* 1983. Notes: Two methods for evaluating spatial pattern in naturally regenerated loblolly pine stands. — For. Sci. 29(3): 514–518. <https://doi.org/10.1093/forestscience/29.3.514>
4. *Маслов А.А.* 1990. Количественный анализ горизонтальной структуры лесных сообществ. М. 160 с.
5. *Ястребов, А.Б., Познанская В.А.* 1993. Анализ влияния древостоя на подрост в сосновых борах Карелии. — Бот. журн. 78(4): 123–133. <http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19930404>
6. *Kuuluvainen T.* 1994. Gap disturbance, ground microtopography, and the regeneration dynamics of boreal coniferous forest in Finland: a review. — Ann. Zool. Fennici. 31(1): 35–51. <http://www.sekj.org/PDF/anzf31/anz31-035-051.pdf>
7. *Kuuluvainen T., Juntunen P.* 1998. Seedling establishment in relation to microhabitat variation in a windthrow gap in a boreal *Pinus sylvestris* forest. — J. Veg. Sci. 9(4): 551–562. <https://doi.org/10.2307/3237271>

8. *Svensson J.S., Jeglum J.K.* 2001. Structure and dynamics of an undisturbed old-growth Norway spruce forest on the rising Bothnian coastline. — *Forest Ecol. Manag.* 151(1–3): 67–79.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00697-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00697-6)
9. *Ильчуков С.В.* 2003. Динамика горизонтальной структуры производных лиственных насаждений. — *Изв. вузов. Лесн. журн.* 6: 29–34.
<http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/2003/ЛЖЖ%206-2003.pdf>
10. *Lundqvist L., Nilson K.* 2007. Regeneration dynamics in an uneven-aged virgin Norway spruce forest in northern Sweden. — *Scand. J. For. Res.* 22(4): 304–309.
<https://doi.org/10.1080/02827580701479717>
11. *Вайс А.А.* 2009. Горизонтальная структура древостоев Средней Сибири. — *Научный журн. КубГАУ.* 45(1): 194–208.
<http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/14.pdf>
12. *Тумакова Е.А., Горшков В.В., Ставрова Н.И.* 2015. Пространственная структура ценопопуляций *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в северотаежных сосновых лесах Кольского полуострова. — *Растит. ресурсы.* 51(4): 520–541.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24347085>
13. *Фардеева М.Б., Рогова Т.В.* 2012. Методы изучения пространственно-возрастной структуры популяций растений. — *Растит. ресурсы.* 48(4): 597–613.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18238835>
14. *Liu Y., Li F., Jin G.* 2014. Spatial patterns and associations of four species in an old-growth temperate forest. — *J. Plant Interact.* 9(1): 745–753.
<https://doi.org/10.1080/17429145.2014.925146>
15. *Секретенко О.П., Грабарник П.Я.* 2015. Анализ горизонтальной структуры древостоев методами случайных точечных полей. — *Сибирский лесной журнал.* 3: 32–44.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23846741>
16. *Петренко Т.Я., Омелько А.М., Жмеренецкий А.А., Ухваткина О.Н., Сибирина Л.А.* 2017. Формирование пространственной мозаики популяций *Abies nephrolepis* (Pinaceae) в кедрово-широколиственных лесах на юге Российского Дальнего Востока. — *Растит. ресурсы.* 53(4): 480–495.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30514442>
17. *Жмеренецкий А.А., Омелько А.М., Ухваткина О.Н., Петренко Т.Я., Сибирина Л.А.* 2018. Онтогенетическая и пространственная структура ценопопуляции *Betula costata* (Betulaceae) в ненарушенном кедрово-широколиственном сообществе на юге Российского Дальнего Востока. — *Растит. ресурсы.* 54(2): 260–279.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32792690>
18. *Жмеренецкий А.А., Омелько А.М., Ухваткина О.Н., Сибирина Л.А.* 2021. Структура популяционных мозаик и особенности развития *Acer mono* Maxim. и *Acer ukurunduense* Trautv. et Mey. в древостое кедрово-широколиственного леса Южного Сихотэ-Алиня. — *Russian Journal of Ecosystem Ecology.* 6(1): 1–20.
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2021-1-1>
19. *Левин Г.Г.* 1961. Проблема индивидуальности у растений. — *Бот. журнал.* 46(3): 432–447.
<http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19610303>
20. *Левин Г.Г.* 1964. Индивидуальность и жизненные циклы растений. — *Бот. журн.* 49(2): 272–280.
<http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1886>
21. *Чистякова А.А., Заугольнова Л.Б., Полтинкина И.В., Кутьина И.С., Лащинский Н.Н.* 1989. Диагнозы и ключи возрастных состояний лесных растений. Деревья и кустарники. М. 102 с.
22. *Сведения о землях лесного фонда по состоянию на 01.07.2021.* Федеральное Агенство Лесного Хозяйства.
<https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-ForestFund>
23. *Динамика лесных сообществ Северо-Запада России.* 2009. СПб. 276 с.
24. *Stavrova, N.I., Gorshkov V.V., Katjutin, P.N., Bakkal I.J.* 2020. The Structure of Northern Siberian Spruce–Scots Pine Forests at Different Stages of Post-Fire Succession. — *Forests.* 11(5): 558.
<https://doi.org/10.3390/f11050558>
25. *Горшков В.В., Катютин П.Н., Ставрова Н.И.* 2005. Структура популяций *Betula pubescens* (Betulaceae) в северотаежных лесных сообществах с различной давностью нарушения. — *Растит. ресурсы.* 41(2): 1–16.
26. *Уланова Н.Г., Жуковская О.В., Куксина Н.В., Демидова А.Н.* 2005. Структура и динамика популяции березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth) в наземноейниковых фитоценозах сплошных вырубок ельников в Костромской области. — *Бюлл. МОИП. Отд. Биол.* 110(5): 27–35.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9179265>
27. *Ставрова Н.И., Горшков В.В., Катютин П.Н.* Динамика распределения особей в популяциях ели сибирской и березы пушистой по величине диаметра ствола в процессе послепожарных сукцессий северотаежных еловых лесов. — *Лесоведение.* 2010. 3. С. 21–31.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13917398>
28. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* 2004. Классификация и диагностика почв России. Смоленск. 342 с.

29. *Мировая* реферативная база почвенных ресурсов 2014: Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт – исправленная и дополненная версия 2015. 2017. Доклады о мировых почвенных ресурсах 106. ФАО. 216 с.
<https://www.fao.org/publications/card/en/c/13794RU>
30. *Переверзев В.Н.* 2004. Лесные почвы Кольского полуострова. М. 232 с.
31. *Горшков В. В., Баккал И. Ю.* 2009. Нижние ярусы хвойных лесов. – Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб. С. 197–227.
32. *Горшков В.В.* 2002. Принципы и методы анализа давности и периодичности пожаров. – Методы изучения лесных сообществ. СПб. С. 201–213.
33. *Ставрова Н.И., Калимова И.Б., Горшков В.В., Дроздова И.В., Алексеева-Попова Н.В., Баккал И.Ю.* 2019. Долговременные послепожарные изменения характеристик почв в темнохвойных лесах Европейского севера. – Почвоведение. 52(2): 246–256.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19020138>

Structural Characteristics of *Betula pubescens* (Betulaceae) in Northern Taiga Forests

N. I. Stavrova^{a, *}, V. V. Gorshkov^{a, b}, P. N. Katyutin^{a, b}

^aKomarov Botanical Institute RAS, St. Petersburg, Russia

^bKirov St. Petersburg State Forest Engineering University, St. Petersburg, Russia

^cSt. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*e-mail: nstavrova@gmail.com

Abstract—The structure of spatial elements (simple and complex individuals, clonal colonies) in white birch (*Betula pubescens* Ehrh.) cenopopulations in northern taiga dwarf shrub—green moss Scots pine—Siberian spruce forests at different stages of post-fire succession (time since last fire from 8 to 380 years) was studied. It has been established that the composition of white birch cenopopulations, the ratio of elements formed by single individuals and different numbers of particles, component diversity of elements – the presence in their composition of different components of coenopopulations (trees, tall and small undergrowth), and proportion of each of the components, change significantly under succession. The features of the white birch spatial components structure, characteristics of the early, initial, middle and late stages of post-fire restoration of the northern taiga Scots pine—Siberian spruce forests were revealed. The successional processes in the northern taiga Scots pine—Siberian spruce forests, which may be factors of the structural transformations of *B. pubescens* cenopopulations, were characterized.

Keywords: *Betula pubescens*, cenopopulations, structure, successional dynamics, Scots pine—Siberian spruce forests, Kola Peninsula

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the State Assignment of the BIN RAS (no. 121032500047-1).

The authors express their gratitude to A.A. Subbotina and E.A. Volkova (Tumakova), the graduates of the Kirov St. Petersburg State Forestry Engineering University, for their help in collecting and primary processing of the field material.

REFERENCES

1. *Ipatov V.S., Tarkhova T.N.* 1975. Quantitative analysis of the coenotic effect in trees' distribution on the territory. – *Botanicheskii Zhurnal*. 60(9): 1237–1250.
<http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=4228> (In Russian).
2. *Korchagin A.A.* 1976. [Field geobotany. Structure of plant communities]. V. 5. Leningrad. 319 p. (In Russian).
3. *Askew G.R.* 1983. Notes: Two methods for evaluating spatial pattern in naturally regenerated loblolly pine stands. – *For. Sci.* 29(3): 514–518.
<https://doi.org/10.1093/forestscience/29.3.514>
4. *Maslov A.A.* 1990. [Quantitative analysis of the horizontal structure of forest communities]. Moscow. 160 p. (In Russian).
5. *Yastrebov A.B., Poznanskaya V.A.* 1993. The analysis of the impact of the tree stand on the regrowth in pine forests of Karelia. – *Botanicheskii Zhurnal*. 78(4): 123–133.
<http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19930404> (In Russian).

6. *Kuuluvainen T.* 1994. Gap disturbance, ground microtopography, and the regeneration dynamics of boreal coniferous forest in Finland: a review. — *Ann. Zool. Fennici*. 31(1): 35–51.
<http://www.sekj.org/PDF/anzf31/anz31-035-051.pdf>
7. *Kuuluvainen T., Juntunen P.* 1998. Seedling establishment in relation to microhabitat variation in a windthrow gap in a boreal *Pinus sylvestris* forest. — *J. Veg. Sci.* 9(4): 551–562.
<https://doi.org/10.2307/3237271>
8. *Svensson J.S., Jeglum J.K.* 2001. Structure and dynamics of an undisturbed old-growth Norway spruce forest on the rising Bothnian coastline. — *Forest Ecol. Manag.* 151(1–3): 67–79.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00697-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00697-6)
9. *Ilchukov S.V.* 2003. Dynamics of horizontal structure of secondary deciduous stands. — *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 6: 29–34.
<http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/2003/ЛЖ%206-2003.pdf> (In Russian).
10. *Lundqvist L., Nilson K.* 2007. Regeneration dynamics in an uneven-aged virgin Norway spruce forest in northern Sweden. — *Scand. J. For. Res.* 22(4): 304–309.
<https://doi.org/10.1080/02827580701479717>
11. *Vays A.A.* 2009. Horizontal structure of stand of trees in Mid-Siberia. — *Scientific journal of KubSAU*. 45(1): 194–208.
<http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/14.pdf> (In Russian)
12. *Tumakova E.A., Gorshkov V.V., Stavrova N.I.* 2015. Spatial structure of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) coenopopulations in the northern taiga Scots pine forests of Kola Peninsula. — *Rastitelnye resursy*. 51(4): 520–541.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24347085> (In Russian)
13. *Fardeeva M.B., Rogova T.V.* 2012. Methods of investigation in spatial and age structure of plant populations. — *Rastitelnye resursy*. 48(4): 597–613.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18238835> (In Russian)
14. *Liu Y., Li F., Jin G.* 2014. Spatial patterns and associations of four species in an old-growth temperate forest. — *J. Plant Interact.* 9(1): 745–753.
<https://doi.org/10.1080/17429145.2014.925146>
15. *Secretenko O.P., Grabarnik P.Ya.* 2015. Analysis of tree stand horizontal structure using random point field methods. — *Siberian J. Forest Science*. 3: 32–44. (In Russian).
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23846741>
16. *Petrenko T.Ya., Omelko A.M., Zhmerenetsky A.A., Ukhvatkina O.N., Sibirina L.A.* 2017. Formation of a spatial mosaic of *Abies nephrolepis* (Pinaceae) populations in Korean pine-broadleaved forests in the south of Russian Far East. — *Rastitelnye resursy*. 53(4): 480–495. (In Russian).
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30514442>
17. *Zhmerenetsky A.A., Omelko A.M., Ukhvatkina O.N., Petrenko T.Ya., Sibirina L.A.* 2018. Ontogenetic and spatial distribution of *Betula costata* (Betulaceae) cenotic population in undisturbed Korean pine-broadleaved forest at the south of the Russian Far East. — *Rastitelnye resursy*. 54(2): 260–279. (In Russian).
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32792690>
18. *Zhmerenetsky A.A., Omelko A.M., Ukhvatkina O.N., Sibirina L.A.* 2021. Structure of population mosaics and features of development of *Acer mono* Maxim. and *Acer ukurunduense* Trautv. et Mey. in Korean pine-broadleaved forest in the South of the Russian Far East. — *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 6(1): 1–20. (In Russian).
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2021-1-1>
19. *Levin G.G.* 1961. [The problem of individuality in plants]. — *Botanicheskii Zhurnal*. 46(3): 432–447. (In Russian).
<http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19610303>
20. *Levin G.G.* 1964. [The individuality and life cycles of plants]. — *Botanicheskii Zhurnal*. 49(2): 272–280.
<http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=1886> (In Russian).
21. *Chistyakova A.A., Zaugolnova L.B., Poltinkina I.V., Kut'ina I.S., Lashchinsky N.N.* 1989. [Diagnoses and keys to the age conditions of forest plants. Trees and shrubs]. Moscow. 102 p. (In Russian).
22. *Information about the lands of the forest fund as of 07/01/2021.* Federal Forestry Agency.
<https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-ForestFund> (In Russian).
23. [Dynamics of forest communities in the North-West of Russia]. 2009. St. Petersburg. 276 p. (In Russian).
24. *Stavrova N.I., Gorshkov V.V., Katjutin P.N., Bakkal I.J.* 2020. The Structure of Northern Siberian Spruce–Scots Pine Forests at Different Stages of Post-Fire Succession. — *Forests*. 11(5): 558.
<https://doi.org/10.3390/f11050558>
25. *Gorshkov V.V., Katjutin P.N., Stavrova N.I.* 2005. [Population structure of *Betula pubescens* (Betulaceae) in the northern taiga forest communities of different post-disturbance age]. — *Rastitelnye resursy*. 41(2): 1–16. (In Russian).
26. *Ulanova N.G., Zhukovskaya O.V., Kuksina N.V., Demidova A.N.* 2005. Structure and dynamics of silver birch (*Betula pendula* Roth) in calamagrostis epigeios communities of spruce clear-cuts in Kostroma region. — *Bull. Moscow Soc. Nat. Biol. Ser.* 110(5): 27–35. (In Russian)
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9179265>

27. *Stavrova N.I., Gorshkov V.V., Katyutin P.N.* 2010. Dynamics of tree distribution in Siberian spruce and white birch populations according to trunk diameter in the course of postfire succession in northern taiga spruce forests. – Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie). 3: 21–31. (In Russian).
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13917398>
28. *Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimov M.I.* 2004. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk. 342 p. (In Russian).
29. World Reference Base for Soil Resources 2014, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps –update 2015. 2015. World Soil Resources Reports 106. FAO. 203 p.
<https://www.fao.org/publications/card/en/c/942e424c-85a9-411d-a739-22d5f8b6cc41>
30. *Pereverzev V.N.* 2004. [Forest soils of the Kola Peninsula]. Moscow. 232 p. (In Russian).
31. *Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu.* 2009. [Lower layers of coniferous forests]. – In: [Dynamics of forest communities in the North-West of Russia]. Saint Petersburg. P. 197–227. (In Russian).
32. *Gorshkov V.V.* 2002. [Principles and methods for analyzing the prescription and periodicity of fires]. – In: [Methods for studying forest communities]. Saint Petersburg. P. 201–213. (In Russian).
33. *Stavrova N.I., Kalimova I.B., Gorshkov V.V., Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Bakkal I.Yu.* 2019. Long-term post-fire changes of soil characteristics in dark coniferous forests of the European North]. – Eurasian Soil Science. 52(2): 218–227.
<https://doi.org/10.1134/S1064229319020133>

**ИНТРОДУКЦИЯ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ**

**БИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ *JUGLANS REGIA*
(JUGLANDACEAE) ПРИ ИНТРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ
СРЕДНЕГО ПРЕДУРАЛЬЯ**© 2022 г. Н. М. Кузьмина¹, *, А. В. Федоров¹¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук”, г. Ижевск, Россия

*e-mail: kuzmina1956@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Исследованы биоэкологические особенности сортообразцов *Juglans regia* L., отобранных при интродукции в условиях Среднего Предуралья в период 2019–2021 гг. Выделен наиболее перспективный для селекционных работ образец *J. regia* № 2 скороплодной формы с наилучшими показателями полученного урожая (средняя масса плодов 7.06 г, масса самого крупного плода – 10.22 г). Коэффициент изменчивости по массе (19–20%) свидетельствует о наличии возможностей селекционного улучшения. Отмечено, что на качество урожая 2019 г. положительно повлияло превысившее норму количество осадков, хотя вегетационный период был прохладным, со среднесуточной температурой в июне, июле и августе ниже нормы на 1–2 °С, что является некомфортным для произрастания теплолюбивых видов. Одним из важных качеств *J. regia* L. при интродукции в Среднем Предуралье является морозоустойчивость. Зимой 2020–2021 гг. температура в ночное время опускалась ниже –30 °С, однако это не привело к повреждениям исследуемых образцов скороплодной формы *J. regia*. Фенологические исследования показали, что в условиях Среднего Предуралья за вегетационный период *J. regia* проходит все фазы развития. Сделан вывод о перспективности использования *J. regia* для любительского плодового садоводства и озеленения садов и парков городов Среднего Предуралья и сопредельных регионов.

Ключевые слова: культура вида *J. regia*, климатические условия, фенология, морфология плодов, оценка степени поражения от мороза, первичная интродукция, Среднее Предуралье, селекция

DOI: 10.31857/S0033994622040070

Глобальное потепление климата благоприятствует продвижению теплолюбивых культур дальше на север. Одна из таких культур – *Juglans regia* L. (Juglandaceae). Это мощные высоко декоративные деревья с раскидистой кроной. Вид естественно произрастает в горных областях Западной Грузии, Афганистана, Средней и Малой Азии. Летом крону *J. regia* украшают очень крупные, длиной до 1 м сложные листья. Особую ценность представляют плоды *J. regia*. В составе плодов содержится большое количество органических и минеральных веществ. Орехи обладают фитонцидными свойствами [1].

Для теплолюбивых культур большое значение имеет степень их морозоустойчивости. В США, Германии, Белоруссии, Нидерландах выведены сорта *J. regia*, выдерживающие морозы до –38 °С [2]. Важным свойством орехоплодных, особенно при возврате заморозков весной, является апомиксис – закладка плодов в отсутствие опыления. Некоторые формы *J. regia* из Центральной и

Восточной Европы, Китая имеют данный признак [3–5]. В России на научной основе продвижением орехоплодных культур на север начал заниматься еще И.В. Мичурин. В настоящее время *J. regia* и другие виды орехоплодных культивируют вплоть до Москвы и Санкт-Петербурга [6–11]. Самой северной точкой культивирования *J. regia* является Ботанический сад Петра Великого Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН в Санкт-Петербурге (59°57' с.ш., 30°19' в.д.). Из видов орехоплодных *J. regia* появился в Ботаническом саду Петра Великого первым, он был включен в Каталог М.М. Тереховского в 1796 г. При испытании Э.Л. Регелем в 1871 г. на открытом воздухе вымерзал. Достоверно выращивается в открытом грунте с 1914 г. В XX в. сильно обмерзал, особенно, в аномально суровые зимы, в частности зимой 1986/87 г. В настоящее время условия изменились в результате потепления климата и растения в коллекции стали перезимовывать лучше. Двадцать деревьев современной коллек-

Таблица 1. Характеристика объектов исследования
Table 1. Characteristics of the objects of study

Вид, № сортообразца Species name, cultivar number	Происхождение семенного материала The seed provenance	Год посева Year of sowing	Год высадки Year of planting	Высота в 2021 г., см Height in 2021, cm	Диаметр на уровне почвы в 2021 г., см Diameter at soil level, 2021, cm
<i>Juglans regia</i> № 1	ЦРБС г. Киев (форма скороплодная), 1987 г. Ботанический сад Самарского ГУ, 2011 г. посеян в Отделе интродукции, г. Ижевск CRBS Kyiv (early-fruiting form), 1987 Botanical Garden of Samara State University, 2011 sown in the Introduction Department, Izhevsk	2011	2013	109	2.4
<i>Juglans regia</i> № 2		2011	2013	222	3.9
<i>Juglans regia</i> № 3		2011	2013	122	2.8
<i>Juglans regia</i> № 4		2011	2013	238	4.3

ции представляют пять поколений. Улучшение адаптационных возможностей заметно проявляется, начиная с пятого поколения [12].

Город Ижевск (географические координаты: 56°50'59.3" с.ш., 53°12'16.2" в.д.) расположен на 3° с.ш. южнее Санкт-Петербурга. Однако, в связи с усилением континентальности климата в восточном направлении, в Ижевске по сравнению с Санкт-Петербургом укорачивается вегетационный период, становятся более низкими зимние температуры. Поэтому культивирование *J. regia* в Среднем Предуралье имеет свои сложности в связи с более жесткими климатическими условиями. Однако проведенные первичные поисковые исследования позволяют отметить перспективность работ по интродукции *J. regia* в Среднем Предуралье. С учетом полученных результатов по первичной интродукции и благодаря потеплению климата, представители рода *Juglans* могут считаться перспективными объектами в зеленом строительстве, в лесном хозяйстве и в садоводстве.

В 2011 г. на территории Отдела интродукции и акклиматизации растений Удмуртского Научного Центра УрО РАН (УдмФИЦ УрО РАН) был произведен посев *J. regia* скороплодной формы. В 2019 г. при первичных интродукционных испытаниях вида в Среднем Предуралье был проведен анализ биологических характеристик полученных семян *J. regia* и отобрано четыре образца для дальнейших испытаний [13].

Целью данной работы являлось выявление перспективных образцов из отобранных при первичных интродукционных испытаниях семян *J. regia* для селекционных работ в условиях Среднего Предуралья.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись четыре образца саженцев *J. regia*, отобранных в 2019 г. по

итогах первичных интродукционных испытаний в Среднем Предуралье, проведенных в городе Ижевске и Каракулинском административном районе Удмуртской Республики. Семенным материалом был получен в 2011 г. весной из Ботанического сада Самарского ГУ и посеян на территории Отдела интродукции и акклиматизации растений УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск. В 2013 г. 3 саженца *J. regia* были высажены на постоянное место на территории Отдела интродукции и акклиматизации растений г. Ижевск и 1 саженец — в Каракулинском административном районе Удмуртской Республики. Характеристика объектов исследования представлена в табл. 1.

Город Ижевск расположен в Среднем Предуралье, климат территории умеренно-континентальный с продолжительной многоснежной зимой, теплым летом и хорошо выраженными переходными сезонами (весной и осенью). Январь является самым холодным месяцем в году. В 1978 г. 31 декабря был отмечен абсолютный минимум — 47.5 °С. Ижевск находится в зоне достаточного увлажнения. Ограничивающим фактором интродукции теплолюбивых культур в Среднем Предуралье до недавнего времени являлись поздние весенние заморозки. В последние годы на фоне глобального потепления интенсивность возвратных весенних заморозков снизилась [14, 15].

Метеорологические показатели вегетационных сезонов в период наблюдений (2019–2021 гг.) в г. Ижевске представлены в табл. 2. Активной температурой для развития большинства древесных растений умеренной зоны считается 10 °С и выше. При температуре выше 25 °С у растений усиливается транспирация, а недостаточное увлажнение может вызвать нарушение водного баланса [16]. В июне 2019 г. на фоне дефицита осадков в 15 случаях ночные температуры были ниже 10 °С, дневные температуры в 9 случаях принимались выше 25 °С. Июль был более теплым.

Таблица 2. Среднемесячные метеорологические данные периода исследований 2019–2021 гг.
Table 2. Monthly average meteorological data for the study period 2019–2021.

Период исследования Study period	Среднемесячная температура, °С Monthly average temperature, °C	Фактическая среднемесячная температура, °С True monthly average temperature, °C	Отклонение от нормы, °С Deviation from the norm, °C	Норма суммы осадков, мм Precipitation rate, mm	Выпало осадков, мм Rainfall, mm	Выпало осадков от нормы, % Precipitation from the norm, %
Май 2019 May 2019	11.7*	13.8	2.1	48*	62	129
Май 2020 May 2020	11.7*	13.3	1.6	48*	36	76
Май 2021 May 2021	12.3*	16.9	4.6	45*	21	47
Июнь 2019 June 2019	17*	16	–1	62*	43	69
Июнь 2020 June 2020	17*	14.6	–2.4	62*	28	45
Июнь 2021 June 2021	17*	20.3	3.3	62*	32	51
Июль 2019 July 2019	18.9*	16.7	–2.2	59*	72	124
Июль 2020 July 2020	18.9*	20.7	1.8	59*	99	170
Июль 2021 July 2021	18.9*	19.5	0.7	66*	79	119
Август 2019 August 2019	16*	14.1	–1.9	67*	137	204
Август 2020 August 2020	16*	15.9	–0.1	67*	37	55
Август 2021 August 2021	16.2*	19.9	3.7	63*	47	75

Примечание: * – использованы данные сайта “Погода и климат. Климатический мониторинг. Ижевск” [23].
 Note: * – Data from the site “Weather and climate. Climate monitoring. Izhevsk” [23].

Ночные температуры только в 6 случаях опускались ниже 10 °С, дневные в 7 случаях были выше 25 °С. Осадков выпало больше нормы – 125%. В августе в 16 случаях ночная температура фиксировалась ниже 10 °С, днем всего в 4 случаях поднималась выше 25 °С. Осадков выпало в два раза больше нормы – 203% (табл. 2).

Июнь 2020 г. характеризовался дефицитом осадков и был относительно прохладным. Днев-

ные температуры выше 25° С отмечены всего в 4 случаях. Ночные температуры опускались ниже 10 °С в 17 случаях. Июль был теплым и отличался хорошей влагообеспеченностью. В 24 случаях была зафиксирована дневная температура выше 25 °С, и всего в 2 случаях ночью температура опускалась ниже 10 °С. В августе среднемесячная температура соответствовала норме, но отмечался дефицит влаги (табл. 2). Вторая декада августа

была прохладной, температура не поднималась выше 20 °С. Ночные температуры, не превышали 10 °С.

Май 2021 г. был аномально жарким. Отклонение от нормы составило +4.6 °С, при этом количество осадков составило всего 47% от нормы. С 9 по 20 мая был засушливый период с аномальными, для этого времени, дневными температурами в пределах 25–32 °С. Во второй половине июня дневные температуры находились в пределах 25–34 °С на фоне дефицита осадков (50%). Ночные температуры ниже 10 °С были зафиксированы в 10 случаях. В июле высокие дневные температуры в пределах 25–33 °С были зафиксированы в 22 случаях, но осадков выпало больше нормы – 119% (табл. 2). В августе 2021 г. высокие дневные температуры в пределах 25–33 °С наблюдались в 20 случаях, количество осадков составило 75% от нормы. Ночные температуры ниже 10 °С отмечены в 7 случаях [17].

Морозостойкость саженцев определялась согласно программе и методике сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур [18]. Давалась оценка общей степени подмерзания в баллах. Ежегодно проводились фенологические наблюдения и учет показателей роста и развития растений. В ходе исследований анализировались морфологические признаки полученных плодов (масса плода, поперечный диаметр плода). Количественные данные были обработаны статистическими методами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения хорошего урожая *J. regia* необходимо тепло и достаточное увлажнение. Годы исследования (2019–2021 гг.) отличались по погодным характеристикам вегетационных периодов (табл. 2). Летний период 2019 г. был прохладным, характеризовался хорошей влагообеспеченностью. Летний период 2020 г. отличался прохладным и сухим июнем, аномально жарким и влажным июлем, прохладным и сухим августом. В вегетационный период 2021 г. с мая по август наблюдались периоды (от 20 до 28 дней) с высокими дневными температурами, составлявшими 25–33 °С; в мае, июне и августе отмечался дефицит влаги [17]. Условия вегетационного периода 2021 г. можно назвать аномальными для произрастания растений в Среднем Предуралья. Возвратных заморозков в конце мая не зафиксировано.

В Воронежской области накоплен некоторый положительный опыт по интродукции *J. regia*. А.В. Славский [19] отмечает, что для достижения приемлемой зимостойкости *J. regia*, сумма активных температур должна постоянно превышать 3000 °С. Это не только с большой вероятностью избавит от повреждений весенними и осенними

заморозками, но и позволит растениям полноценно подготовиться к зимним условиям, накопив необходимое количество питательных веществ.

Сотрудниками Удмуртского государственного университета А.В. Шумихиной и В.С. Мараткановой выяснено, что период со среднесуточными температурами воздуха выше 0 °С в г. Ижевск возрос от 205 дней в середине прошлого столетия до 218 дней в XXI столетии. Средняя сумма активных температур каждого последующего десятилетия, начиная с 1970-х гг., выше значения предыдущего десятилетия. В период с 2011 по 2018 г. ее средняя величина достигла максимума – 2276 °С [20].

Зима 2020–2021 гг. в районе исследований была хорошей проверкой на морозоустойчивость отобранных образцов *J. regia*. Температура в ночное время опускалась ниже –30 °С. Самым холодным осенне-зимне-весенним периодом был период 2020–2021 гг. Сумма отрицательных температур достигла 1511.1 °С. Самым холодным месяцем в 2021 г. был февраль: в 12 случаях температура была в пределах от –25 до –30 °С. Самая низкая температура зафиксирована 23 февраля – –32.7 °С. Сумма отрицательных температур в феврале достигла 464.8 °С. Самым теплым осенне-зимне-весенним периодом был период 2019–2020 гг. с суммой отрицательных температур 643.6 °С. Февраль 2019 г. был значительно теплее, чем в 2021 г.: сумма отрицательных температур составила 155 °С [17].

Исследуемые особи скороплодной формы *J. regia*, произрастающие на территории Отдела интродукции и акклиматизации растений УдмФИЦ УрО РАН, в сезон 2020–2021 гг. перезимовали без повреждений. Суммарный балл степени подмерзания с 2014 по 2021 гг. представлен в табл. 3. По полученным данным можно отметить более высокую морозостойкость образцов № 2 и 3.

Высокое качество орехов и ядра является важнейшим качеством сорта. Плоды *J. regia* массой 12–14 г считаются крупными, 9–11 г – средними [22]. В 2015 г. у образца *J. regia* № 1 наблюдалось первое цветение. Плод не образовался. У образца № 2 первое цветение наблюдалось в 2017 г. Завязалось три плода. До стадии созревания дошел только один плод, который был снят 10 октября. В 2019 г. плодоношение отмечено у образца № 2 (20 плодов). Самый крупный орех в 2019 г. в условиях Среднего Предуралья у *J. regia* образца № 2 весил 10.23 г. К среднему размеру отнесено 4 (20%) из 20 полученных плодов. Средняя масса полученных плодов составила 7.06 ± 0.33 г. Коэффициент изменчивости по массе $C = 20.1\%$ говорит о возможностях селекционного улучшения [13]. В 2020 г. плодоношение наблюдалось у всех 4-х образцов: у трех образцов произрастающих на территории Отдела интродукции и акклиматизации растений УдмФИЦ УрО РАН г. Ижевск и об-

разца № 4, произрастающего в Южном агроклиматическом районе УР.

Морфология плодов представлена в табл. 4. Наилучшие морфологические показатели отмечены у образца № 4. Средняя масса плодов — 6.33 ± 0.68 г. В Центральном агроклиматическом районе УР (Ижевск) самые крупные плоды отмечены у образца № 2, средняя масса которых составила 5.53 ± 0.41 г. У образца № 1 и 3 первый год плодоношения. Средняя масса плодов у образца № 3 составила 5.22 ± 0.11 г. У образца № 1 отмечено гроздевое плодоношение. Средняя масса плодов — 3.83 ± 0.29 г.

В 2021 г. урожай орехов в количестве 24 штук был получен только от формы № 2.

Начало цветения женских цветков зафиксировано у всех трех образцов *J. regia* 21 мая. Цветение мужских сережек зафиксировано у образцов №№ 1 и 2 — 17 мая, а у образца № 3 — 15 мая. У *J. regia* образца 1 и 3 все цветки опали, у образца № 2 опали частично, в основном с верхней части. На нижних и на средних ветках завязались плоды. Можно предположить, что опадение женских цветков произошло из-за аномально-жаркого периода в середине мая с дефицитом влагообеспечения. Для хорошего развития *J. regia* необходимо тепло и достаточное увлажнение. С 9 по 20 мая был засушливый период с аномальными, для этого времени в Среднем Предуралье, дневными температурами в пределах $25\text{--}32$ °С. Осадки выпали 21 мая. В 20 случаях дневные температуры мая поднимались выше 20 °С. В течение месяца было всего 11 дней с осадками в сумме 21 мм, это всего 47% от нормы.

В табл. 5 представлены данные морфологии полученных плодов *J. regia* в 2021 г. Полученная средняя масса *J. regia* формы № 2 (4.98 ± 0.19 г) ниже полученных в 2019 и 2020 гг.

В табл. 6 дается сравнительная характеристика средней массы *J. regia* сортообразца № 2 в период 2019–2021 гг. По полученным данным видно, что наибольшие средние данные морфологических признаков получены в 2019 г. Более всего различается масса орехов. В 2019 г. был зафиксирован самый крупный полученный орех от формы № 2 массой 10.22 г. В 2020 г. было получено всего 7 орехов, средняя масса которых меньше, чем в 2019 г. на 1.53 г. Наименьшие показатели морфологических признаков зафиксированы в 2021 г.

Важным качеством для теплолюбивых культур в средней полосе России является короткий вегетационный период. Было проведено сравнение фенологии исследуемых образцов № 1, 2, 3 *J. regia* произрастающих на территории УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск с фенологическими наблюдениями за *J. regia* в Воронежской области [21].

Распускание почек у всех исследуемых нами образцов *J. regia* в 2019–2021 гг. отмечено в период

Таблица 3. Общая степень подмерзания саженцев *Juglans regia*, высаженных на территории Отдела интродукции и акклиматизации растений (2014–2021 гг.)

Table 3. The degree of freezing of *Juglans regia* seedlings planted at the Department of Plant Introduction and Acclimatization (2014–2021)

Годы исследования Study years	Оценка, баллы Assessment points		
	<i>Juglans regia</i> , №		
	№ 1	№ 2	№ 3
2014	1	1	1
2015	1	1	1
2016	2	2	2
2017	1	1	2
2018	1	1	1
2019	0	0	1
2020	0	0	1
2021	1	0	1
Всего баллов Total points	7	6	10

с 8 по 9 мая, в 2021 г. 4 мая. Эти сроки не отличаются по срокам распускания почек *J. regia* в Воронежской области. Отличие наблюдается по осенним фазам. Начало пожелтения *J. regia* у образцов № 1, 2, 3 отмечено с 21 по 25 сентября, а по Воронежской области начало пожелтения листвы отмечается на две недели раньше 4 сентября. Начало листопада у исследуемых нами образцов *J. regia* в условиях Среднего Предуралья зафиксировано 2–4 октября. В условиях Воронежской области начало листопада отмечалось почти на три недели раньше с 13 сентября, конец листопада — с 27 сентября по 4 октября. У исследуемых образцов *J. regia* в условиях Среднего Предуралья конец листопада наблюдался с 4 по 18 октября.

Начало пыления в условиях Среднего Предуралья и Воронежской области отмечено почти в одно, и тоже время — 17–18 мая. Начало развития женских цветков по Ижевску отмечалось 19–22 мая, а окончание — с 31 мая по 8 июня. По Воронежской области начало развития женских почек на две недели раньше — 15–17 мая. Вегетационный период исследуемых образцов *J. regia* по данным наблюдений 2019–2021 гг. в условиях Среднего Предуралья в связи с более поздним листопадом по сравнению с фенологией по Воронежской области продолжительней более чем на две недели и составляет 158–162 дня. У *J. regia* образца № 2 вегетационный период короче на три дня по сравнению с образцами №№ 1 и 3. Продолжительность вегетационного периода зависит от погодных условий — главным образом от даты наступления осенних заморозков. Исследуемые образцы *J. regia* проходят все фазы развития в условиях Среднего Предуралья.

Таблица 4. Морфологические показатели плодов образцов *Juglans regia* скороплодной формы на девятый год после посева, 2020 г.
Table 4. Morphological parameters of fruits of the early-maturing forms of *Juglans regia* on the ninth year after sowing, 2020

№	Морфологические показатели плодов Morphological indicators of fruits		
	масса, г weight, g	высота, см height, cm	средний диаметр, см average diameter, cm
Сортообразец № 1 Variety sample no. 1			
1	4.94	3.3	2.55
2	3.64	3.0	2.15
3	3.52	2.9	2.25
4	4.16	3.3	2.45
5	4.61	3.3	2.55
6	2.87	2.8	2.05
7	3.09	2.9	2.2
Средняя величина Average value	3.83 ± 0.29	3.07 ± 0.08	2.31 ± 0.08
С, %	20.1	7.21	8.71
Сортообразец № 2 Variety sample no. 2			
1	6.03	2.7	2.55
2	4.58	2.2	2.15
3	7.02	3.2	2.65
4	6.04	2.6	2.35
5	5.73	2.4	2.45
6	5.61	2.4	2.45
7	3.7	2.0	2.0
Средняя величина Average value	5.53 ± 0.41	2.50 ± 0.15	2.37 ± 0.09
С, %	19.57	19.57	9.57
Сортообразец № 3 Variety sample no. 3			
1	5.15	2.5	2.4
2	5.53	2.4	2.5
3	5.15	2.6	2.45
4	5.04	2.5	2.35
Средняя величина Average value	5.22 ± 0.11	2.50 ± 0.04	2.43 ± 0.03
С, %	4.11	3.27	2.66
Образец № 4 (Южный агроклиматический район УР, Федоров) Sample no. 4 (Southern agro-climatic region of the UR, Fedorov)			
1	6.87	2.8	2.6
2	7.22	3.2	2.65
3	6.92	2.8	2.55
4	4.3	2.2	2.2
Средняя величина Average value	6.33 ± 0.68	2.75 ± 0.21	2.50 ± 0.10
С, %	21.50	14.99	8.16

Примечание. С, % – коэффициент изменчивости.
 Note. С, % – coefficient of variability.

Таблица 5. Морфологические данные плодов *Juglans regia* сортообразца № 2, 2021 г.
Table 5. Morphological data of fruits of *Juglans regia* variety sample no. 2, 2021

№ плода N of fruit	Морфологические показатели плодов, 2021 Morphological indicators of fruits, 2021		
	масса, г weight, g	высота, см height, cm	средний диаметр, см average diameter, cm
1	5.65	2.4	2.3
2	5.64	2.7	2.5
3	4.47	2.4	2.3
4	5.64	2.6	2.4
5	5.43	2.5	2.3
6	7.66	3.2	2.6
7	5.78	2.7	2.4
8	4.65	2.6	2.3
9	6.12	2.7	2.5
10	5.41	2.5	2.3
11	4.38	2.3	2.1
12	3.7	2.3	2.1
13	5.33	2.6	2.3
14	5.19	2.4	2.3
15	4.41	2.3	2.1
16	5.29	2.5	2.3
17	4.37	2.3	2.3
18	4.27	2.3	2.0
19	4.28	2.6	2.4
20	5.66	2.5	2.3
21	3.47	2.1	1.9
22	4.34	2.3	2.1
23	4.13	2.3	2.2
24	4.24	2.4	2.1
Средняя величина Average value	4.98 ± 0.19	2.48 ± 0.05	2.27 ± 0.03
C, %	18.52 ± 0.90	8.90 ± 0.62	7.32 ± 0.56

Таблица 6. Сравнительная характеристика морфологии плодов *Juglans regia* образца № 2 в период 2019–2021 гг.
Table 6. Comparative characteristics of the fruit morphology of *Juglans regia* sample no. 2 in 2019–2021.

Статистические показатели Statistical indicators	Годы исследований Years of research								
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
	морфологические показатели плодов morphological indicators of fruits								
	масса, г weight, g			высота, см height, cm			средний диаметр, см average diameter, cm		
Средняя величина Average value	7.06	5.53	4.98	2.63	2.50	2.48	2.39	2.37	2.27
Коэффициент вариации, C, % Coefficient of variation, C, %	20.1	19.57	18.52	8.56	19.57	8.90	8.25	9.57	7.32

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При интродукции в условиях Среднего Предуралья сортообразцов *Juglans regia* L. в период 2019–2021 гг. наблюдались периоды с разными погодными характеристиками, не всегда комфортными для развития растений. Вегетационный период 2021 г. можно назвать аномальным по условиям из-за высоких дневных температур в пределах 25–33 °С (от 20 до 28 дней за месяц) с мая по август и дефицита влаги в мае, июне и августе. В зимний период 2020–2021 гг. сумма отрицательных температур достигла 1511.1 °С, превышая более чем в два раза суммы отрицательных температур зимнего периода 2019–2020 гг. В феврале 2021 г. в 12 случаях была зафиксирована температура в пределах от –25.1 до –32 °С. Все исследуемые образцы *J. regia* перенесли эти морозы без поражений. Наиболее комфортным для развития исследуемых сортообразцов *J. regia* был вегетативный период 2019 г. Он характеризовался прохладным летом с хорошим влагообеспечением [17].

В 2019 г. был получен самый крупный орех массой 10.23 г. У 4-х из 20 полученных плодов (20%) размер был средним, большинство плодов отнесены к категории мелких. В 2020 г. все плоды были отнесены к группе мелких. Наилучшие морфологические показатели плодов отмечены у образца № 4, произрастающего в Южном агроклиматическом регионе Удмуртии. Средняя масса плодов составила 6.33 ± 0.68 г (табл. 3). В Центральном агроклиматическом районе УР (г. Ижевск) самые крупные плоды *J. regia* отмечены у образца № 2, средняя масса которых составила 5.53 ± 0.41 г. Качество полученных плодов в 2020 г. было ниже, чем в 2019 г. Можно предположить, что на качество плодов отрицательно по-

влиял интенсивный рост побегов (до 1 м) в июле месяце, после прохладного и сухого июня. В 2021 г. урожай орехов в количестве 24 штук был получен только от образца № 2. Средняя масса полученных орехов составляла 4.98 ± 0.19 г. На ухудшение качества урожая орехов повлияли аномально жаркие условия вегетационного периода 2021 г.

По результатам исследований 2019–2021 гг. выделен сортообразец № 2, плодоносивший каждый год и имеющий наилучшие морфологические данные плодов *J. regia* скороплодной формы (средняя масса плодов 7.06 ± 0.33 г). Коэффициент изменчивости по массе (19–20%) говорит о возможностях селекционного улучшения. Отмечено, что положительно на качество урожая в 2019 г. повлияло хорошее влагообеспечение в вегетационный период, хотя среднесуточная температура в июне, июле и августе была ниже нормы на 1–2 °С.

Фенологические наблюдения показали, что образцы, отобранные по итогам первичной интродукции *J. regia* в условиях Среднего Предуралья проходят все фазы развития. Начало осеннего расцветивания листьев у *J. regia* зафиксировано с 15 по 25 сентября, начало листопада – со 2 по 7 октября, конец листопада – с 13 по 18 октября.

В процессе исследования выявлен самый перспективный сортообразец *J. regia* (№ 2), который плодоносил при любых погодных условиях и имел наилучшие показатели полученного урожая. В целом, *J. regia* является перспективным видом для интродукционной работы, может быть использован для расширения ассортимента орехоплодных культур в любительском плодоводстве, а также для озеленения садов и парков городов Среднего Предуралья и сопредельных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щепотьев Ф.Л. 1985. Орехоплодные древесные породы. М. 224 с.
2. Germain E. 1997. Genetic improvement of the Persian walnut (*Juglans regia* L.). – Acta Hort. 442: 21–32. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.442.2>
3. Laiko R.E. 1990. Apomixis of walnut. – Acta Hort. 284: 233–236. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1990.284.31>
4. Solar A., Ivancic A., Stampar F., Hudina M. 2002. Genetic resources of walnut (*J. regia* L.) improvement in Slovenia: Evaluation of the largest collection of local genotypes. – Genet. Resour. Crop. Evol. 49(5): 491–501. <https://doi.org/10.1023/A:1013918601668>
5. Cosmulescu S., Botu M., Achim G. 2012. Determination of Apomictic Fruit Set Ratio in Several Romanian Walnut (*Juglans regia* L.) cultivars. – Not. Bot. Hort. Agrobiol. 40(1): 229–233. <https://doi.org/10.15835/nbha4016407>
6. Связева О.А. 1989. Итоги интродукции *Juglans regia* L в Ленинграде. – Растительные ресурсы. 25(2): 270–278.
7. Славский В.А., Николаев Е.А. 2009. Сравнительная характеристика орехов рода *Juglans* в Центральном Черноземье и перспективы введения их в культуру. – Лесной журн. Известия высших учебных заведений. 6: 29–34.
8. Богданов А.В. 2009. Биоэкологическое обоснование применения видов рода *Juglans* L. в условиях засушливого климата. – Аграрный вестник Урала. 8(62): 80–82. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18639554>
9. Васин Е.А. 2012. Зимостойкие орехи для нечерноземья. Настоящий хозяин. 3:48–51.
10. Соколова В.В., Швецов А.Н. 2018. Коллекция орехоплодных растений в лаборатории природной флоры Главного Ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН. – Достижения науки и техники АПК. 32(9): 56–59. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10913>

11. Славский В.А., Евлаков П.М. 2019. Устойчивость видов орехов рода *Juglans* к понижениям и резким перепадам температуры в Воронежской области. — Лесотехнический журн. 2(34): 90–96. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/10>
12. Фирсов Г.А., Васильев Н.П. 2015. Орех грецкий (*Juglans regia* L., *Juglandaceae*) в Ботаническом саду Петра Великого в Санкт-Петербурге. — Вестник Волгоградского гос. ун-та. Серия 11. Естественные науки. 3(13): 8–17. <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2015.3.1>
13. Кузьмина Н.М., Федоров А.В. 2020. Итоги первичной интродукции видов рода *Juglans* (*Juglandaceae*) в Среднем Предуралье. — Растительные ресурсы. 56(3): 241–249. <https://doi.org/10.31857/S0033994620030048>
14. Стурман В.И., Малькова И.Л., Загребина Т.А. 2002. Климат города. В сб.: Воздушный бассейн Ижевска. Москва–Ижевск. С. 16–23.
15. Адаховский Д.А. 2021. Климатические и фенологические индикаторы современного потепления на территории Удмуртской Республики (на примере г. Ижевска). — Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о земле. 31(1): 57–64.
16. Лосев А.П. 1994. Практикум по агрометеорологическому обеспечению растениеводства. Санкт-Петербург. 244 с.
17. Архив погоды в Ижевске. 2021. Данные метеостанции (2019–2021 гг.) Ижевск, Россия, (WMO ID)=28411. http://гр5.ру/Архив_погоды_в_Ижевске
18. Седов Е.Н. 1995. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел. 502 с.
19. Славский, В.А. Николаев Е.А., Калаев В.Н. 2013. Интродукция, селекция и культивирование орехов рода *Juglans* в Центральном Черноземье: Монография. Воронеж. 262 с.
20. Шумихина А.В., Маратканова В.С. 2019. Агроклиматические ресурсы тепла и влаги и их изменение на территории Удмуртской Республики. — Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о земле. 29(4): 560–565. <https://journals.udsu.ru/biology/article/view/4830>
21. Славский В.А. 2006. Интродукция и селекция ореха грецкого в Воронежской области. Автореф. дис. ... канд. с/х. наук. Воронеж. 23 с.
22. Балапанов И.М. 2014. Биологические аспекты в селекции Ореха грецкого. — Научный журнал КубГАУ. 101: 828–842. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22567409>
23. Погода и климат. Климатический мониторинг. Ижевск. <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=28411>

Bioecological Features of *Juglans regia* (*Juglandaceae*) under Introduction in the Middle Urals

N. M. Kuzmina^a, *, A. V. Fedorov^a

^a*Udmurt Federal Research Center of the UB RAS, Department of Plant Introduction and Acclimatization, Izhevsk, Russia*
*e-mail: kuzmina1956@mail.ru

Abstract—The paper presents the data of the analysis of the biological characteristics of *Juglans regia* L. selected samples according to the results of its primary introduction in the Middle Urals. The evaluated plants are growing at the Department of Introduction and acclimatization of plants (Izhevsk). For the normal development of *J. regia*, warmth and sufficient hydration are necessary. Over the study period of 2019–2021, the growing seasons with variable conditions were observed. The analysis of meteorological data of summer and autumn-winter-spring periods 2019–2021 is given. According to meteorological data, the summer of 2019 (June–August), was cool, with sufficient moisture. In the summer of 2020 June was cool and dry, July – abnormally hot and humid, and August – cool and dry. The growing season of 2021 was hot, with periods of high daytime temperatures in the range of 25–33 °C from May to August, with a shortage of moisture in May, June and August. According to the results of the research, the best characteristics had *J. regia* sample No. 2 – the early-maturing variety with the best resulting crop (average fruit weight 7.06 g) bearing fruit every year. The largest nut weighing 10.22 g was obtained. The coefficient of variability by weight $C = 19–20\%$ indicates the possibility for the selective improvement. The morphological data of the sample No. 2 fruit harvest shows that the growing season of 2019 was more favourable for the development of *J. regia*: although the average daily temperature in June, July and August was 1–2 °C below normal, the moisture supply was higher than normal. The obtained information shows that crop quality is greatly influenced by the amount of precipitation during the growing season. One of the important qualities of *J. regia* L. is its frost resistance in Middle Urals environment. The winter of 2020–2021 was a true test for the hardiness of the selected samples, as night temperatures dropped below –30 °C. Despite this, the studied samples of the early-fruiting form of *J. regia*, growing at the plot of the Department of Plant Introduction and Acclimatization of the UdmFRC UB RAS, over-wintered in 2020–2021 without frost injuries. Phenological studies of 2019–2021 have shown that in the Middle Urals walnut passes through all phases of development, demonstrating the prospects of using *J. regia* for amateur horticulture, and for urban greening in gardens and parks of the cities of the Middle Urals and adjacent regions.

Keywords: culture of *Juglans regia* species, climatic conditions, phenology, fruit morphology, degree of severity of frost damage, primary introduction, Middle Cis-Urals, selection

REFERENCES

1. *Schepotiev F.L.* 1985. [Walnut tree species]. Moscow. 224 p. (In Russian)
2. *Germain E.* 1997. Genetic improvement of the Persian walnut (*Juglans regia* L.). – *Acta Hort.* 442: 21–32. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.442.2>
3. *Laiko R.E.* 1990. Apomixis of walnut. – *Acta Hort.* 284: 233–236. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1990.284.31>
4. *Solar A., Ivancic A., Stampar F., Hudina M.* 2002. Genetic resources of walnut (*J. regia* L.) improvement in Slovenia: Evaluation of the largest collection of local genotypes. – *Genet. Resour. Crop. Evol.* 49(5): 491–501. <https://doi.org/10.1023/A:1013918601668>
5. *Cosmulescu S., Botu M., Achim G.* 2012. Determination of Apomictic Fruit Set Ratio in Several Romanian Walnut (*Juglans regia* L.) cultivars. – *Not. Bot. Hort. Agrobo.* 40(1): 229–233. <https://doi.org/10.15835/nbha4016407>
6. *Svyazeva O.A.* 1989. [Results of the introduction of *Juglans regia* L. in Leningrad]. – *Rastitelnye resursy.* 25(2): 270–278. (In Russian)
7. *Slavsky V.A., Nikolaev E.A.* 2009. [Comparative characteristics of nuts of the *Juglans* genus in the Central Chernozem region and the prospects for their introduction into culture]. – *Lesnoy zhurnal. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy.* 6: 29–34. (In Russian)
8. *Bogdanov A.V.* 2009. [Bioecological rationale for the use of species of the genus *Juglans* L. in arid climates]. – *Agrarnyy vestnik Urala.* 8(62): 80–82. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18639554> (In Russian)
9. *Vasin E.A.* 2012. [Winter-hardy nuts for the nonchernozem region]. – *Nastoyashchiy khozyain.* 3: 48–51. (In Russian)
10. *Sokolova V.V., Shvetsov A.N.* 2018. Collection of nut-bearing plants in the laboratory of natural flora of the N.V. Tsitsin Main Botanic Garden. – *Dostizheniya nauki i tekhniki APK.* 32(9): 56–59. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10913> (In Russian)
11. *Slavsky V.A., Evlakov P.M.* 2019. Sustainability of nuts of the genus *Juglans* to reductions and dangerous temperature differences in the Voronezh region. – *Lesotekhnicheskyy zhurnal.* 2(34): 90–96. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/10> (In Russian)
12. *Firsov G.A., Vasiliev N.P.* 2015. *Juglans regia* L., (*Juglandaceae*) in the Peter the Great Botanical Garden in St. Petersburg. – *Vestnik Volgogradskogo gos. un-ta. Seriya 11. Yestestvennyye nauki.* 3(13): 8–17. <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2015.3.1> (In Russian)
13. *Kuzmina N.M., Fedorov A.V.* 2020. Results of the primary introduction of species of the genus *Juglans* (*Juglandaceae*) in the Middle Cis-Urals. – *Rastitelnye resursy.* 56(3): 241–249. <https://doi.org/10.31857/S0033994620030048> (In Russian)
14. *Sturman V.I., Malkova I.L., Zagrebina T.A.* 2002. [City climate]. – In: [Community air of Izhevsk]. Moscow – Izhevsk. P. 16–23. (In Russian)
15. *Adakhovskiy D.A.* 2021. [Climatic and phenological indicators of modern warming in the territory of the Udmurt Republic (a case study of Izhevsk)]. – *Vestn. Udm. un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o zemle.* 31(1): 57–64. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2021-31-1-57-64> (In Russian)
16. *Losev A.P.* 1994. [Workshop on agrometeorological support of crop production]. St. Petersburg. 244 p. (In Russian)
17. [Weather archive of Izhevsk]. 2021. [Weather station data (2019–2021)] Izhevsk, Russia, (WMO ID)=28411. http://tr5.ru/Архив_погоды_в_Ижевске (In Russian)
18. *Sedov E.N.* 1995. [Program and methodology for the study of fruit, berry and nut crops]. Orel. 502 p. (In Russian)
19. *Slavsky, V.A., Nikolaev E.A., Kalaev V.N.* 2013. [Introduction, selection and cultivation of nuts of the genus *Juglans* in the Central Chernozem region]. Voronezh. 262 p. (In Russian)
20. *Shumikhina A.V., Maratkanova V.S.* 2019. Agroclimatic resources of temperature and humidity and their dynamics in the territory of the Udmurt Republic. – *Vestn. Udm. university Ser. Biology. Nauki o zemle.* 29(4): 560–565. <https://journals.udsu.ru/biology/article/view/4830> (In Russian)
21. *Slavsky V.A.* 2006. [Introduction and selection of walnut in the Voronezh region. Abstr. ... Dis. Cand. (Agriculture) Sci.]. Voronezh. 23 p. (In Russian)
22. *Balapanov I.M.* 2014. Biological traits in walnut breeding. – *Nauchnyy zhurnal KubGAU.* 101: 828–842. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22567409> (In Russian)
23. *Weather and climate.* Climate monitoring. Izhevsk. <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=28411>

**КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ**

**ОСОБЕННОСТИ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА
НЕКОТОРЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ ГОРНОГО АЛТАЯ
(РОССИЯ) В УСЛОВИЯХ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ**© 2022 г. И. Г. Боярских^{1, 2, *}, Т. И. Сиромля²¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия²Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*e-mail: irina_2302@mail.ru

Поступила в редакцию 27.05.2022 г.

После доработки 24.08.2022 г.

Принята к публикации 06.10.2022 г.

Рассмотрены особенности накопления макро- и микроэлементов в растениях лекарственных видов – *Galium boreale*, *Trifolium lupinaster*, *Vicia cracca*, *Vupleurum multinerve* в ценопопуляциях Горного Алтая на участке с блоками-включениями серпентинитов. Общее содержание макро- и микроэлементов в органах растений и почвах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии, содержание подвижных форм элементов (экстрагент ацетатно-аммонийный буферный раствор с рН 4.8) в почвах анализировали атомно-абсорбционным методом. Установлена видовая специфичность аккумуляции отдельных химических элементов в растениях. Горошек мышиный и володушка многожильчатая накапливают Ni более интенсивно, чем клевер люпиновый и подмаренник северный. Для подмаренника северного характерен высокий уровень накопления бария. У всех изученных видов содержание меди и цинка в органах растений значительно выше концентрации подвижной формы этих элементов в почве. Выявлены видоспецифичные значимые корреляционные зависимости между содержанием подвижной формы Ni, Cd, Pb и Sr в почве и в органах растений. Между общим содержанием K, Ti, B, Be, Cu, Cd и Pb в органах растений и их содержанием в почвах отмечены разнонаправленные видоспецифичные корреляционные зависимости. У всех изученных видов растений, произрастающих на площадках в зоне выхода ультраосновных пород, установлено увеличение концентрации Ni, Mg и P (Ni выше предельно допустимого уровня накопления) и снижение содержания Ca и K.

Ключевые слова: *Galium boreale*, *Trifolium lupinaster*, *Vicia cracca*, *Vupleurum multinerve*, минеральный состав, видовая специфичность накопления, ультраосновные породы, Горный Алтай

DOI: 10.31857/S0033994622040045

Лечебные свойства различных видов растений обусловлены наличием биологически активных соединений [1–3], обладающих терапевтическими свойствами [4], а также содержанием биологически значимых макро- и микроэлементов, необходимых живым организмам для обеспечения нормальной жизнедеятельности. Макро- и микроэлементный состав растений с середины прошлого века стал предметом многочисленных научных исследований. Установлено, что существует взаимосвязь между накоплением в растениях определенных классов полифенолов и содержанием в них микроэлементов [5, 6], показаны зависимости между суммой полифенолов и отдельными микроэлементами в некоторых лекарственных видах растений [7, 8].

В условиях горного рельефа популяции растений находятся под влиянием совместного дей-

ствия различных факторов, связанных с изменением высоты (высотным градиентом) и минерального состава горных пород, определяющих элементный состав почв. В комплексе эти факторы могут оказывать влияние как на концентрацию макро- и микроэлементов, так и на уровень накопления полифенолов в органах растений. Алтае-Саянская горная область является одним из перспективных регионов для использования природных ресурсов лекарственных растений благодаря богатству и разнообразию флоры и растительности на этой территории [9]. Заготовка лекарственного сырья часто ведется без учета изменений биохимического состава растений, что может приводить к ухудшению его качества. Ранее было выявлено превышение допустимого уровня накопления Ni в листьях растений в популяции *Lonicera caerulea* L. на ультраосновных породах [10].

Почвы, сформированные на ультраосновных коренных породах, характеризуются необычными химическими свойствами, они создают специализированные местообитания с экстремальными эдафическими условиями, которые включают дефицит элементов питания (Ca, K, P, N), неблагоприятные соотношения Ca/Mg и высокое содержание потенциально токсичных металлов (Cr, Ni, и Co) [11, 12]. Концентрации этих металлов могут на порядок превышать пределы нормального содержания и создавать экологические угрозы для экосистем и здоровья человека [11, 13]. У растений экосистем на ультраосновных породах сформированы механизмы устойчивости, позволяющие им аккумулировать токсичные элементы в физиологически безопасных для них формах, при этом их концентрации могут значительно превышать допустимые пределы содержания [14, 15]. Изучение районов природных геохимических аномалий представляет особый интерес, поскольку они могут быть скрытыми источниками экологического риска в связи с возможным повышением концентрации тяжелых металлов в лекарственных растениях. Использование растений, произрастающих на ультраосновных породах, в пищевых или лекарственных целях может представлять непосредственную опасность для здоровья человека [16].

Целью данной работы было сравнительное изучение особенностей накопления макро-и микроэлементов в надземной части растений лекарственных видов – *Galium boreale* L., *Trifolium lupinaster* L., *Vicia cracca* L. и *Bupleurum multinerve* DC. в ценопопуляциях Горного Алтая в зоне обнажений ультраосновных пород и в фоновом районе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в 2019 году в Республике Алтай, Усть-Коксинском р-не, в окрестности пос. Кайтанак (50°09' с.ш., 85°27' в.д., 1150–1290 м н. у. м). Основным источником для выбора мест отбора проб послужила геологическая карта [17]. Был выделен участок с блоками-включениями серпентинитов (ультраосновные породы). Здесь в серпентинитовом матриксе заключены беспорядочно распределенные, преимущественно округлые (до шарообразных), разноразмерные “включения” массивных габбро, пироксенитов, темно-серых пелитовых осадков. Нередко в серпентинитовых телах отмечаются маломощные (до 1 см) прожилки хризотил-асбеста [17]. Пробные площадки (ПП) Т1, Т2 и Т3 были выбраны на профиле протяженностью 0.35 км, в пригребневой зоне северного склона небольшого хребта (отрог хребта Актайга). Содержание кремнезема (SiO₂) на ПП Т1, Т2 и Т3 составляло 52, 50 и 33% соответственно. Выбор небольшого участка с чередующимися контрастными по минеральному

составу породами обеспечивал контрастность по макро- и микроэлементному составу почв в сходных микроклиматических условиях произрастания растений. В качестве фонового участка для сравнения был выбран участок в долине р. Мульта (пробная площадка Т4), где доминируют средние по кислотности горные породы кремнисто-глинистые сланцы (содержание SiO₂ – 55%). Участки исследования находятся на территории, приграничной с Государственным природным биосферным заповедником “Катунский”.

В березово-лиственничном разнотравно-злаковом лесу на пробных площадках были выделены ценопопуляции со сквозными видами лекарственных растений: горошек мышиный – *Vicia cracca* L., клевер люпиновый – *Trifolium lupinaster* L. (Fabaceae), володушка многожилчатая – *Bupleurum multinerve* DC. (Apiaceae), подмаренник северный – *Galium boreale* L. (Rubiaceae).

V. cracca применяется в народной медицине в качестве противовоспалительного, ранозаживляющего, рассасывающего, кровоостанавливающего, вяжущего, мочегонного средства. В надземной части растений содержатся цианогликозиды, алкалоиды, протеины (до 28%), жиры (до 3%), горечи, флавоноиды (кверцетин, кемпферол), лейкоантоцианы, которые проявляют диуретический, седативный, муколитический и мукокинетический эффекты. В корнях – органические кислоты, алкалоиды, витамин С, каротин (до 14 мг/100 г), проявляющие антидиарейный, кардиотонический эффекты [18, 19].

T. lupinaster широко применяется в народной медицине Сибири и Дальнего Востока, а также в тибетской медицине в качестве мочегонного, болеутоляющего и противожелтушного средства [18, 19]. В траве найдены гликозиды (тридамин и др.), дубильные вещества (до 5%), эфирное масло, флавоноиды (кверцетин), витамины С, Е, каротин, пигменты, тирозин, органические кислоты (кумариновая, салициловая), фитостерины, которые проявляют антидиарейный, противовоспалительный, анальгетический, бактерицидный эффект.

B. multinerve в народной медицине известна как желчегонное, ранозаживляющее, противовоспалительное, жаропонижающее, болеутоляющее и капилляроукрепляющее средство [18, 20]. В надземной части *B. multinerve* обнаружены кверцетин-3-О-глюкуронид, кемпферол-3-О-глюкозид (астралагин), 5-О-п-кумароилхинная кислота, 5-О-ферулоилхинная кислота, 3-О-ферулоилхинная кислота, 3,5-ди-О-кофеилхинная кислота, 4,5-ди-О-кофеилхинная кислота, изорамнетин-3-О-рутинозид (нарциссин), кверцетин-3-О-рутинозид (рутин), кверцетин-3-О-глюкозид (изокверцитрин), агликоны флавоноидов кверцетина, изорамнетин, дубильные вещества, витамин

С, каротин [18, 19, 21–23], проявляющие тонизирующий, холеретический, гепатопротекторный, перспирантный, антипиретический эффекты [19, 24]. *B. multinerve* использовали как сырье для получения препарата “Буплерин” [20].

G. boreale используют как лекарственное растение в России, Пакистане, в тибетской медицине. Надземная часть этого вида широко используется для очистки крови, как мочегонное, противовоспалительное, обезболивающее и успокоительное средство [25–27]. В траве и корнях растений найдены гликозиды сердечного действия, флавоноиды, дубильные вещества, пигменты, ферменты, органические кислоты, сахара, витамин С, проявляющие холеретический, седативный, анальгетический эффекты [19].

Для анализа содержания макро- и микроэлементов в системе почва–растение производили сопряженный отбор почвенных и растительных образцов методом квадрата и формировали средние пробы. Объекты исследования – надземная часть растений, а также почва в зоне корневого питания растений (0–30 см). Содержание химических элементов (ХЭ) (Al, B, Ba, Be, Ca, Co, Cr, Cu, Ga, Fe, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, P, Si, Sr, Ti, V, Y, Yb, Zn, Zr) в почве и растениях определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии. Установка для проведения исследований включает источник возбуждения спектров – дуговой аргоновый двухструйный плазматрон (ДДП, Россия), устройство для распыления и подачи в плазменную струю исследуемого тонкодисперсного порошка, спектрометр (PGS-2, Германия), многоканальный анализатор эмиссионных спектров (МАЭС, Россия). Для определения содержания элементов в надземной части растений их озоляли в муфельной печи при температуре 450 °С, золу разлагали концентрированными HNO₃ и HCl с 30%-ным раствором H₂O₂, а затем растворяли в дистиллированной воде. Содержание подвижных форм K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Li, Sr (экстрагент ацетатно-аммонийный буферный раствор с рН 4.8) в почвах анализировали атомно-абсорбционным методом (FAAS) с использованием спектрометра AAnalyst 400 (PerkinElmer). Данные приведены в пересчете на воздушно-сухое вещество. В качестве стандартов были использованы образцы дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы САДПП-09/3 (ОСО № 18809), черноземной выщелоченной среднесуглинистой почвы САЧВП-05/2 (ОСО № 28813), дерново-подзолистой супесчаной почвы СДПС-1 (ГСО 2498-83), чернозема типичного СЧТ-3 (ГСО 2509-83), травяной муки злаковой (гранулированной) (ТМЗг-01) ОСО № 10-176-2011 и листа березы (ЛБ-1) ГСО 8923-2007. Полученные результаты определения химических элементов в

стандартных образцах укладывались в их аттестованные значения.

Интенсивность биологического поглощения элементов органами растений оценивали по значениям коэффициентов биологического накопления (КБН), рассчитываемых как отношение содержания элемента в сухом веществе растений к концентрации подвижной формы элемента в почве, извлекаемой из почвы ацетатно-аммонийным буфером. Это отношение также называют коэффициентом биогеохимической подвижности V_х. Он характеризует доступность элементов растениям и степень использования ими подвижных форм элементов, содержащихся в почве [28].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием пакета программ STATISTICA 6.1. Распределение исследуемых химических элементов внутри отдельных микропопуляций соответствовало нормальному закону, дисперсии были однородны, что позволило рассчитать средние арифметические значения содержания элементов (\bar{X}) и стандартные отклонения ($S\bar{X}$). Корреляционный анализ выполнен по методу Пирсона, критические уровни значимости приведены в тексте статьи [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ общего содержания макро- и микроэлементов в почвах на участке в окрестности пос. Кайтанак подтвердил неоднородность минералогического состава пород, слагающих этот участок (рис. 1). В геологических пробах, отобранных на площадке Т3, отмечены серпентиниты (ультраосновные породы).

Диапазоны валового содержания большинства исследованных химических элементов (за исключением Cr и Ni) на пробных площадках Т1, Т2 и Т4 в значительной степени перекрываются, статистически значимой разницы между ними не выявлено. Элементный состав почвы на ПП Т3 имеет существенные отличия: содержание 18 элементов (Cd, Be, Yb, Ga, Pb, Cu, Sc, La, Zn, Sr, V, Zr, Ba, Ti, Ca, Na, Al, Si) является в 1.6–3.3 раза более низким по сравнению с другими площадками, а концентрации K, Mg, Co и Mo – в 2.5–3.5 раза более высокими.

В почвах на ПП Т3 установлен высокий уровень содержания Mg и низкий Ca (рис. 1), соотношение этих элементов (0.2) меньше 1, что создает очень неблагоприятные условия для растений [30]. Из микроэлементов в почвах площадки Т3 отмечаются очень высокие концентрации геогенных потенциально токсичных Cr и Ni, что является особенностью минерального состава ультраосновных пород. Количество хрома на контрольной площадке (Т4) составляет в среднем

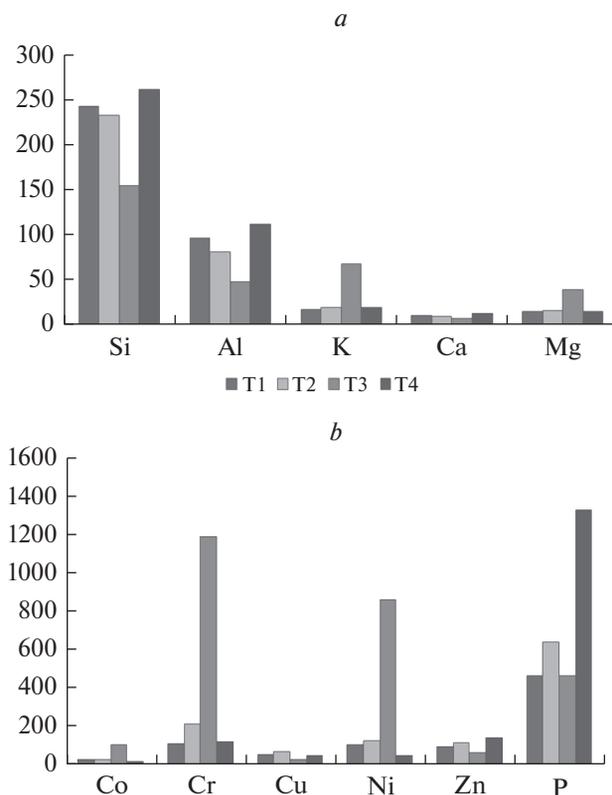


Рис. 1. Общее содержание макро- (а) и микроэлементов (б) в почвах в окрестностях пос. Кайтанак (Т1–Т3) и в долине р. Мульта (Т4). По горизонтали: анализируемые элементы; по вертикали: содержание элементов в г/кг (а) и в мг/кг (б) воздушно-сухого вещества.

Fig. 1. Total content of macro- (a) and trace elements (b) in soils in the vicinity of the Kaytanak village (Т1–Т3) and in the Multa River valley (Т4). X-axis – the content of elements, (a) g/kg and (b) mg/kg of air-dry matter; y-axis – the analyzed elements.

122 мг/кг, что близко к его содержанию на ПП Т1 (115 мг/кг). На площадке Т2 концентрация хрома увеличивается до 216 мг/кг и достигает 1200 мг/кг на ПП Т3. Количество никеля на площадке Т4 составляет 53, Т1 – 108, Т2 – 129 и Т3 – 865 мг/кг. Не характерным для этого типа пород был высокий уровень концентрации К, что связано, по всей видимости, с присутствием на этом участке согласно [17] габбро (основные породы, богатые калием). На всех площадках в окрестности пос. Кайтанак наблюдается низкое общее содержание в почвах Р, что также является характерным для почв, сформированных на серпентинитовых коренных породах [11, 12].

Вариабельность содержания подвижной формы элементов в почвах значительно выше, что вполне соответствует литературным данным [31]. Концентрация подвижных форм Сг и Ni в разных точках изменяется аналогично их валовому содержанию, достигая максимума на площадке Т3, на ней же встречаются самые высокие концентрации подвижных форм К и Mg. Однако для других исследованных элементов каких-либо четких взаимосвязей не выявилось, их концентрация на разных площадках может отличаться как на не-

сколько процентов, так и более чем в 10 раз. Количество подвижной формы макроэлементов Mg и К, а также микроэлементов Cr, Fe, Mn и особенно Ni изменялось в широких пределах (табл. 1). В основном эти различия связаны с контрастным минералогическим составом подстилающих пород и общим содержанием этих элементов в почвах. Установлены статистически значимые корреляционные зависимости между общим содержанием и содержанием подвижной формы элементов в почве для Ni, Mg и Pb ($p < 0.001$), Cr ($p < 0.01$), Cu, Mn и К ($p < 0.05$). Увеличение содержания подвижной формы Fe на площадке Т2 связано с высокой кислотностью почв, которая приводит к повышению подвижности Fe. Оценка кислотности почв исследуемых площадок показала значительные различия между ними, обусловленные влиянием литогенного фактора, pH солевой варьировал от 3.3 до 6.9 (табл. 1). Почвы площадки Т1 были более сходны по pH и элементному составу с почвами фонового участка (Т4).

Сравнительный анализ содержания макроэлементов в надземной части изученных видов растений показал его значительное варьирование (табл. 2). Более высокие концентрации Са, К, Mg,

Таблица 1. Реакция среды и содержание подвижной формы макро- и микроэлементов в почвах (мг/кг воздушно-сухой почвы)**Table 1.** pH and content of the mobile macro- and trace elements in soils (mg/kg of air-dry matter)

Элементы Elements	Ценопопуляции Cenopopulations			
	T1	T2	T3	T4
pH _{KCl}	5.7	3.3	6.9	5.1
Ca	5200	3600	4400	4700
Co	0.10	0.37	0.16	0.10
Cr	1.00	2.45	4.46	1.00
Cu	0.20	0.30	0.17	0.17
Fe	28	134	10	47
K	310	180	600	260
Mg	540	720	1800	470
Mn	86	116	50	47
Ni	0.5	3.9	20.0	0.8
Na	26	30	26	29
Pb	0.9	1.1	1.0	1.3
Sr	50	28	25	49
Zn	0.8	0.8	0.7	0.9

Таблица 2. Содержание золы (%) и макроэлементов в растениях ($\bar{X} \pm S\bar{x}$), г/кг воздушно-сухого вещества**Table 2.** The content of ash (%) and trace elements in plants ($\bar{X} \pm S\bar{x}$), g/kg of air-dry matter

Элементы Elements	<i>Vicia cracca</i>				<i>Trifolium lupinaster</i>				<i>Bupleurum multinerve</i>				<i>Galium boreale</i>			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Зола Ash	6.8 ± 0.1	5.5 ± 0.0	7.4 ± 0.0	7.9 ± 0.5	6.7 ± 0.2	6.9 ± 0.1	6.8 ± 0.1	7.0 ± 0.4	6.2 ± 0.1	5.2 ± 0.0	5.2 ± 0.1	6.2 ± 0.3	8.1 ± 0.2	7.5 ± 0.4	7.9 ± 0.1	9.0 ± 0.3
Ca	11 ± 1	14 ± 1	10 ± 1	11 ± 0	17 ± 2	17 ± 2	13 ± 0	16 ± 1	8 ± 1	9 ± 0	7 ± 0	9 ± 0	18 ± 0	9 ± 2	11 ± 1	18 ± 0
K	18 ± 0	9 ± 0	13 ± 1	25 ± 1	17 ± 2	15 ± 2	7 ± 0	14 ± 0	14 ± 0	8 ± 1	9 ± 0	20 ± 1	25 ± 0	18 ± 1	21 ± 1	27 ± 3
Mg	2.4 ± 0.2	4.5 ± 0.1	4.8 ± 0.2	1.7 ± 0.2	3.2 ± 0.1	4.7 ± 0.2	4.1 ± 0.2	3.8 ± 0.0	1.8 ± 0.3	2.8 ± 0.2	3.8 ± 0.2	2.4 ± 0.0	4.7 ± 0.1	3.0 ± 0.0	5.2 ± 0.1	4.0 ± 0.0
Si	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0	0.3 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	2.0 ± 0.1	1.8 ± 0.1	3.1 ± 0.2	2.7 ± 0.3
P	1.5 ± 0.1	1.4 ± 0.1	2.5 ± 0.3	1.9 ± 0.0	2.0 ± 0.5	1.9 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.8 ± 0.3	1.3 ± 0.1	2.0 ± 0.1	2.5 ± 0.0	1.7 ± 0.0	3.1 ± 0.0	1.5 ± 0.1	3.4 ± 0.2	2.1 ± 0.2

Примечание: \bar{X} – среднее арифметическое; $S\bar{x}$ – стандартное отклонение.

Note: \bar{X} – arithmetic average value; $S\bar{x}$ – standard deviation.

Si и P обнаружены у *G. boreale*, в связи с чем у этого вида отмечается и самая высокая зольность по сравнению с другим видами. Минимальное содержание макроэлементов на большинстве площадок установлено для *B. multinerve*. Концентрации отдельных микроэлементов в растениях разных видов также изменялись в широких пределах (табл. 3), например Ba от 23 (*V. cracca*) до 216 мг/кг

(*G. boreale*), марганца от 53 (*V. cracca*) до 129 мг/кг (*G. boreale*).

Значительное варьирование содержания макро- и микроэлементов в растениях обусловлено в первую очередь почвенно-геохимическими особенностями места произрастания. Для всех изученных видов растений характерно значимое увеличение концентрации Mg в зоне выхода ультра-

Таблица 3. Содержание микроэлементов в растениях ($\bar{X} \pm S\bar{X}$), мг/кг воздушно-сухого вещества
 Table 3. The content of trace elements in plants ($\bar{X} \pm S\bar{X}$), mg/kg of air-dry matter

Элементы	<i>Vicia cracca</i>				<i>Trifolium lupinaster</i>				<i>Bupleurum multinerne</i>				<i>Galium boreale</i>			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Al	48 ± 1	55 ± 0	68 ± 2	41 ± 1	59 ± 0	70 ± 3	49 ± 2	50 ± 4	40 ± 4	46 ± 0	44 ± 2	51 ± 3	73 ± 3	61 ± 1	59 ± 8	101 ± 13
B	19 ± 2	15 ± 1	24 ± 0	14 ± 0	25 ± 4	28 ± 0	20 ± 1	24 ± 2	14 ± 0	17 ± 0	24 ± 2	19 ± 0	31 ± 0	19 ± 2	26 ± 3	34 ± 3
Ba	23 ± 2	53 ± 1	35 ± 4	31 ± 3	55 ± 2	66 ± 6	55 ± 0	39 ± 2	31 ± 0	57 ± 2	53 ± 2	41 ± 0	199 ± 7	122 ± 12	197 ± 28	216 ± 9
Be	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.07 ± 0.00
Cd	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.11 ± 0.03	0.04 ± 0.00	0.06 ± 0.00	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.60 ± 0.14	0.08 ± 0.01	0.05 ± 0.00	0.06 ± 0.00	0.66 ± 0.01
Co	0.14 ± 0.03	0.19 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.05 ± 0.00	0.11 ± 0.01	0.35 ± 0.01	0.31 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.28 ± 0.05	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.10	0.26 ± 0.08	0.19 ± 0.02	0.14 ± 0.02
Cr	0.44 ± 0.09	0.40 ± 0.11	0.45 ± 0.02	0.32 ± 0.02	0.51 ± 0.02	0.42 ± 0.06	0.39 ± 0.09	0.31 ± 0.03	0.24 ± 0.02	0.50 ± 0.11	0.30 ± 0.02	0.60 ± 0.16	0.40 ± 0.02	0.41 ± 0.04	0.46 ± 0.04	0.51 ± 0.04
Cu	6.0 ± 0.0	5.0 ± 0.3	2.9 ± 0.1	4.6 ± 0.2	4.2 ± 0.1	4.4 ± 0.2	2.8 ± 0.2	4.3 ± 0.2	3.5 ± 0.0	2.8 ± 0.1	3.6 ± 0.1	5.0 ± 0.1	6.1 ± 0.0	3.2 ± 0.0	4.7 ± 0.2	5.1 ± 0.2
Fe	67 ± 2	59 ± 0	65 ± 1	48 ± 3	55 ± 1	64 ± 0	55 ± 0	53 ± 1	42 ± 2	35 ± 1	34 ± 2	39 ± 2	63 ± 0.3	68 ± 5	64 ± 3	79 ± 5
Ga	0.14 ± 0.00	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.03	0.07 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.17 ± 0.03	0.12 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.09 ± 0.00	0.19 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.14 ± 0.01	0.19 ± 0.01
La	0.22 ± 0.04	0.50 ± 0.01	0.67 ± 0.07	0.15 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.64 ± 0.09	0.32 ± 0.04	0.66 ± 0.03	0.30 ± 0.01	0.41 ± 0.08	0.52 ± 0.01	0.34 ± 0.03	0.44 ± 0.02	0.70 ± 0.13	0.62 ± 0.01	0.71 ± 0.04
Mn	69 ± 8	75 ± 5	72 ± 2	53 ± 1	75 ± 5	97 ± 4	48 ± 2	71 ± 2	55 ± 0	86 ± 1	65 ± 5	60 ± 5	84 ± 2	77 ± 3	63 ± 2	129 ± 4
Mo	2.22 ± 0.30	0.43 ± 0.11	0.31 ± 0.10	0.51 ± 0.00	2.20 ± 0.62	0.87 ± 0.06	0.64 ± 0.02	0.75 ± 0.06	0.72 ± 0.10	0.73 ± 0.03	0.54 ± 0.01	1.84 ± 0.02	0.88 ± 0.01	0.22 ± 0.00	0.35 ± 0.08	0.17 ± 0.02
Na	42 ± 3	35 ± 0	64 ± 1	22 ± 0	44 ± 4	74 ± 0	58 ± 3	42 ± 0	56 ± 4	31 ± 1	32 ± 0	23 ± 0	17 ± 13	114 ± 23	52 ± 0	73 ± 5
Ni	4.1 ± 0.1	15.2 ± 0.2	16.3 ± 1.0	1.7 ± 0.4	1.5 ± 0.0	6.5 ± 0.5	10.6 ± 0.6	3.2 ± 0.3	1.2 ± 0.1	10.3 ± 0.2	19.7 ± 2.4	3.7 ± 0.2	1.6 ± 0.1	6.3 ± 0.3	8.5 ± 0.6	3.4 ± 0.2
Pb	0.11 ± 0.02	0.12 ± 0.00	0.16 ± 0.00	0.24 ± 0.00	0.15 ± 0.01	0.21 ± 0.02	0.07 ± 0.00	0.47 ± 0.01	0.11 ± 0.00	0.08 ± 0.01	0.08 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.11 ± 0.00	0.13 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.25 ± 0.02
Sc	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.04 ± 0.00	0.09 ± 0.00	0.13 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.10 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.06 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.00	0.08 ± 0.01	0.07 ± 0.02	0.12 ± 0.01
Sr	60 ± 0	54 ± 0	58 ± 1	62 ± 3	97 ± 0	71 ± 9	66 ± 6	63 ± 3	33 ± 2	46 ± 1	27 ± 0	29 ± 0	109 ± 1	45 ± 2	70 ± 1	90 ± 1
Ti	4.7 ± 0.6	5.6 ± 0.4	8.1 ± 0.4	2.3 ± 0.2	5.8 ± 0.2	6.7 ± 0.1	5.0 ± 0.2	5.4 ± 0.4	4.0 ± 0.1	3.7 ± 0.1	4.5 ± 0.2	3.8 ± 0.1	6.8 ± 0.4	7.7 ± 0.1	7.8 ± 0.5	10.4 ± 0.4
V	0.34 ± 0.00	0.26 ± 0.00	0.41 ± 0.01	0.39 ± 0.03	0.36 ± 0.00	0.35 ± 0.01	0.36 ± 0.01	0.38 ± 0.01	0.30 ± 0.00	0.26 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.32 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.44 ± 0.03	0.45 ± 0.00	0.58 ± 0.01
Zn	18 ± 4	38 ± 0	44 ± 1	20 ± 1	19 ± 3	37 ± 1	19 ± 1	31 ± 3	15 ± 1	26 ± 1	30 ± 0	28 ± 2	51 ± 1	39 ± 5	51 ± 4	32 ± 1
Zr	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.5 ± 0.0	1.1 ± 0.0	1.3 ± 0.2	0.6 ± 0.1	1.1 ± 0.1	0.6 ± 0.0	0.8 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.5 ± 0.0

Примечание: \bar{X} – среднее арифметическое; $S\bar{X}$ – стандартное отклонение.

Note: \bar{X} – arithmetic average value; $S\bar{X}$ – standard deviation.

основных пород (Т3), эта особенность отмечалась и ранее при сравнительном исследовании макро- и микроэлементного состава некоторых полезных видов растений Полярного Урала [15]. Для представителей семейства Fabaceae отмечается увеличение концентрации Mg и на площадке Т2 (основные породы). Для *V. cracca*, *B. multinerve* и *G. boreale* на площадке Т3 отмечаются более высокие концентрации P. Содержание K на ультраосновных породах у всех анализируемых видов растений значительно меньше, чем на площадке Т4. Низкие концентрации K характерны для *V. cracca*, *B. multinerve* и *G. boreale* также на площадке Т2 (основные породы).

Изменение уровня накопления большинства проанализированных микроэлементов на почвах различного геохимического состава (табл. 3) имело видоспецифичный характер. Для представителей семейства Fabaceae характерно значимое увеличение концентрации Fe в растениях на ультраосновных (Т3) и основных породах (Т2), а для *B. multinerve* и *G. boreale* – снижение его содержания. Уровень накопления Mn в растениях *G. boreale* произрастающих на ультраосновных и основных породах был почти в 2 раза ниже, чем в популяции этого вида на фоновом участке. В растениях *T. lupinaster* концентрация Mn снижалась на ультраосновных и повышалась на основных породах, в растениях *V. cracca* содержание Mn значительно увеличивалось на всех площадках по сравнению с фоновой территорией. Исследования, проведенные в контрастных геохимических условиях Полярного Урала, показали значимое снижение концентрации марганца в растениях 156 видов из 25 семейств, произрастающих на ультраосновных породах по сравнению с таковыми на других типах пород [15], при этом отмечался и высокий уровень варьирования между образцами на разных типах пород. Это может быть связано с антагонистическим действием высокого уровня Mg и Ni на поглощение Mn [13, 15]. Известно, что величина соотношения Fe/Mn 1.2–2.5 обеспечивает эффективное протекание фотосинтеза в листьях растений [13]. Наиболее низкие значения Fe/Mn – 0.4–0.6 характерны для *B. multinerve* в зоне выхода основных (Т2) и ультраосновных пород (Т3). У растений *V. cracca* величина соотношения Fe/Mn также уменьшалась на этих площадках до 0.8 (Т2) и 0.9 (Т3), что указывает на нарушение поступления Fe в листья растений. Для растений *G. boreale* и *T. lupinaster* характерно варьирование значения Fe/Mn в зависимости от места произрастания (0.6–1.1), но наибольшие значения – соответственно 1.0 и 1.1 – отмечены в зоне выхода ультраосновных пород.

Уровень накопления Cu у всех видов растений снижался на площадке Т3, а у *B. multinerve* и *G. boreale* и на площадке Т2. Содержание Zn (за исключением *T. lupinaster*) наоборот на площадках

Т2 и Т3 увеличивалось. Согласно ранее проведенным исследованиям, соотношение Cu/Zn в листьях растений *Lonicera caerulea* (сем. Caprifoliaceae) в различных популяциях Горного Алтая изменялось в пределах 0.2–0.3 [10]. Оба элемента связаны с процессами ферментосинтеза [32] и более жестко контролируются биологическими и физико-химическими механизмами поглощения и концентрации элементов. У растений изученных видов наблюдалось незначительное варьирование величины Cu/Zn – от 0.1 до 0.3. Снижение этого соотношения до 0.1 наблюдалось у всех видов в зоне выхода основных (Т2) и ультраосновных пород (Т3) за счет менее интенсивного накопления Cu и более высокого – Zn.

Содержание Ni в растениях на ультраосновных породах изменялось от 8.5 до 19.7 мг/кг, что значительно превышало его концентрацию в растениях фоновом участке (1.7–3.7 мг/кг). Наиболее высокие концентрации Ni установлены в растениях *V. cracca* (16.3 мг/кг) и *B. multinerve* (19.7 мг/кг). Уровень накопления в растениях Ni в зоне выхода основных пород (Т2) также был повышенным, по сравнению с фоном (6.3–15.2 мг/кг).

Содержание Co увеличивалось в растениях, произрастающих на ПП Т2 и Т3, и изменялось в зависимости от вида от 0.19 до 0.37 мг/кг. Незначительное повышение концентрации Sr отмечалось на этих площадках только у представителей семейства Fabaceae.

Наблюдалась отрицательная корреляционная зависимость между общим содержанием калия в почве и в растениях *V. cracca* ($p < 0.01$), между содержанием Ti в почве и в растениях *T. lupinaster* ($p < 0.01$). Положительная корреляция установлена между содержанием в почве и в растениях *V. cracca* меди, свинца и бериллия ($p < 0.01$); в растениях *T. lupinaster* – кадмия ($p < 0.01$); в растениях *B. multinerve* – бора ($p < 0.05$), кадмия ($p < 0.01$) и свинца ($p < 0.001$); в растениях *G. boreale* – кадмия ($p < 0.05$). Содержание подвижной формы Ni, Cd, Pb и Sr в почвах также оказывало влияние на уровень накопления этих элементов в растениях.

Хорошо иллюстрирует различную у изученных видов растений интенсивность накопления определенных макро- и микроэлементов коэффициент биологического накопления (рис. 2). При значениях коэффициента выше единицы растения рассматриваются как концентраторы химических элементов [5, 6]. У всех изученных видов самые высокие значения коэффициента биологического накопления характерны для микроэлементов Cu и Zn. Коэффициент биологического накопления Na более 1 характерен для *T. lupinaster*, а Ni – для *B. multinerve*.

Концентрация Ni в растениях всех изученных видов превышает максимально допустимый уровень содержания Ni в укусах растений и расти-

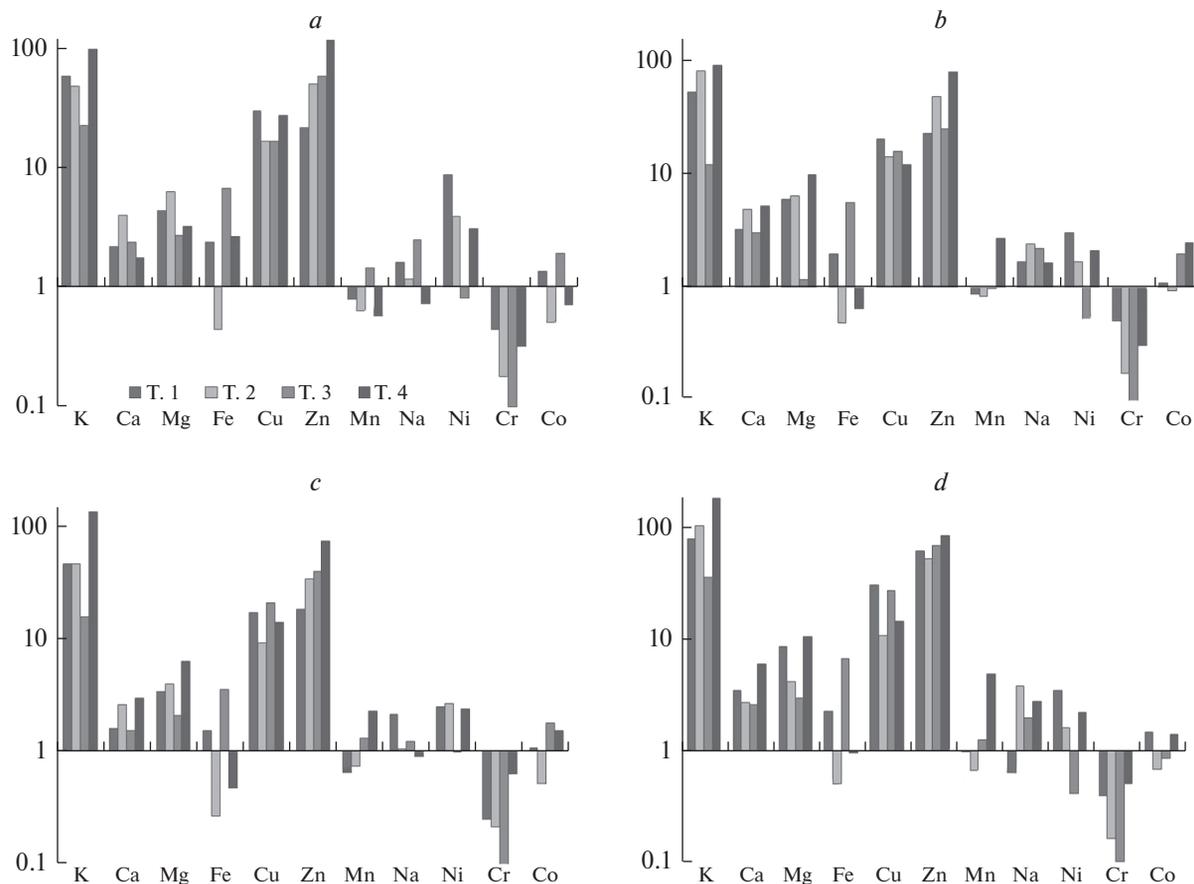


Рис. 2. Коэффициент биологического накопления макро- и микроэлементов растениями *Vicia cracca* (a), *Trifolium lupinaster* (b), *Vupleurum multinerve* (c) и *Galium boreale* (d).

По горизонтали: анализируемые элементы в точках отбора проб; по вертикали: отношение содержания элементов в сухой фитомассе к концентрации их подвижной формы в почве (в логарифмической шкале).

Fig. 2. The coefficient of biological accumulation of macro- and trace elements by *Vicia cracca* (a), *Trifolium lupinaster* (b), *Bupleurum multinerve* (c) и *Galium boreale* (d).

X-axis: elements in sampling points, y-axis: the ratio of the content of an element in the dry biomass to concentration its mobile fractions in the soil (in logarithmic scale).

тельных кормах (5 мг/кг воздушно-сухой массы) в 1.3–4 раза [14]. Полученные результаты необходимо принимать во внимание при сборе и использовании растительного сырья для приготовления галёновых препаратов, поскольку в настои и отвары может переходить более 50% химических элементов, содержащихся в растениях [16, 33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение макро- и микроэлементного состава растений *Galium boreale*, *Trifolium lupinaster*, *Vicia cracca* и *Bupleurum multinerve* в ценопопуляциях Горного Алтая на участке с блоками-включениями серпентинитов выявило его значительную вариабельность в зависимости от почвенно-геохимических условий.

Установлены видовые особенности аккумуляции отдельных элементов. Растения видов *V. cracca* и *B. multinerve* более интенсивно, чем *G. boreale* и

T. lupinaster, накапливают Ni. Содержание Zn и Cu в надземных органах растений всех изученных видов значительно (в 10 и более раз) выше, чем концентрация подвижной формы этих микроэлементов в почве. Содержание в надземной части *T. lupinaster* Na и в надземной части *B. multinerve* Ni превышает содержание этих элементов в почве (КБН >1). Показаны видоспецифичные, значимые корреляционные связи между содержанием подвижной формы Ni, Cd, Pb и Sr в почве и в растениях, и между общим содержанием K, Ti, B, Be, Cu, Cd и Pb в почвах и растениях *G. boreale*, *T. lupinaster*, *V. cracca* и *B. multinerve*.

В двух исследованных ценопопуляциях в зонах выхода ультраосновных и основных пород выявлено превышение допустимого уровня накопления Ni в растениях всех проанализированных видов, что необходимо учитывать при заготовке фитосырья.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института почвоведения и агрохимии СО РАН и Центрального сибирского ботанического сада СО

РАН (проект № АААА-А21-121011290027-6. Авторы выражают благодарность администрации ФГБУ “Государственный природный биосферный заповедник “Катунский” за помощь в организации исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jabin F., Nasreen S.* 2016. Phytochemical analysis of some medicinal plants. — *Int. J. Adv. Res.* <https://www.allresearchjournal.com/archives/2016/vol2issue8/PartE/2-7-171-265.pdf>
2. *Raj M.S., Kameshwari M.N., Tharasaraswath K.J., Shubharani R.* 2017. Qualitative and quantitative analysis of phytochemicals in two different species of *Urginea*. — *Int. J. Pharma. Life Sci.* 8(2): 5433–5438. <http://www.ijplsjournal.com/issues%20PDF%20files/Archive-2017/February-2017/1.pdf>
3. *Gupta M., Thakur S., Sharma A., Gupta S.* 2013. Qualitative and quantitative analysis of phytochemicals and pharmacological value of some dye yielding medicinal plants. — *Oriental. J. Chem.* 29(2): 475–481. <http://www.orientjchem.org/?p=22064>
4. *Ghorbanzadeh H.R., Toosi M.H., Sazgarnia A., Yousefi M., Bajestani M.J., Salari R.* 2019. A novel vaporizer to release volatile substances from aromatic plants — *J. Adv. Pharm. Educ. Res.* 9(S2): 87–94. <https://japer.in/article/a-novel-vaporizer-to-release-volatile-substances-from-aromatic-plants>
5. *Ловкова М.Я., Рабинович А.М., Пономарева С.М., Бузук Г.Н., Соколова С.М.* 2021. Почему растения лечат: около 200 видов лекарственных растений с кратким биохимическим описанием. Изд. 3, стереотип. М. 228 с.
6. *Ловкова М.Я., Соколова С.М., Бузук Г.Н., Быховский В.Я., Пономарева С.М.* 1999. Особенности элементного состава лекарственных растений, синтезирующих фенольные соединения. — *Прикл. биохимия и микробиология.* 35(5): 578–589.
7. *Szymański M., Witkowska-Banaszczak E., Klak N., Marciniak K., Wołowicz T., Szymański A.* 2014. Effects of trace Elements on polyphenolic compounds in *Millefolii* herba. — *Pol. J. Environ. Stud.* 23(2): 459–466.
8. *Боярских И.Г., Сысо А.И., Сиromля Т.И.* 2019. Изменчивость содержания химических элементов и биологически активных полифенолов в органах *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Caprifoliaceae) в высотном градиенте — *Сибирский экологический журн.* 6: 727–741. <https://doi.org/10.15372/SEJ20190608>
9. *Некратова Н.А., Некратов Н.Ф.* 2005. Лекарственные растения Алтае-Саянской горной области. Ресурсы, экология, ценокомплексы, популяционная биология, рациональное использование. Томск. 228 с.
10. *Боярских И.Г., Сысо А.И., Сиromля Т.И.* 2018. Особенности минерального состава *Lonicera caerulea* в контрастных геохимических условиях. — *Химия растительного сырья.* 3: 129–138. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033740>
11. *Kumarathilaka P., Dissanayake C., Vithanage M.* 2014. Geochemistry of serpentinite soils: A brief overview. — *J. Geol. Soc. Sri Lanka.* 16: 53–63.
12. *Marescotti P., Comodi P., Crispini L., Gigli L., Zucchini A., Fornasaro S.* 2019. Potentially toxic elements in ultramafic soils: A study from metamorphic ophiolites of the Voltri Massif (Western Alps, Italy). — *Minerals.* 9(8): 502. <https://doi.org/10.3390/min9080502>
13. *Kabata-Pendias A.* 2011. Trace Elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton. 505 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
14. *Критерии* оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. 1992. М.
15. *Алексеева-Попова Н.В., Дроздова И.В.* 2013. Микроэлементный состав растений Полярного Урала в контрастных геохимических условиях. — *Экология.* 2: 90–98. <https://doi.org/10.7868/S0367059713020030>
16. *Гравель И.В., Шойхет Я.Н., Яковлев Г.П., Самылина И.А.* 2012. Фармакогнозия. Экоотоксиканты в лекарственном растительном сырье и фитопрепаратах. М. 304 с.
17. *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000.* Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45-XIV (Усть-Кокса). Объяснительная записка. 2019. М. 272 с. http://geo.mfvsegei.ru/200k/Зап/Зап_М-45-XIV.pdf
18. *Пленник Р.Я., Гонтарь Э.М., Тюрина Е.В., Гуськова И.Н., Израильсон В.Ф., Пшеничкина Ю.А.* 1989. Полезные растения Хакасии. Ресурсы и интродукция. Новосибирск. 271 с.
19. *Николаев Н.А., Ливазан М.А., Скирденко Ю.П., Мартынов А.И.* 2019. Биологически активные растения и грибы Сибири в клинической медицине. Т. 1. М. 382 с. https://s.monographies.ru/doc/2019/03/file_5c90d9206e9e1.pdf
20. *Минаева В.Г.* 1991. Лекарственные растения Сибири. Новосибирск. 431 с.
21. *Altantsetseg S., Shatar S., Javzmaa N.* 2012. Comparative study of essential oil constituents of *Bupleurum* species from Mongolia. — *Mongolian J. Chemistry.* 13(39): 28–30. <https://doi.org/10.5564/mjc.v13i0.156>
22. *Olenikov D.N., Partilkhaev V.V.* 2013. Flavonoids and phenylpropanoids from several species of *Bupleurum* growing in Buryatia. — *Chem. Nat. Compd.* 48(6): 1078–1082. <https://doi.org/10.1007/s10600-013-0471-x>

23. Миревич В.М., Оленников Д.Н., Петухова С.А., Посохина А.А. 2020. Флавоноиды и фенилпропаноиды надземных органов володушки многожилковой (*Bupleurum multinerve* DC.) флоры Прибайкалья. — Химия растительного сырья. 4: 121–128.
<https://doi.org/10.14258/jcpr.m.2020047530>
24. Саратиков А.С., Минаева В.Г., Лившиц Н.С. и др. 1990. Новые фармакологические свойства препарата буплерина из надземной части *Bupleurum multinerve* DC. — Растительные ресурсы. 26(1): 88–90.
25. Крылов Г.В., Козакова Н.Ф., Лагерь А.А. 1989. Растения здоровья. Новосибирск. 304 с.
26. Wazir S.M., Dasti A.A., Shah J. 2004. Common medicinal plants of Chapursan valley, Gojal II, Gilgit Pakistan. — J. Res. (Science). 15(1): 41–43.
27. Abbas Z., Kousar S., Aziz M.A., Pieroni A., Aldosari A.A., Bussmann R.W., Raza G., Abbasi A.M. 2021. Comparative assessment of medicinal plant utilization among Balti and Shina communities in the periphery of Deosai National Park, Pakistan. — Biology. 10, 434.
<https://doi.org/10.3390/biology10050434>
28. Перельман А.И., Касимов Н.С. 1999. Геохимия ландшафта. М. 610 с.
29. Glantz S.A. 2012. Primer of Biostatistics. 7 th ed. New York. 320 p.
30. Erschbamer B. 1991. Das Ionenmilieu im durchwurzelten Oberboden und seine Auswirkungen auf die Verbreitung der beiden *Carex curvula* Unterarten, *Carex curvula* ssp. *curvula* und *Carex curvula* ssp. *rosae* in der Dolomiten, Italien. — Flora. 185(5): 345–355.
[https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)30494-2](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)30494-2)
31. Сысо А.И. 2007. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск. 277 с.
32. Битюцкий Н.П. 2020. Микроэлементы высших растений. СПб. 368 с.
33. Сиromля Т.И. 2014. Содержание химических элементов в водном экстракте *Plantago major* L. при антропогенной нагрузке. — Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 9: 65–66.

Macro- and Trace Elements Composition of Some Medicinal Plants in the Geochemically Abnormal Environment in the Altai Mountains (Russia)

I. G. Boyarskykh^{a, b, *}, T. I. Siromlya^b

^aCentral Siberian Botanical Garden, SB RAS, Novosibirsk, Russia

^bInstitute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS, Novosibirsk, Russia

*e-mail: irina_2302@mail.ru

Abstract—The specificity of macro- and trace elements accumulation in the leaves and stems of *Galium boreale*, *Trifolium lupinaster*, *Vicia cracca*, and *Bupleurum multinerve* coenopopulations growing at the sites with serpentinite inclusions in the Altai Mountains (Russia) was studied. The total content of macro- and trace elements in plants and soil was determined by the atomic emission spectrometry, and the mobile fraction, extracted by the ammonium acetate solution with pH 4.8, were measured by atomic absorption. The study revealed species-specific accumulation of some chemical elements in the studied medicinal plant species. As compared to *G. boreale* and *T. lupinaster*, *V. cracca* and *B. multinerve* showed a greater capability of Ni accumulation. *G. boreale* was characterized by high level of Ba accumulation. All studied species were Cu and Zn accumulators. Some species-specific statistically significant correlations between the mobile fraction of Ni, Cd, Pb and Sr in soil and phytomass were revealed. Different correlations between their soil and phytomass contents were found for such elements as K, Ti, B, Be, Cu, Cd and Pb. Multidirectional species-specific correlations were noted between the total content in plant organs and the content in soils of K, Ti, B, Be, Cu, Cd, and Pb. In all studied plant species growing in the zone of exposure of ultrabasic rocks, an increase in the concentration of Ni, Mg and P (Ni is above the maximum allowable level of accumulation) and a decrease in the content of Ca and K were found.

Keywords: *Galium boreale*, *Trifolium lupinaster*, *Vicia cracca*, *Bupleurum multinerve*, mineral composition of plants, species specificity of accumulation, ultrabasic rocks, Mountain Altai

ACKNOWLEDGEMENTS

The present study was carried out within the framework of the institutional research project (AAAA-A21-121011290027-6) of the Central Siberian Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences and the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The authors express their gratitude to the administration of the State Natural Biosphere Reserve “Katunsky” for the assistance in organizing research.

REFERENCES

1. *Jabin F., Nasreen S.* 2016. Phytochemical analysis of some medicinal plants. – *Int. J. Adv. Res.* 2: 293–295. <https://www.allresearchjournal.com/archives/2016/vol2issue8/PartE/2-7-171-265.pdf>
2. *Raj M.S., Kameshwari M.N., Tharasaraswath K.J., Shubharani R.* 2017. Qualitative and quantitative analysis of phytochemicals in two different species of *Urginea*. – *Int. J. Pharma. Life Sci.* 8(2): 5433–5438. <http://www.ijplsjournal.com/issues%20PDF%20files/Archive-2017/February-2017/1.pdf>
3. *Gupta M., Thakur S., Sharma A., Gupta S.* 2013. Qualitative and quantitative analysis of phytochemicals and pharmacological value of some dye yielding medicinal plants. – *Oriental. J. Chem.* 29(2): 475–481. <http://www.orientchem.org/?p=22064>
4. *Ghorbanzadeh H.R., Toosi M.H., Sazgarnia A., Yousefi M., Bajestani M.J., Salari R.* 2019. A novel vaporizer to release volatile substances from aromatic plants. – *J. Adv. Pharm Educ. Res.* 9(S2): 87–94. <https://japer.in/article/a-novel-vaporizer-to-release-volatile-substances-from-aromatic-plants>
5. *Lovkova M.Ya., Rabinovich A.M., Ponomareva S.M., Buzuk G.N., Sokolova S.M.* 2021. [Why do the plants treat?]. Moscow. 256 p. (In Russian)
6. *Lovkova M.Ya., Sokolova S.M., Buzuk G.N., Bykhovskij V.Ya., Ponomareva S.M.* 1999. Features of the elemental composition of medicinal plants synthesizing phenolic compounds. – *Applied Biochemistry and Microbiology.* 5: 514–524.
7. *Szymański M., Witkowska-Banaszczak E., Klak N., Marciniak K., Wołowicz T., Szymański A.* 2014. Effects of trace Elements on polyphenolic compounds in *Millefolii* herba. – *Pol. J. Environ. Stud.* 23(2): 459–466.
8. *Boyarskih I.G., Syso A.I., Siromlya T.I.* 2019. Variability of chemical elements and biologically active polyphenols in *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Caprifoliaceae) plant organs along an altitudinal gradient. – *Contemporary Problems of Ecology.* 12(6): 594–606. <https://doi.org/10.1134/S1995425519060039>
9. *Nekratova N.A., Nekratov N.F.* 2005. [Medicinal plants of the Altai-Sayan mountain region: resources, ecology, coenotic complexes, population biology, rational use]. Tomsk. 228 p. (In Russian)
10. *Boyarskikh I.G., Syso A.I., Siromlya T.I.* 2018. Mineral composition of *Lonicera caerulea* phytomass in contrasting geochemical environments. – *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* 3: 129–138. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033740> (In Russian)
11. *Kumarathilaka P., Dissanayake C., Vithanage M.* 2014. Geochemistry of serpentinite soils: A brief overview. – *J. Geol. Soc. Sri Lanka.* 16: 53–63.
12. *Marescotti P., Comodi P., Crispini L., Gigli L., Zucchini A., Fornasaro S.* 2019. Potentially toxic elements in ultramafic soils: A study from metamorphic ophiolites of the Voltri Massif (Western Alps, Italy). – *Minerals.* 9(8): 502. <https://doi.org/10.3390/min9080502>
13. *Kabata-Pendias A.* 2011. Trace Elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton. 505 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
14. [Criteria for assessing the environmental conditions of the territories to identify areas of extreme environmental conditions and zones of ecological disaster]. 1992. Moscow. (In Russian)
15. *Alexeeva-Popova N.V., Drozdova I.V.* 2013. Micronutrient composition of plants in the Polar Urals under contrasting geochemical conditions. – *Russ. J. Ecol.* 44(2): 100–107. <https://doi.org/10.1134/S1067413613020033>
16. *Gravel' I.V., Shoykhet Ya.N., Yakovlev G.P., Samylina I.A.* 2012. [Pharmacognosy. Ecotoxicants in medicinal plant raw materials and herbal medicinal products]. Moscow. 304 p. (In Russian)
17. [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200000. 2nd ed., Ser. Gorno-Altai. Sheet M-45-XIV (Ust-Koksa). Explanatory note] 2019. Moscow. 272 p. http://geo.mfvsegei.ru/200k/Zap/Zap_M-45-XIV.pdf (In Russian)
18. *Plennik R.Ya., Gontar E.M., Tyurina E.V., Guskova I.N., Izrailson V.F., Pshenichkina Yu.A.* 1989. [Useful plants of Khakassia. Resources and introduction]. Novosibirsk. 271 p. (In Russian)
19. *Nikolaev N.A., Livazan M.A., Skirdenko Yu.P., Martynov A.I.* 2019. [Biologically active plants and fungi of Siberia in clinical medicine]. V. 1. Moscow. 382 p. https://s.monographies.ru/doc/2019/03/file_5c90d9206e9e1.pdf (In Russian)
20. *Minayeva V.G.* 1991. [Medicinal plants of Siberia]. Novosibirsk. 427 p. (In Russian)
21. *Altantsetseg S., Shatar S., Javzmaa N.* 2012. Comparative study of essential oil constituents of *Bupleurum* species from Mongolia. – *Mongolian J. Chemistry.* 13(39): 28–30. <https://doi.org/10.5564/mjc.v13i0.156>
22. *Olennikov D.N., Partilkhaev V.V.* 2013. Flavonoids and phenylpropanoids from several species of *Bupleurum* growing in Buryatia. – *Chem. Nat. Compd.* 48(6): 1078–1082. <https://doi.org/10.1007/s10600-013-0471-x>
23. *Mirovich V.M., Olennikov D.N., Petukhova S.A., Posokhina A.A.* 2020. Flavonoids and phenylpropanoids of the above ground organs of the *Bupleuri multinervi* DS. of the flora of the Baikal region. – *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* 4: 121–128. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020047530> (In Russian)

24. Saratikov A.S., Minayeva V.G., Livshits N.S., Zhanayeva T.A., Lobanova I.Ye. 1990. [New pharmacological properties of the drug buplerin from the aerial part of *Bupleurum multinerve* DC.]. – Rastitelnye resursy. 26(1): 88–90. (In Russian)
25. Krylov G.V., Kozakova N.F., Lager' A.A. 1989. [Plants of health]. Novosibirsk. 304 p. (In Russian)
26. Wazir S.M., Dasti A.A., Shah J. 2004. Common medicinal plants of Chapursan valley, Gojal II, Gilgit Pakistan. – J. Res. (Science), Pakistan. 15(1): 41–43.
27. Abbas Z., Kousar S., Aziz M.A., Pieroni A., Aldosari A.A., Busmann R.W., Raza G., Abbasi A.M. 2021. Comparative assessment of medicinal plant utilization among Balti and Shina communities in the periphery of Deosai National Park, Pakistan. – Biology. 10, 434.
<https://doi.org/10.3390/biology10050434>
28. Perelman A.I., Kasimov N.S. 1999. [Geochemistry of the terrain]. Moscow. 610 p. (In Russian)
29. Glantz S.A. 2012. Primer of Biostatistics. 7 th ed. New York. 320 p.
30. Erschbamer B. 1991. Das Ionenmilieu im durchwurzelten Oberboden und seine Auswirkungen auf die Verbreitung der beiden *Carex curvula* Unterarten, *Carex curvula* ssp. *curvula* und *Carex curvula* ssp. *rosae* in der Dolomiten, Italien. [The Ionic States of the Rooting Zone and its Influence on the Distribution of the *Carex curvula*-subspecies, *Carex curvula* ssp. *curvula* and *Carex curvula* ssp. *rosae*, in the Dolomites, Italy.]. – Flora. 185(5): 345–355.
[https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)30494-2](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)30494-2)
31. Syso A.I. 2007. [Patterns of the distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk. 277 p. (In Russian)
32. Bityutskiy N.P. [Trace elements of higher plants]. 2020. St. Petersburg. (In Russian)
33. Siromlya T.I. 2014. [The content of the chemical elements in the aqueous extract of *Plantago major* L. under anthropogenic load]. – Voprosy biologicheskoy meditsinskoyi farmatsevticheskoy khimii. 9: 65–66. (In Russian)

**КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ**

**ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
В ТАЛЛОМАХ ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКОВ
В СОСНЯКЕ КУСТАРНИЧКОВО-ЗЕЛЕНОМОШНОМ
(ЮГО-ВОСТОЧНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)**© 2022 г. М. Н. Катаева¹ *, А. И. Беляева¹¹Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: mkmarikat@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 06.10.2022 г.

Изучено содержание металлов (Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Pb и Cd) в талломах лишайников *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw. и *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb., растущих в кустарничково-зеленомошном сосняке на стволах сосны (*Pinus sylvestris* L.) и можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.). В талломах изученных видов лишайников, произрастающих на можжевельнике в ярусе подлеска соснового леса по сравнению с лишайниками на стволах сосны, повышено содержание биогенного элемента – Fe (в 1.7–2.2 раза), а также тяжелых металлов – Ni (во всех изученных видах), Pb и Cd (в *Hypogymnia physodes*). В талломах лишайников листоватой жизненной формы (*Hypogymnia physodes* и *Platismatia glauca*) содержание Fe, Ni, Pb и Cd является более высоким, чем в талломах кустистого лишайника *Bryoria fuscescens*. Концентрации тяжелых металлов в эпифитных лишайниках в изученном сообществе близки к соответствующим показателям, установленным в среднетаежных лесах Карелии, не испытывающих влияния загрязнения. В талломах лишайников листоватой жизненной формы, особенно *H. physodes*, выявлено более высокое содержание металлов Fe, Mn, Zn, Ni, Cu и Pb по сравнению с субстратом – коркой стволов форофитов.

Ключевые слова: эпифитные лишайники, *Hypogymnia physodes*, *Bryoria fuscescens*, *Platismatia glauca*, концентрации микроэлементов, подзона средней тайги, юго-восточное Приладожье

DOI: 10.31857/S0033994622040069

Техногенное загрязнение экосистем в настоящее время становится все более значимым экологическим фактором. Интерес к изучению экологических особенностей эпифитных лишайников определяется их особой ролью в лесных сообществах, как компонента наиболее чувствительного к действию загрязнения.

В лесных экосистемах определяющую роль в биогеохимическом круговороте элементов играют эдификаторы – древесные растения [1, 2]. Структура древесного яруса фитоценоза и строение крон – фактор, определяющий состояние эпифитных лишайников, содержание в них зольных элементов, накопление тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd, Pb). С промышленными выбросами кислотообразующие вещества (диоксид серы, оксиды азота) и тяжелые металлы с высокой токсичностью распространяются на значительные расстояния, вызывая загрязнение среды в отдаленных регионах. Для оценки уровня загрязнения необходимы данные по элементному составу лишай-

ников в естественных лесных сообществах, не подверженных влиянию загрязнения.

Полог леса преобразует поток атмосферной миграции веществ. В результате прохождения осадков через лесной полог изменяется их состав и кислотность. Известно, что наиболее подвижные элементы (K, Ca, Mg, Mn, Fe) вымываются из крон [2, 3]. В лесных сообществах с атмосферными осадками, обогащенными химическими элементами природного и техногенного происхождения, в почву поступают растворенные химические вещества [2, 4–10]. Состав дождевых осадков, по сравнению со снеговыми, варьирует сильнее. Под пологом леса в осадках в наибольшей степени изменяется содержание биогенных элементов, в частности Mn и Fe, из-за вымывания из крон и с поверхности стволов. На фоновой территории в заповеднике “Кивач” (Республика Карелия) установлено, что содержание Mn в осадках под кронами сосны возрастает в 5.2 раза, Fe – в 2 раза по сравнению с открытым местом [5].

Отмечалось и более значительное увеличение концентраций Mn — в 16.6 раз (до 43.2 мкг/л), Fe — в 6.5 раз (до 120 мкг/л) [6, 7]. Для других элементов отмечено менее значительное влияние крон. Под кронами сосны была обнаружена тенденция к возрастанию в осадках концентраций Pb [6, 7]. На фоновую территорию заповедника “Кивач” выпадают слабокислые осадки, характерные для этого региона (рН 5.2). Под пологом соснового леса в сезон вегетации за счет обогащения осадков органическими и минеральными веществами с поверхности хвои выпадающие осадки подкисляются на 0.7–0.8 единиц рН [5, 6]. Кислая реакция осадков под пологом леса имеет важное экологическое значение, поскольку повышает растворимость тяжелых металлов, усиливает их вымывание из крон и миграцию.

В лесном пологе осадки задерживаются кронами и поступают к нижним ярусам неравномерно. Полог соснового леса в подзоне средней тайги задерживает в кронах 28–42% осадков [11, 12]. В северной тайге под полог редкостойного соснового леса за лето проникает значительная часть осадков, в среднем 76% от открытого места, при этом высокое расположение крон сосны способствует рассеиванию осадков [13]. У края крон сосен количество осадков выше — до 85%, в середине подкоронового пространства оно уменьшается до 72% [14].

Полог соснового древостоя создает особые экологические условия для яруса подлеска, к которому поступают осадки, прошедшие через кроны сосны. В ярусе подлеска сосновых лесов часто встречается можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.) кустарничковой жизненной формы [15]. Компактное строение кроны можжевельника и высокий индекс поверхности хвои может влиять на накопление металлов в эпифитных лишайниках, растущих на можжевельнике. Густо охвоенная крона можжевельника, по-видимому, имеет способность концентрировать осадки, в том числе конденсационные осадки из водных паров, что, вероятно, и приводит к более высокому содержанию элементов в лишайниках. По сравнению с открытым местом, в лишайниках, растущих на можжевельнике под пологом древостоя, обнаружено возрастание концентраций Mn [16]. Данные об экологических факторах, влияющих на жизнедеятельность эпифитных лишайников, растущих на можжевельнике, ограничены, и влияние этого форофита на лишайники мало изучено [15, 17–19].

Для оценки уровня загрязнения в подзоне средней тайги на северо-западе России на основе лишеноиндикации, нужны данные, характеризующие региональные фоновые концентрации тяжелых металлов в эпифитных лишайниках. В связи с этим, лишеноиндикационные исследования на юге Ладожско-Онежского перешейка в бас-

сейне р. Свирь представляют собой актуальную задачу. Разнообразие видов лишайников на этой территории связано с произрастанием здесь массивов малонарушенных, старовозрастных хвойных лесов, в том числе сосняков кустарничково-зеленомошных [1, 2].

Эпифитные лишайники *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw., *Hypogymnia physodes* L.) Nyl., *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. — типичные лесные виды, произрастающие на сосне и можжевельнике, они широко распространены в лесах среднетаежной подзоны.

Цель работы состояла в оценке особенностей аккумуляции тяжелых металлов эпифитными лишайниками сем. Parmeliaceae, произрастающими на разных форофитах — сосне обыкновенной и можжевельнике обыкновенном, в условиях среднетаежного соснового фитоценоза.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования элементного химического состава эпифитных лишайников были проведены в подзоне средней тайги на юго-восточном побережье Ладожского озера в бассейне р. Свирь (Лодейнопольский р-н Ленинградской обл.) в средневозрастном кустарничково-зеленомошном сосновом сообществе. Территория находится вне зон прямого влияния атмосферного загрязнения.

Образцы лишайников и субстратов собраны в августе 2018 г. Расстояние от берега Ладожского озера — 24 км, высота н. у. м — 25 м. Территория имеет равнинный характер. Древесный ярус изученного сообщества образует *Pinus sylvestris* L. с примесью *Betula* sp. Возраст сосны 90–100 лет, есть мелкий подрост. Средний диаметр сосны у основания стволов 33 ± 1 см, на высоте 1.3 м — 26 ± 1.5 см. В ярусе подлеска распространен кустарничковый можжевельник *Juniperus communis* L., присутствует рябина *Sorbus aucuparia* L. Высота можжевельника — 2.0–2.2 м, диаметр оснований стволов — 4.6–9.1 см. В напочвенном покрове преобладает *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., в травяно-кустарничковом ярусе — черника *Vaccinium myrtillus* L.

Образцы лишайников *Hypogymnia physodes*, *Bryoria fuscescens* и *Platismatia glauca* собраны со стволов 30 деревьев сосны и 8 кустов можжевельника диаметром 2.9–4.5 см в средней части кроны. Выбирали неповрежденные прямостоящие деревья сосны и крупные хорошо развитые кусты можжевельника. Высота сбора — 1.3 м по всей окружности стволов. Средняя длина таллома *Bryoria fuscescens* на сосне — 11.8 см, на можжевельнике — 8.0 см. Размеры талломов видов листоватой жизненной формы 4–5(6) см в диаметре. Для изучения свойств субстрата с каждого дерева сосны отбирали тонкий слой корки (пластины по 1–3 мм

Таблица 1. Содержание микроэлементов ($m \pm sd$, мг/кг сух. вещества) в эпифитных лишайниках на разных форофитах в сосняке кустарничково-зеленомошном на территории юго-восточного Приладожья
Table 1. Content of trace elements ($m \pm sd$, mg/kg d.m.) in epiphytic lichens on different phorophytes in dwarf shrub-green moss pine forest of the southeastern Ladoga region

Вид, показатель Species, indicator	Элементы Element							
	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn	Fe/Mn
Ствол сосны Scots pine trunk								
<i>Bryoria fuscescens</i>	0.41 ± 0.01*	1.86 ± 0.12	0.203 ± 0.05	0.83 ± 0.01	58.9 ± 5.6*	126 ± 15	32.1 ± 1.63	0.47
<i>Hypogymnia physodes</i>	0.76 ± 0.12*	3.17 ± 0.23	0.306 ± 0.03*	2.16 ± 0.03*	197 ± 1.7	210 ± 23	46.4 ± 1.81	0.94
<i>Platismatia glauca</i>	0.66 ± 0.01*	2.25 ± 0.19	0.119 ± 0.01	1.96 ± 0.20	155 ± 3.5*	88.3 ± 3.2	20.9 ± 0.93	1.76
Среднее Mean	0.61 ± 0.18	2.43 ± 0.67	0.209 ± 0.09	1.65 ± 0.72	137 ± 71	141 ± 62	33.1 ± 13	1.05
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	29.6	27.7	44.7	43.5	51.7	44.0	38.6	61.9
Стволики можжевельника Juniper trunks								
<i>Bryoria fuscescens</i>	0.71 ± 0.01*	2.28 ± 0.16	0.254 ± 0.07	1.50 ± 0.12	132 ± 11*	169 ± 17	37.4 ± 1.93	0.78
<i>Hypogymnia physodes</i>	2.16 ± 0.34*	3.65 ± 0.57	0.511 ± 0.11*	4.84 ± 0.45*	358 ± 61	423 ± 183	51.8 ± 8.92	0.85
<i>Platismatia glauca</i>	1.04 ± 0.20*	2.09 ± 0.17	0.118 ± 0.01	2.77 ± 0.39	258 ± 21*	316 ± 30	22.9 ± 0.85	0.82
Среднее Mean	1.30 ± 0.76	2.67 ± 0.85	0.294 ± 0.20	3.04 ± 1.69	249 ± 113	303 ± 128	37.4 ± 15	0.81
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	58.3	31.8	67.8	55.5	45.4	42.1	38.7	4.0

Примечание. Звездочкой отмечены значения концентраций элементов в лишайниках на высоте 1.3 м, достоверно различающиеся на разных форофитах при $P < 0.05$ (критерий Манна–Уитни).

Note: An asterisk marks the values of element concentrations in lichens at breast height, which differ significantly in different phorophytes at $P < 0.05$ (Mann–Whitney test).

толщ.). У можжевельника отбирали слой корки стволиков в кроне. При низком обилии и биомассе лишайников, растущих на стволах сосны, образцы с 10 деревьев объединяли в средние пробы по видам. Анализировали образцы лишайников и корки стволиков, собранных с 8 экземпляров можжевельника, и 3 средние пробы лишайников и корки с 30 стволов сосны. В кронах сосны и можжевельника отбирали смешанные пробы хвои текущего года и однолетней хвои и в них определяли содержание химических элементов.

Образцы лишайников и их субстратов очищали от посторонних примесей, высушивали в термостате при 40 °С. Воздушно-сухую навеску 2.0–2.5 г озоляли в муфеле при 450 °С, золу растворяли в 2N HCl, образец фильтровали через фильтр “синяя лента”, объем доводили до 15 мл деионизированной водой. Содержание Mn, Fe, Zn, Cu, Ni, Cd и Pb определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре КВАНТ-АФА. Анализ образцов лишайников и субстратов делали в двукратной повторности. Кислотность водной вытяжки корки, хвои и древесины (измельченных воздушно-сухих образцов) измеряли на иономере И-160 в деионизированной воде через 24 часа в соотношении 1 : 10.

При статистической оценке различий использовали непараметрический критерий Манна–

Уитни при уровне значимости $P < 0.05$. Названия видов приведены согласно списку лишайников Нижне-Свирского заповедника [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа показывают, что в средне-таежном сосняке кустарничково-зеленомошном на двух изученных видах форофитов лишайники содержат довольно низкие концентрации тяжелых металлов – Ni, Cu, Cd и Pb (табл. 1). В лишайниках, растущих на разных форофитах – в кроне можжевельника и на стволах сосны, выявлены достоверные различия концентраций только четырех тяжелых металлов – Ni, Pb, Cd, а также Fe. Все виды лишайников, растущих на можжевельнике, накапливают ~ в 2 раза больше Ni, а *Hypogymnia physodes* – в 2 раза больше Pb и в 1.7 раза больше Cd, чем растущие на сосне (табл. 1). Достоверных различий в концентрациях Cu, Cd и Pb в талломах *Bryoria fuscescens* и *Platismatia glauca* на разных форофитах не выявлено.

Биогенные микроэлементы – Mn, Fe и Zn, по сравнению с более токсичными тяжелыми металлами, отличаются значительно более высокими концентрациями в эпифитных лишайниках (табл. 1). Обнаружено, что в лишайниках *Bryoria fuscescens* и *Platismatia glauca*, растущих на разных

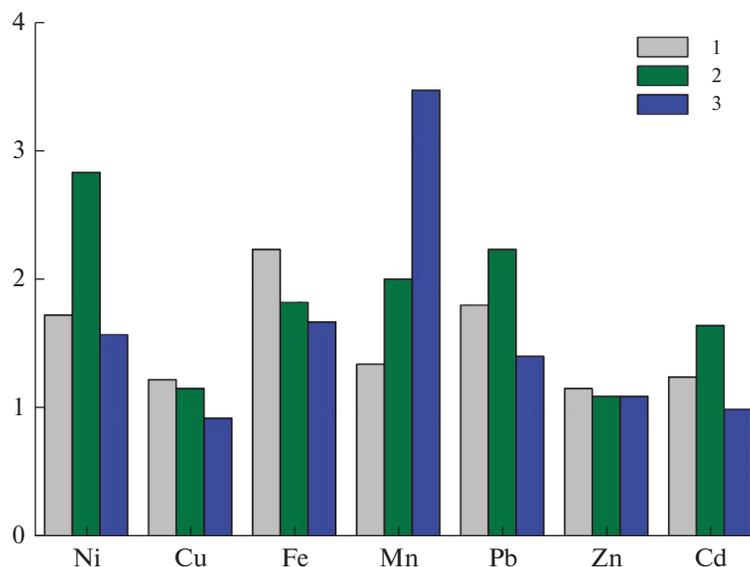


Рис. 1. Соотношение средних концентраций химических элементов в эпифитных лишайниках, растущих на стволах можжевельника обыкновенного и сосны обыкновенной.

По горизонтали: химические элементы; по вертикали: соотношение концентраций.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*.

Fig. 1. The ratio of average concentrations of chemical elements in epiphytic lichens growing on the trunks of Scots pine and common juniper.

X-axis: chemical elements; y-axis: the ratio of concentrations.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*.

форофитах, достоверно различается содержание Fe: в кроне можжевельника оно является в 1.5–2 раза более высоким.

Соотношение концентраций изученных элементов в талломах лишайников, произрастающих на разных форофитах, представлено на рис. 1. По величине соотношения содержания элементов в лишайниках на можжевельнике и сосне выделяются Fe, Mn, Pb и Ni.

Вариабельность накопления элементов в разных видах лишайников оценивали по величине коэффициента вариации (табл. 1). Наиболее существенно варьируют концентрации Ni, Cd и Pb в лишайниках на можжевельнике (CV = 55–68%). Довольно высокий коэффициент вариации характерен для концентрации в лишайниках Fe (52% на сосне и 46% на можжевельнике), Pb (соответственно 43 и 55%) и Mn (соответственно 44 и 42%). Наиболее низкими значениями коэффициента вариации отличаются концентрации Cu в лишайниках, растущих на можжевельнике и сосне (28 и 32%) и Ni в лишайниках на сосне (~30%).

При сравнении видов лишайников, собранных в незагрязненном сообществе по накоплению металлов следует учитывать, что концентрации большинства элементов в них низкие, что приводит к трудностям в выявлении различий. Более значительные отличия обнаружены между видами лишайников разных жизненных форм. Большой способностью к биоаккумуляции ме-

таллов от других видов лишайников отличается *H. physodes*. На стволах сосны различия по содержанию Ni, Cu, Cd, Pb и Fe установлены между видами *H. physodes* и *B. fuscescens*. Листоватый лишайник *H. physodes* по сравнению с кустистым видом *B. fuscescens* накапливает в 3 раза больше Fe и в 1.5–2.6 раза больше тяжелых металлов Ni, Pb, Cu и Cd (табл. 2). Лишайники *P. glauca* и *B. fuscescens* достоверно различаются только по содержанию Cd, которое у первого вида является примерно в 2 раза более высоким.

Между видами лишайников, растущих на стволиках в кроне можжевельника, выявлено больше различий (табл. 2). В талломах *H. physodes* на можжевельнике содержание Fe и Zn является достоверно более высоким, чем в талломах *B. fuscescens* (соответственно в 2.7 и 1.4 раза) и *P. glauca* (в 1.4 и 2.3 раза). Накопление Ni и Pb достоверно различается у всех трех видов лишайников, растущих на можжевельнике. Наиболее высоким содержанием Ni и Pb, в 1.7–3 раза превышающим содержание этих элементов в талломах двух других видов, отличается *H. physodes*; наиболее низкие концентрации характерны для кустистого вида *B. fuscescens*. Концентрации Cu у *H. physodes* в 1.6–1.7 раза, а Cd – в 2–4 раза выше, чем у *B. fuscescens* и *P. glauca*. Два последних вида по содержанию этих элементов достоверно не различаются. По возрастанию концентраций ме-

Таблица 2. Различия концентраций микроэлементов в талломах разных видов лишайников
Table 2. Differences in trace element concentrations in thalli of different lichen species

Элемент Element	<i>Bryoria fuscescens</i>	<i>Hypogymnia physodes</i>	<i>Platismatia glauca</i>
	средние концентрации ($m \pm sd$, мг/кг сух. вещества) mean concentration ($m \pm sd$, mg/kg d.m.)		
	<i>Pinus sylvestris</i>		
Ni	0.41 ± 0.01 ^a	0.76 ± 0.12 ^b	0.66 ± 0.01 ^{ab}
Cu	1.86 ± 0.12 ^a	3.17 ± 0.23 ^b	2.25 ± 0.19 ^{ab}
Cd	0.203 ± 0.05 ^a	0.306 ± 0.03 ^b	0.119 ± 0.01 ^c
Pb	0.83 ± 0.01 ^a	2.16 ± 0.03 ^b	1.96 ± 0.20 ^{ab}
Fe	58.9 ± 5.6 ^a	197 ± 1.7 ^b	155 ± 3.5 ^{ab}
Mn	126 ± 15 ^a	210 ± 23 ^a	88.3 ± 3.2 ^a
Zn	32.1 ± 1.63 ^a	46.4 ± 1.81 ^a	20.9 ± 0.93 ^a
	<i>Juniperus communis</i>		
Ni	0.71 ± 0.01 ^a	2.16 ± 0.34 ^b	1.04 ± 0.20 ^c
Cu	2.28 ± 0.16 ^a	3.65 ± 0.57 ^b	2.09 ± 0.17 ^a
Cd	0.254 ± 0.07 ^a	0.511 ± 0.11 ^b	0.118 ± 0.01 ^a
Pb	1.50 ± 0.12 ^a	4.84 ± 0.45 ^b	2.77 ± 0.39 ^c
Fe	132 ± 11 ^a	358 ± 61 ^b	258 ± 21 ^a
Mn	169 ± 17 ^a	423 ± 183 ^a	316 ± 30 ^a
Zn	37.4 ± 1.93 ^a	51.8 ± 8.92 ^b	22.9 ± 0.85 ^a

Примечание. Разными буквами в строках отмечены значения концентраций элементов, которые достоверно различаются у разных видов на каждом из форофитов при $P < 0.05$ (критерий Манна–Уитни).

Note. Different letters in the rows indicate the values of the element concentrations that differ significantly in different species on each of the phorophytes at $P < 0.05$ (Mann–Whitney test).

таллов в талломах изученные виды лишайников образуют ряд: *B. fuscescens* < *P. glauca* < *H. physodes*.

При использовании лишайников в целях биоиндикации загрязнения следует учитывать существенную межвидовую изменчивость накопления химических элементов. Содержание микроэлементов в талломах разных видов лишайников значительно варьирует и даже среди видов одного рода вариабельность концентраций может быть довольно высокой в связи с влиянием экологических условий. В качестве главного механизма в процессе накопления тяжелых металлов рассматриваются катионообменные свойства клеточных стенок талломов лишайников [23, 26]. Важное биологическое значение у лишайников имеет состав ферментов, их активность на разных субстратах, содержание и состав лишайниковых кислот, обладающих защитным действием от интенсивного солнечного света и испарения [27].

Накопление тяжелых металлов в лишайниках может отражать перенос промышленных выбросов с сопредельных территорий и необходимо рассмотреть роль возможных источников загрязнения. При постоянном влиянии западного пере-

носа воздушных масс в регионе [28], лесные фитоценозы вблизи Ладожского озера могут испытывать влияние аэропромвыбросов г. Санкт-Петербурга, Республики Карелии и Финляндии. Концентрации металлов в эпифитных лишайниках в изученном сообществе близки к концентрациям в средне-таежных сообществах соседнего региона Карелии. На территории Карелии в заповеднике “Кивач” концентрации металлов в лишайнике *H. physodes* близки к фоновым значениям [25]. Установленная в настоящем исследовании концентрация Cd (0.31–0.51 мг/кг) в талломах *H. physodes* не превышает концентрацию этого элемента в лишайниках на фоновых территориях Финляндии и на Европейском Северо-Востоке – 0.7 мг/кг [23, 24]. Эпифитные кустистые лишайники (*Bryoria fuscescens*, *B. capillaris*, *Usnea dasopoga*, *Alectoria sarmentosa*) в Карелии остаются сравнительно не загрязненными тяжелыми металлами [29]. Однако на широтном градиенте в Карелии выявлены территории, на которых наблюдается накопление в лишайниках загрязняющих веществ, связанное с дальним переносом от техногенных источников. Вблизи Ладожского озера в лишайниках содержится до 0.16 мг/кг Cd и 3.1 мг/кг Pb. Севернее

(Лоухский р-н Карелии, Калевальский р-н, пос. Кепа) в талломах *B. fuscescens* содержание Ni повышено до 2.8 мг/кг, Cu – до 8.4 мг/кг, что, по-видимому, связано с влиянием переноса выбросов медно-никелевых металлургических комбинатов, располагающихся на территории Кольского полуострова. В среднетаежных хвойных лесах *H. physodes* отличается более низкими концентрациями загрязнителей (Ni – в 6 раз, Cu – в 5 раз) по сравнению с северотаежным березово-сосново-еловым сообществом Кольского полуострова [16].

Условия на территории заповедников могут не соответствовать полностью фоновым в случае близкого расстояния от промышленных предприятий и при действии трансграничных переносов загрязняющих веществ. Источники загрязнения никелем, медью и свинцом в Мурманской области являются более мощными, чем в Ленинградской области. В Карелии Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ГОК) выделяется выбросами железа, превосходящими примерно в 5 раз выбросы источников, расположенных в Санкт-Петербурге [28]. На территории, окружающей Костомукшский ГОК, поступают пыль и тяжелые металлы, в результате чего образуются зоны локального загрязнения [28, 30]. В некоторых лесных сообществах Карелии отмечались признаки влияния атмосферного загрязнения и накопление металлов (Fe, Ni, Pb, Cr, Co) во мхах и в почве [30, 31]. По элементному составу эпифитных лишайников в локальной зоне влияния на территории Карелии выявлено, в первую очередь, загрязнение Fe (превышение в 2–3 раза фоновых концентраций), в меньшей степени Ni [25, 32]. В заповеднике “Кивач” в Карелии наблюдается загрязнение эпифитных лишайников Pb (до 6.6–10 мг/кг). В южной части Карелии обнаружено повышение годового поступления со снеговыми осадками тяжелых металлов, таких как Cd и Pb [33]. Причиной, возможно, является дальний перенос загрязнителей от промышленных источников европейских стран. На большей части соседней лесной территории Финляндии в *H. physodes* выявлены, главным образом, низкие концентрации тяжелых металлов [24]. Металлургические производства на западе Финляндии и влияние городов определяют неравномерное распределение аэротехногенного загрязнения по ее территории. На юго-западе страны имеются зоны, отличающиеся наличием атмосферного загрязнения: концентрации Cd в *H. physodes* на этих территориях превышают 0.6 мг/кг, концентрации Pb – 15 мг/кг, Ni – 2.3 мг/кг, Cu – 7.6 мг/кг [24].

На территории юго-восточного Приладожья концентрации тяжелых металлов в лишайнике *H. physodes* довольно близки к характерным для фоновых территорий с уровнем Cd – 0.56 мг/кг, Ni – 1.7 мг/кг, Cu – 6.0 мг/кг [34] и к соответствующим показателям, установленным в среднета-

ежных лесах соседнего региона Карелии, не испытывающего влияния локального загрязнения [25, 29]. Выявленный в районе исследований уровень накопления металлов в талломах *P. glauca* сопоставим с наблюдаемым в фоновых условиях на территории Республики Коми, с концентрациями Cu – 3.2 мг/кг, Cd – 0.2 мг/кг, Zn – 48 мг/кг [23].

В кроновом пространстве древостоя создаются градиенты влажности и температуры [9, 35], формируется более влажный микроклимат. Сток по стволам в лесных сообществах гораздо менее значительный, чем количество осадков под кронами, он составляет не более 3% от общего количества дождевых осадков [9, 35]. В Эстонии в сосновых лесах более разнообразный видовой состав лишайников зарегистрирован в кронах сосны по сравнению со стволами на высоте менее 2 м, где условия более сухие [36]. Лишайники на стволах сосны предпочитают освещенные участки, особенно это касается *P. glauca*, этот вид относят к наиболее светолюбивым [37].

Условия местообитания лишайников на стволах сосны отличаются от условий в кронах можжевельника. На сухостое и стволках можжевельника в лесных сообществах Заонежского полуострова обнаружены охраняемые виды лишайников (*Lobaria pulmonaria*, *L. scrobiculata*) [38]. В связи с этим, определение свойств этого субстрата представляет несомненный интерес. Корка стволиков можжевельника имеет менее кислую реакцию (рН 4.1) по сравнению с коркой сосны (рН 3.3) (табл. 3). Кислотность корки можжевельника более близка к рН осадков, прошедших через кроны сосны (рН 4.6–6.7) [7, 39]. Кислотность водных вытяжек из хвои сосны и можжевельника в местообитаниях лишайников различается мало: рН составляет соответственно 4.67 и 4.66. Корка и древесина сухих ветвей можжевельника без коры имеет достоверно менее кислую реакцию, чем корка стволов сосны. Лишайники, растущие на изученных форофитах – сосне обыкновенной и можжевельнике проявляют себя как ацидофильные виды в связи с кислой реакцией их субстратов. В сосновых лесах северной тайги, не испытывающих прямого влияния загрязнения диоксидом серы и тяжелыми металлами, обнаружены сопоставимые с полученными в настоящем исследовании значения кислотности корки сосны (рН 3.42) и концентраций тяжелых металлов Ni, Cu, Cd и Pb [40]. В среднетаежных лесах территории Карелии кислотность корки стволов сосны [41] также близка к значениям, установленным в настоящем исследовании.

На древесине можжевельника отмечается иной видовой состав лишайников, по сравнению с коркой [19]. Отмерший древесный субстрат характеризуется высокой водоудерживающей способностью [42], что, по-видимому, создает благо-

Таблица 3. Кислотность и содержание микроэлементов ($m \pm sd$, мг/кг сух. в-ва) в субстратах эпифитных лишайников и хвое сосны обыкновенной и можжевельника обыкновенного в исследованном сосняке кустарничково-зеленомошном

Table 3. Acidity and concentration of trace elements ($m \pm sd$, mg/kg d.m.) in substrates of epiphytic lichens and needles of Scots pine and juniper in the investigated dwarf shrub–green moss Scots pine forest

Показатели Parameters	Типы субстратов, на высоте 1.3 м Types of substrates, at breast height			Хвоя форофитов Phorophyte needles	
	корка стволов сосны ($D = 26.1$ см) pine outer bark ($D = 26.1$ cm)	корка стволов можжевельника ($D = 2.9$ см) juniper outer bark ($D = 2.9$ cm)	древесина сухих ветвей и стволов можжевельника wood of juniper dry branches and trunks	хвоя сосны (1–2-летняя) scots pine needles, (1–2 years old)	хвоя можжевельника (1–2-летняя) juniper needles (1–2 years old)
pH	3.33 ± 0.03^1 a	4.10 ± 0.09 b	4.07 ± 0.04 b	4.67 ± 0.53 c	4.66 ± 0.21 c
Ni	0.44 ± 0.10 a	1.20 ± 0.12 b	0.36 ± 0.08 a	0.71 ± 0.10 b	2.59 ± 1.8 b
Cu	2.54 ± 0.12 a	3.17 ± 0.48 a	1.27 ± 0.40 b	1.86 ± 0.05 b	1.74 ± 0.01 b
Fe	89.8 ± 14 a	104 ± 19 a	10.3 ± 3.8 b	22.3 ± 9.3 bc	28.7 ± 0.15 c
Mn	111 ± 15 a	145 ± 12 a	76.8 ± 1.7 b	1240 ± 267 c	2170 ± 520 c
Pb	2.96 ± 0.78 a	3.36 ± 0.24 a	1.31 ± 0.59 b	0.35 ± 0.05 c	0.74 ± 0.04 b
Cd	0.39 ± 0.05 a	0.20 ± 0.07 a	0.04 ± 0.01 b	0.05 ± 0.01 b	0.06 ± 0.02 b
Zn	17.2 ± 3.8 a	18.3 ± 0.66 a	3.30 ± 0.24 b	37.3 ± 4.3 c	15.3 ± 0.69 a

Примечание. ¹Разными буквами отмечены значения содержания элементов на разных субстратах, достоверно различающиеся при $P < 0.05$ (критерий Манна–Уитни).

Note. ¹Different letters indicate the values of the elements content on different substrates that differ significantly at $P < 0.05$ (Mann–Whitney test).

приятные условия для развития эпифитных лишайников на засохших ветвях можжевельника альварных лесов Эстонии [39, 43]. Известно, что обилие эпифитных лишайников часто возрастает на ослабленных деревьях и на сухой древесине [44]. При интенсивном росте талломов эпифитные лишайники в ряде случаев могут осваивать хвою видов форофитов в качестве субстрата [45].

Элементный состав корки стволов и ветвей можно рассматривать как показатель условий роста эпифитных лишайников. Сосна обыкновенная, можжевельник обыкновенный, ель европейская относятся к группе видов с корой, довольно обедненной по химическому составу, в отличие от лиственных пород [18]. Корка стволов хвойных отличается от древесины более высоким содержанием минеральных элементов и тяжелых металлов [40, 47, 48]. В результате проведенного анализа выявлены сходные концентрации изученных элементов в корке сосны и можжевельника, за исключением Ni, содержание которого в корке можжевельника является в 3 раза более высоким, чем в корке сосны (табл. 3). Сухие ветви можжевельника отличаются в 2.5–10 раз более низкими концентрациями Fe, Mn и Zn и тяжелых металлов – Cd, Pb, Cu и Ni, чем корка, что свидетельствует о существенном различии этих субстратов.

По сравнению с другими фракциями фитомассы древостоя, хвоя отличается более высокими концентрациями химических элементов [1, 47, 48]. Однако в корке стволов хвойных, как бо-

лее длительно существующем субстрате, по сравнению с хвоей, в большей степени накапливаются Cu, Pb, Cd и Fe (табл. 3). Хвоя сосны и можжевельника отличается от корки стволов этих видов достоверно меньшей кислотностью, в 10–15 раз более высоким содержанием Mn. Содержание Zn в корке и хвое можжевельника одинаково, а в хвое сосны является примерно в 2 раза более высоким, чем в корке ствола. В хвое обоих видов форофитов отмечаются крайне низкие концентрации Cd (0.05–0.06 мг/кг), составляющие всего 10–19% от концентраций Cd в лишайнике *H. physodes*, растущем на этих форофитах. В хвое можжевельника концентрации Pb значимо выше, чем в хвое сосны (табл. 3). Концентрации остальных элементов в хвое двух видов достоверно не различаются.

Элементный состав корки стволов сосны – субстрата, на котором произрастают эпифитные лишайники, в сосняке кустарничково-зеленомошном соответствует уровню, наблюдаемому в незагрязненных фитоценозах. Средние концентрации металлов в корке сосны в основном не превышают значений в корке на фоновых территориях заповедников Республики Карелия [25] и соседней Финляндии (Ni – 0.65, Cu – 2.72, Pb – 3.94, Cd – 0.23 мг/кг) [40]. Следует отметить, что толщина анализируемого слоя корки ствола сосны может различаться в разных работах. Кора состоит из отличающихся по химическому составу частей, и содержание элементов в коре ствола ча-

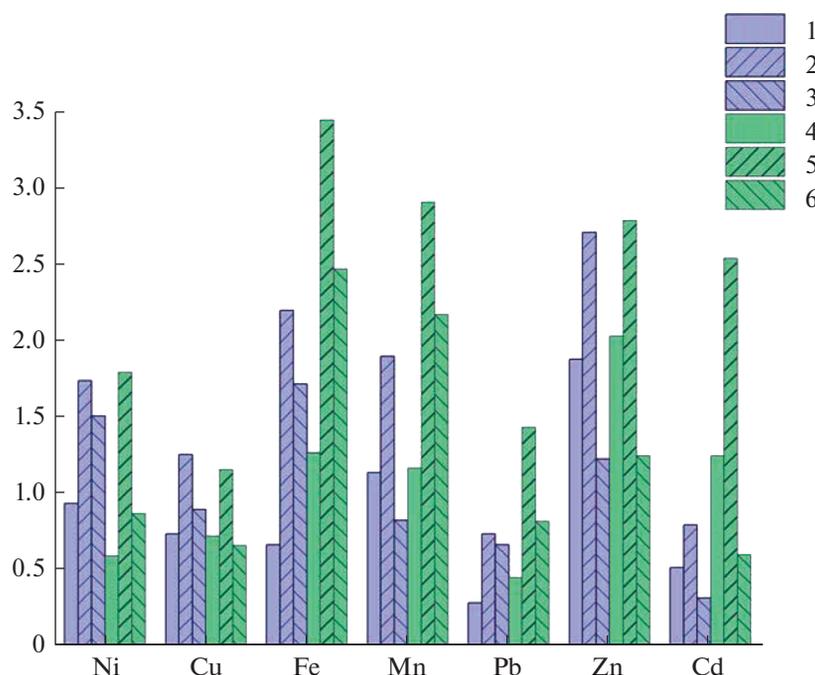


Рис. 2. Соотношение средних концентраций химических элементов в эпифитных лишайниках и их субстратах (корка стволов сосны и можжевельника).

По горизонтали: химические элементы; по вертикали: соотношение концентраций.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*, на стволах сосны;

4, 5, 6 – те же виды на можжевельнике. В штриховке выделена жизненная форма.

Fig. 2. The ratio of the average concentrations of chemical elements in epiphytic lichens and their substrates (outer bark of pine and juniper trunks).

X-axis: chemical elements; y-axis: the ratio of concentrations.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*, on pine trunks;

4, 5, 6 – the same species on juniper. Hatching indicates the life form.

сто трудно сопоставлять из-за отсутствия данных о вкладе в него массовых долей корки (ритидома) и флоэмы [46].

Лишайники, растущие на сосне, в большинстве случаев имеют более высокое (в 1.7–2.7 раза) или равное с субстратом содержание в талломах Fe, Mn и Zn, за исключением содержания Fe в талломах *B. fuscescens* и Mn в *P. glauca* (соотношение < 1). Соотношение содержания Ni и Cu в эпифитных лишайниках и корке ствола сосны варьирует в основном от 1 до 1.7, а соотношение Pb и Cd у всех изученных видов меньше 1 (рис. 2).

В талломах изученных видов листоватых лишайников, растущих на можжевельнике накопление Fe, Mn, а в *H. physodes* также Zn, является более высоким, чем в корке стволов, что наглядно выражено в соотношении концентраций – от 2.2 до 3.5 (рис. 2). В талломах *H. physodes* по сравнению с коркой можжевельника, выявлены значимо более высокие концентрации Fe ($Z = -2.55$, $p = 0.010$), Mn ($Z = -2.45$, $p = 0.014$), Zn ($Z = -2.45$, $p = 0.014$), а также тяжелых металлов – Ni ($Z = -2.23$, $p = 0.025$), Pb ($Z = -2.02$, $p = 0.025$) и Cd ($Z = -2.45$, $p = 0.014$); различий в содержании Cu не обнаружено.

Лишайники листоватой жизненной формы (*H. physodes*, *P. glauca*) в сравнении с кустистым лишайником *B. fuscescens* отличаются более высоким соотношением содержания тяжелых металлов Ni, Cu и Pb в талломах и корке стволов форофитов (рис. 2). Наиболее выраженную способность к биоаккумуляции тяжелых металлов среди изученных видов лишайников проявляет *H. physodes*. Лишайники *B. fuscescens* и *P. glauca* как на сосне, так и на можжевельнике отличаются более слабым накоплением Ni, Cu, Cd и Pb по отношению к субстрату, соотношение концентраций в большинстве случаев меньше 1. Эти виды в меньшей степени подходят для оценки загрязнения.

Лишайники более интенсивно, чем хвоя, аккумулируют Pb. В частности, в талломах *H. physodes* накопление этого элемента превосходит содержание в хвое можжевельника и сосны в 6–6.5 раз (табл. 1, 3), а в талломах кустистого лишайника *B. fuscescens* – в 2–2.4 раза. Листоватый лишайник *H. physodes*, по сравнению с хвоей форофитов, в большей степени накапливает Cu, концентрации Ni в его талломе сопоставимы с концентрацией в хвое сосны и можжевельника.

Значительные концентрации Mn в хвое сосны (1240 мг/кг) и хвое можжевельника (2170 мг/кг) согласуется с имеющимися в литературе оценками для фоновых территорий [1, 49]. Эти величины являются существенно более высокими, чем величины содержания Mn в талломах изученных видов лишайников (табл. 1, 3). Содержание Fe, напротив, существенно (в 3–12 раз) выше в лишайниках по сравнению с хвоей сосны и можжевельника. Содержание Zn в лишайниках сопоставимо с содержанием в хвое.

Таким образом, в фоновых условиях лишайники являются более эффективными индикаторами поступления в фитоценоз Cu, Pb, Cd и Fe с атмосферными выпадениями по сравнению с хвоей сосны и можжевельника, которая относительно слабо накапливает тяжелые металлы. При аккумуляции металлов в лишайниках сложно разделить поступление элементов в растворимой форме и в виде пылевых частиц, особенно это касается Fe [7]. В лесных экосистемах атмосферное поступление элементов – постоянный внешний источник пополнения элементами минерального питания, оказывающий влияние на биогеохимическую миграцию веществ [2]. Эпифитные лишайники позволяют выявить атмосферное поступление в фитоценоз тяжелых металлов, слабо вовлекаемых в биологический круговорот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные на юго-восточном побережье Ладожского озера в бассейне р. Свирь (Лодейнопольский р-н, Ленинградская обл.) в среднетаежном кустарничково-зеленомошном сосновом сообществе показали, что эпифитные лишайники, растущие на стволах сосны и долгоживущих экземплярах можжевельника, подходят для оценки многолетнего уровня аэротехногенного загрязнения. Содержание тяжелых металлов в лишайниках на разных видах форофитов в пределах изученного фитоценоза различно, что связано с особенностями их местообитаний. По сравнению с условиями на стволах сосны, условия для роста эпифитных лишайников в кронах можжевельника являются более благоприятными, благодаря формированию особого микроклимата. Строение кроны можжевельника, угол при-

крепления ветвей способствуют накоплению дождевых и снеговых осадков и повышению концентраций металлов, поступающих с атмосферными выпадениями, в эпифитных лишайниках. В талломах всех исследованных видов лишайников, растущих на можжевельнике, наблюдается достоверно более высокое содержание Ni (в 1.7–3 раза). Кроме того, на можжевельнике в талломах *H. physodes* накапливается больше Pb (примерно в 2 раза) и Cd, а в талломах *B. fuscescens* и *P. glauca* в 1.7–2 раза больше Fe по сравнению с лишайниками, растущими на стволах сосны.

В лишайниках, растущих на можжевельнике, по величине концентраций металлы образуют следующий ряд: $Mn > Fe > Zn > Cu \geq Pb > Ni > Cd$. Концентрации $Pb > Cu$ в талломах *H. physodes* и *P. glauca*. Для видов, растущих на сосне, в большинстве случаев характерен аналогичный ряд: $Mn \geq Fe > Zn > Cu > Pb > Ni > Cd$. Исключение составляет *P. glauca*: у этого вида на сосне концентрация Fe выше концентрации Mn. Концентрации металлов в разных видах эпифитных лишайников на сосне в исследованном сообществе не превышают значений, установленных в ненарушенных сообществах в соседнем регионе – заповеднике “Кивач” на юге Карелии.

Для лишайника листоватой жизненной формы *H. physodes* характерно более высокое содержание металлов Ni, Fe, Mn, Zn и Cd в талломах по сравнению с субстратом – коркой стволов форофитов. Это указывает на более высокую эффективность применения эпифитных лишайников по сравнению с их субстратом при оценке загрязнения.

Результаты исследования можно использовать при изучении тенденций изменений уровня загрязнения лесов в юго-восточном Приладожье.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по государственному заданию плановой темы НИР “Разнообразию, динамике и принципы организации растительных сообществ Европейской России” АААА-А19-119030690058-2 и темы НИР 2021–2023 гг. № 121032500047-1 “Растительность европейской части России и северной Азии: разнообразие, динамика и принципы организации”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукина Н.В., Никонов В.В., Райтио Х. 1994. Химический состав хвои сосны на Кольском полуострове. – Лесоведение. 6: 10–21.
2. Бобкова К.С., Робакидзе Е.А., Торлопова Н.В. 2020. Круговорот элементов минерального питания в экосистеме коренного разнотравно-черничного ельника средней тайги (Республика Коми). – Сибирский лесной журнал. 2: 40–54.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20200205>
3. Авессаломова И.А. 1987. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М., Изд-во Моск. ун-та. 108с.

4. Морозова Р.М., Куликова В.К. 1974. Роль атмосферных осадков в круговороте азота и зольных элементов в еловых лесах Карелии. — В сб.: Почвенные исследования в Карелии. Материалы к X Международному конгрессу почвоведов. Петрозаводск. С. 143–161.
5. Шильцова Г.В. 1996. Трансформация атмосферных осадков древостоями средней тайги. — В кн.: Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск. С. 78–91.
6. Шильцова Г.В. 2006. Роль сосновых биогеоценозов заповедника “Кивач” в формировании кислотности и состава природных вод. — Тр. Кар. научн. центра РАН. 10: 173–179.
<http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=r&id=1799>
7. Шильцова Г.В., Ласточкина В.Г. 2006. Влияние полога соснового и березового леса на химический состав осадков в заповеднике “Кивач”. — Тр. Кар. научн. центра РАН. 10: 180–184.
<http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=r&id=1798>
8. Баргальи Р. 2005. Биогеохимия наземных растений. Перевод с англ. М. 457 с.
9. Протопопов В.В. 1975. Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск, Наука. 328 с.
10. Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Пройслер Т., Кеннел М., Гитл Г., Горчарук Н. Ю. Минаева Т.Ю. 1998. Воздействие полога ельника сложного на химический состав осадков. — Лесоведение. 1: 50–59.
11. Эколого-физиологические основы продуктивности сосновых лесов Европейского Северо-Востока. 1993. Сыктывкар. 176 с.
12. Галенко Э.П. 2004. Особенности энерго- и водообмена в сосняках европейского Севера. Лесоведение. 5: 36–44.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17635571>
13. Галенко Э.П. 1973. Задержание осадков пологом хвойного леса в северотаежной подзоне Коми АССР. — Тр. Коми фил. АН СССР. 26: 133–137.
14. Галенко Э.П. 1983. Мозаичность распределения дождевых осадков под пологом хвойного леса. — Тр. Коми фил. АН СССР. 59: 4–8.
15. Тимофеев В.В., Лантратова А.С., Самодурова Н.С. 2001. Характеристика ценопопуляций *Juniperus communis* L. в составе растительного покрова Заонежья. — Растительные ресурсы. 37(4): 48–56.
16. Катаева М.Н. 2021. Содержание тяжелых металлов в эпифитных лишайниках лесных и болотных фитоценозов северной и средней тайги. — В сб.: Материалы всероссийской конференции “XI Галкинские чтения”. СПб: БИН РАН. С. 92–94.
https://www.binran.ru/files/conferences/Mire/XI_Galkinskie_Chteniya_Proceedings.pdf
17. Петрова О.В. 2001. Эпифитные лишайники, обитающие на можжевельниках в Мурманской области. — В сб: Труды Первой российской лишенологической школы. Апатиты. Петрозаводск. С. 141–153.
18. Толышева Т.Ю. 1998. Некоторые факторы, определяющие распространение эпифитных лишайников на Кольском полуострове. — Вестник Московского университета. Сер. 16. Биология. 3: 43–48.
19. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В., Тагирджанова Г.М., Гимельбрант Д.Е. 2015. Лишайники можжевельниковых сообществ мыса Шурагский (Ленинградская область). — Вестник Тверского государственного университета. Сер. биология и экология. 2: 121–126.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24123631>
20. Сорокина И.А., Степанчикова И.С., Гимельбрант Д.Е., Ликсакова Н.С., Спиринов В.А., Кушневская Е.В., Гагарина Л.В., Ефимов П.Г. 2017. Краткие очерки трех планируемых ООПТ востока Ленинградской области. — Бот. журн. 102(9): 1270–1289.
<https://doi.org/10.1134/S0006813617090071>
21. Сорокина И.А., Степанчикова И.С., Ефимов П.Г., Гимельбрант Д.Е., Спиринов В.А., Кушневская Е.В. 2013. Краткие очерки восьми предлагаемых ООПТ Ленинградской области. — Бот. журн. 98 (2): 233–254.
<http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=5263>
22. Голубкова Н.С., Соколова С.В., Титов А.Н. 1995. Материалы к изучению лишенофлоры Нижне-Свицкого заповедника. — Нов. сист. низш. раст. 30: 49–52.
https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1995_30/NSNR_1995_30_Golubkova_et_al.pdf
23. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Головки Т.К. 2016. Элементный состав биомассы некоторых видов лишайников бореальной зоны на Европейском Северо-Востоке. — Изв. Самарского НЦ РАН. 18(2): 221–225.
http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_2_221_225.pdf
24. Kubin E. 1990. A survey of element concentrations in the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* in Finland in 1985–86. — In: Acidification in Finland. Berlin, Heidelberg. P. 421–446.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-75450-0_21
25. Дьяконов В.В., Козлов В.А., Коржицкая З.А. 1996. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и серой лесных экосистем Республики Карелия. — В кн. Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск. С. 167–182.
26. Мейчик Н.Р., Любимова Е.Г., Ермаков И.П. 2010. Ионнообменные свойства клеточной стенки кустистого лишайника *Cladonia rangiferina*. — Физиология растений. 57(2): 273–279.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=13724924>
27. Моисеева Е.Н. Биохимические свойства лишайников и их практическое значение. М.-Л. 1961. 82с.

28. *Виноградова А.А., Иванова Ю.А.* 2013. Загрязнение воздушной среды в Центральной Карелии при дальнем переносе антропогенных примесей в атмосфере. — Изв. АН. Сер. геогр. 5: 98–108. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20467417>
29. *Шевченко В.П., Стародымова В.П., Кутенков С.А., Виноградова А.А., Гордеев В.В., Демина Л.Л., Иванова Ю.А., Филиппов А.С.* 2011. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ. — Современные проблемы науки и образования. 3: 42. <https://s.science-education.ru/pdf/2011/3/41.pdf>
30. *Федорец Н.Г., Солодовников А.В.* 2013. Влияние Костомукшского горнодобывающего комплекса на почвы прилегающих территорий. — Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 8(137): 51–57.
31. *Федорец Н.Г., Харин В.Н., Иешко Е.П., Дьяконов В.В., Шильцова Г.В., Козлов В.А.* 1998. Техногенное загрязнение тяжелыми металлами территории Республики Карелия. — Инженерная экология. 5: 3–18.
32. *Лазарева И.П., Кучко А.А., Кравченко А.В.* 1992. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов Северной Карелии. Петрозаводск. Кар. науч. центр РАН. Ин-т леса. 52с.
33. *Лозовик П.А., Потапова И.Ю.* 2006. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии. — Водные ресурсы. 33(1): 111–118. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9188718>
34. *Lodenius M., Kiiskinen J., Tulisalo E.* 2010. Metal levels in an epiphytic lichen as indicator of air quality in a suburb of Helsinki, Finland. — Boreal Environment Research. 15(4): 446–452. <http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber15/ber15-446.pdf>
35. *Поздняков Л.К.* 1963. Гидроклиматический режим лиственных лесов Центральной Якутии. М. 145с.
36. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Leppik E., Randlane T.* 2013. Lichens on *Picea abies* and *Pinus sylvestris* — from tree bottom to the top. — Lichenologist. 45(1): 51–63. <https://doi.org/10.1017/S0024282912000564>
37. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Randlane T.* 2012. Species richness of epiphytic lichens in coniferous forests: the effect of canopy openness. — Ann. Bot. Fenn. 49(5): 352–358. <https://doi.org/10.5735/085.049.0606>
38. *Фадеева М.А.* 2014. Лишайники. — В кн.: Сельговые ландшафты Заонежского полуострова: природные особенности, история освоения и сохранение. Петрозаводск. С. 114–121.
39. *Meier E., Paal J.* 2009. Cryptogams in Estonian alvar forests: species composition and their substrata in stands of different age and management intensity. — Ann. Bot. Fenn. 46(1): 1–20. <https://doi.org/10.5735/085.046.0101>
40. *Poikolainen J.* 1997. Sulphur and heavy metal concentrations in Scots pine bark in northern Finland and the Kola Peninsula. — Water, Air, and Soil Pollution. 93(1–4): 395–408. <https://doi.org/10.1007/BF02404769>
41. *Тарасова В.Н.* 2012. Многолетний мониторинг воздушной среды заповедника “Кивач” методом лишайноиндикации. — В сб.: Природные процессы и явления в уникальных условиях среднетаежного заповедника. Петрозаводск. С. 181–185.
42. *Бязров Л.Г.* 1971. Распределение фитомассы эпифитных лишайников в некоторых типах лесных биогеоценозов подзоны широколиственно-еловых лесов. — Лесоведение. 5: 85–89.
43. *Jüriado I., Leppik E., Lõhmus P., Randlane T., Liira J.* 2015. Epiphytic lichens on *Juniperus communis* — an unexplored component of biodiversity in threatened alvar grassland. — Nordic J. Botany. 33(2): 128–139. <https://doi.org/10.1111/njb.00650>
44. *Толышева Т.Ю.* 2004. Элементы структуры сообществ эпифитных лишайников олиготрофных болот Среднего Приобья (Западная Сибирь). — Вестник Московского университета. Сер.16. Биология. 4: 42–46.
45. *Толышева Т.Ю., Шишконокова Е.А.* 2017. Эпифитные лишайники олиготрофных болот природного парка “Нумто”. — В сб.: Современное состояние и перспектива развития сети особо охраняемых природных территорий промышленно развитых регионов. Материалы межрегиональной конференции, посвященной 20-летию природного парка “Нумто”. Нижневартовск. С. 106–108.
46. *Дейнеко И.П., Дейнеко И.В., Белов Л.П.* 2007. Исследование химического состава коры сосны. — Химия растительного сырья. 1: 19–24. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9482860>
47. *Щербенко Т.А., Копцик Г.Н., Гроненберг Б.Я., Лукина Н.В., Ливанцова С.Ю.* 2008. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения. — Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2: 9–16.
48. *Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Niemenen T.* 2008. Litterfall production and nutrient return to forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. — Boreal Environment Research. 13(suppl. B): 67–91. <http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber13/ber13-B067.pdf>
49. *Čeburnis D., Steinnes E.* 2000. Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: comparison with mosses and precipitation, role of the canopy. — Atmospheric Environment. 34: 4265–4271. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00213-2)

Assessment of Trace Elements Accumulation in Thalli of the Epiphytic Lichens in Dwarf Shrub–Green Moss Pine Forest of the Middle Taiga (South Eastern Ladoga Region)

M. N. Kataeva^a, *, A. I. Belyaeva^a

^aKomarov Botanical Institute of the RAS, St. Petersburg, Russia

*e-mail: mkmarikat@gmail.com

Abstract—The concentrations of Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Pb, and Cd in the thalli of *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw. and *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. and common juniper (*Juniperus communis* L.) has been studied. In the thalli of the studied lichen species growing on juniper in the undergrowth layer of a pine forest, as compared to the lichens on pine trunks, the content of the biogenic Fe was 1.7–2.2 times higher, and the elevated levels of non-biogenic Ni (in all studied species), Pb and Cd (in *Hypogymnia physodes*) were observed. The content of Fe, Ni, Pb and Cd is higher in the thalli of foliose lichens (*Hypogymnia physodes* and *Platismatia glauca*) than in the fruticose lichen *Bryoria fuscescens*. The revealed concentrations of heavy metals in lichens are close to the corresponding values established for the middle taiga forests of Karelia not affected by pollution. A higher content of Fe, Mn, Zn, Ni, Cu and Pb has been found in the thalli of foliose lichens, especially *H. physodes*, as compared to the substrate — the bark of phorophyte trunks.

Keywords: epiphytic lichens, *Hypogymnia physodes*, *Bryoria fuscescens*, *Platismatia glauca*, trace element concentrations, middle taiga subzone, southeastern Ladoga region

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is performed in the Laboratory of plant communities within the framework of the state research assignment of the BIN RAS AAAA-A19-119030690058-2 “Diversity, dynamics and principles of plant communities organization in the European Russia” and research theme of the BIN RAS 121032500047-1 “Vegetation of European part of Russia and northern Asia: diversity, dynamics and principles of plant communities organization”.

REFERENCES

1. Lukina N.V., Nikonov V.V., Raitio H. 1994. [Chemical composition of Scots pine needles in the Kola Peninsula]. – Russian J. Forest Science (Lesovedenie). 6: 10–21. (In Russian)
2. Bobkova K.S., Robakidze E.A., Torloпова N.V. 2020. Turnover of mineral elements in the ecosystem of native herbaceous-bilberry spruce forest in the middle taiga subzone (Komi Republic). – Siberian J. Forest Science. 2: 40–54. <https://doi.org/10.15372/SJFS20200205>
3. Avessalomova I.A. 1987. [Geochemical indicators in the study of landscapes]. Moscow. 108p.
4. Morozova R.M., Kulikova V.K. 1974. [The role of atmospheric precipitation in the cycle of nitrogen and ash elements in the spruce forests of Karelia]. – In: [Soil research in Karelia. Materials the Xth International Congress of Soil Scientists]. Petrozavodsk. P. 143–161.
5. Shiltsova G.V. 1996. [Transformation of atmospheric precipitation by stands of middle taiga]. – In: [Anthropogenic transformation of forest ecosystems of Karelia]. Petrozavodsk. P. 78–91. (In Russian)
6. Shiltsova G.V. 2006. Role of pine coenosis in the “Kivach” strict nature reserve in forming the acidity and composition of natural waters. – Proceedings of KarRC RAS. 10: 173–179. <http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=e&id=1799> (In Russian)
7. Shiltsova G.V., Lastochkina V.G. 2006. Effect of pine and birch forest canopy on the chemical composition of precipitation in the “Kivach” reserve. – Proceedings of KarRC RAS. 10: 180–184. <http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=e&id=1798> (In Russian)
8. Bargagli R. 2005. Trace elements in terrestrial plants: an ecological approach to biomonitoring and biorecovery. Transl. from Engl. Moscow. 457 p. (In Russian)
9. Protopopov V.V. 1975. [Environment-forming role of dark coniferous forest]. Novosibirsk. 328 p. (In Russian)
10. Karpachevsky L.O., Zubkova T.A., Preusler T., Kennel M., Gietl G., Gorcharuk N.Yu., Minaeva T.Yu. 1998. [Influence of Piceetum composita canopy on chemical composition of precipitation]. – Russian J. Forest Science (Lesovedenie). 1: 50–59. (In Russian)
11. [Ecological and physiological foundations of the productivity of pine forests in the European North-East]. 1993. Sykvyvkar. 176 p.

12. Galenko E.P. 2004. Characteristics of energy and mass-exchange in pine forests of the European North. – Russian J. Forest Science (Lesovedenie). 5: 36–44.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17635571> (In Russian)
13. Galenko E.P. 1973. [Precipitation retention by the forest canopy in the northern taiga of Komi ASSR]. – Trans. Komi Branch, Academy of Sciences USSR. 26: 133–137. (In Russian)
14. Galenko E.P. 1983. [Mosaic distribution of rainfall under the canopy of coniferous forest]. – Trans. Komi Branch, Academy of Sciences USSR. 59: 4–8. (In Russian)
15. Timofeev V.V., Lantratova A.S., Samodurova N.S. 2001. [Characteristics of *Juniperus communis* L. coenopopulations in plant cover of Trans-Onega territory]. – Rastitelnye resursy. 37(4): 48–56. (In Russian)
16. Kataeva M.N. 2021. The content of heavy metals in epiphytic lichens of forest and mire phytocoenoses of northern and middle taiga. – In: Proceedings of the XI Meeting in memoriam Ekaterina Alexeevna Galkina. 21 April 2021. Saint Petersburg. P. 92–94.
https://www.binran.ru/files/conferences/Mire/XI_Galkinskiye_Chteniya_Proceedings.pdf (In Russian)
17. Petrova O.V. 2001. [Epiphytic lichens of juniper species in Murmansk region]. – In: [Proceedings of the First Russian lichenological school. Apatity]. Petrozavodsk. P. 141–153. (In Russian)
18. Tolpysheva T.Yu. 1998. [Some factors determining the distribution of the epiphytic lichens in the Kola Peninsula]. – Herald of Moscow University. Series 16. Biology. 3: 43–48.
19. Stepanchikova I.S., Gagarina L.V., Tagirdzhanova G.M., Himelbrant D.E. 2015. Lichens of the juniper communities on the Shuriagsky Cape (Leningrad Region). – Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology. 2: 121–126.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24123631> (In Russian)
20. Sorokina I.A., Stepanchikova I.S., Himelbrant D.E., Liksakova N.S., Spirin V.A., Kushnevskaia E.V., Gagarina L.V., Efimov P.G. 2017. Brief overviews of three proposed protected areas in the Eastern Leningrad region. – Bot. Zhurn. 102(9): 1270–1289.
<https://doi.org/10.1134/S0006813617090071> (In Russian)
21. Sorokina I.A., Stepanchikova I.S., Efimov P.G., Himelbrant D.E., Spirin V.A., Kushnevskaia E.V. 2013. Short descriptions of eight proposed protected areas of Leningrad region. – Bot. Zhurn. 98(2): 233–254.
<http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=5263> (In Russian)
22. Golubkova N.S., Sokolova S.V., Titov A.N. 1995. Materies ad examinationem lichenoflorae reservati Svirensis inferioris. – Novitates Systematicae Plantarum non Vascularum. 30: 49–52. (In Russian)
https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1995_30/NSNR_1995_30_Golubkova_et_al.pdf
23. Tabalenkova G.N., Dalke I.V., Golovko T.K. 2016. Biomass elemental composition of some lichen species in the boreal zone of European North-East. – Izvestia of Samara Scientific Center RAS. 18(2): 221–225. (In Russian)
http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_2_221_225.pdf
24. Kubin E. 1990. A survey of element concentrations in the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* in Finland in 1985–86. – In: Acidification in Finland. Berlin, Heidelberg. P. 421–446.
25. Diakonov V.V., Kozlov V.A., Korzhitskaya Z.A. 1996. [Assessment of heavy metals and Sulphur contamination of forest ecosystems of the Republic of Karelia]. – In: [Anthropogenic transformation of forest ecosystems in Karelia]. Petrozavodsk. P. 167–182. (In Russian)
26. Meychik N.R., Lyubimova E.G., Yermakov I.P. 2010. Ion-exchange properties of cell wall of reindeer lichen *Cladonia rangiferina*. – Russ. J. Plant Physiol. 57(2): 260–266.
<https://doi.org/10.1134/S1021443710020147>
27. Moiseeva E.N. 1961. [Biochemical properties of lichens and their practical significance]. Moscow-Leningrad. 82p. (In Russian)
28. Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A. 2013. Pollution of central Karelia environment under long-range atmospheric transport of anthropogenic pollutants. – Izvestia Akademii Nauk. Ser. Geogr. 5: 98–108.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20467417> (In Russian)
29. Shevchenko V.P., Starodymova V.P., Kutenkov S.A., Vinogradova A.A., Gordeev V.V., Demina L.L., Ivanova Yu.A., Philippov A.S. 2011. Contents of heavy metals in fruticose epiphytic lichens of Karelia as indicator of atmospheric transport of pollutants. – Modern problems of science and education. 3: 42.
<https://s.science-education.ru/pdf/2011/3/41.pdf> (In Russian)
30. Fedorets N.G., Solodovnikov A.N. 2013. [Effect of Kostomuksha ore mining and processing plant on soils of the adjacent territories]. – Proceedings of Petrozavodsk State University. 8(137): 51–57.
31. Fedorets N.G., Kharin V.N., Ieshko E.P., Diakonov V.V., Shilzova G.V., Kozlov V.A. 1998. [Technogenic pollution with heavy metals in the Republic of Karelia]. – Engineering Ecology. 5: 3–18.
32. Lazareva I.P., Kuchko A.A., Kravchenko A.V. 1992. [Effect of airborne industrial pollution on the state of pine forests in North Karelia]. Petrozavodsk. 52 p.
33. Lozovik P.A., Potapova I.Yu. 2006. Input of chemical substances with atmospheric precipitation onto the territory of Karelia. – Water Resources. 33(1): 104–111.
<https://doi.org/10.1134/S009780780601012X>

34. *Lodenius M., Kiiskinen J., Tulisalo E.* 2010. Metal levels in an epiphytic lichen as indicator of air quality in a suburb of Helsinki, Finland. – *Boreal Environment Research*. 15(4): 446–452.
<http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber15/ber15-446.pdf>
35. *Pozdnyakov L.K.* 1963. [Hydroclimatic regime of larch forests in Central Yakutia]. Moscow. 145 p. (In Russian)
36. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Leppik E., Randlane T.* 2013. Lichens on *Picea abies* and *Pinus sylvestris* – from tree bottom to the top. – *Lichenologist*. 45(1): 51–63.
<https://doi.org/10.1017/S0024282912000564>
37. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Randlane T.* 2012. Species richness of epiphytic lichens in coniferous forests: the effect of canopy openness. – *Ann. Bot. Fenn.* 49(5): 352–358.
<https://doi.org/10.5735/085.049.0606>
38. *Fadeeva M.A.* 2013. Lichens. – In: [Selka landscapes of the Zaonezhskii Peninsula. Natural characteristics, land use, conservation]. Petrozavodsk. P. 114–121.
39. *Meier E., Paal J.* 2009. Cryptogams in Estonian alvar forests: species composition and their substrata in stands of different age and management intensity. – *Ann. Bot. Fenn.* 46(1): 1–20.
<https://doi.org/10.5735/085.046.0101>
40. *Poikolainen J.* 1997. Sulphur and heavy metal concentrations in Scots pine bark in northern Finland and the Kola Peninsula. – *Water, Air, and Soil Pollution*. 93(1-4): 395–408.
<https://doi.org/10.1007/BF02404769>
41. *Tarasova V.N.* 2012. [Long-term monitoring of the air environment of the “Kivach” reserve by the lichen indication method]. – In: [Natural processes and phenomena in the unique conditions of the middle taiga reserve]. Petrozavodsk. P. 181–185. (In Russian)
42. *Byazrov L.G.* 1971. [Distribution of the phytomass of epiphytic lichens in certain types of biogeocoenoses in the broad-leaved-spruce forests subzone]. – *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*. 5: 85–89. (In Russian)
43. *Jüriado I., Leppik E., Lõhmus P., Randlane T., Liira J.* 2015. Epiphytic lichens on *Juniperus communis* – an unexplored component of biodiversity in threatened alvar grassland. – *Nordic J. Botany*. 33(2): 128–139.
<https://doi.org/10.1111/njb.00650>
44. *Tolpysheva T.Yu.* 2004. [Elements of the structure of corticolous lichen association in the oligotroph phytocoenoses of the middle Priobye (Western Siberia)]. – *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser 16. Biology*. 4: 42–46.
45. *Tolpysheva T.Yu., Shishkonakova E.A.* 2017. [Epiphytic lichens of oligotrophic mires of “Numto” Natural Park]. – In: [The current state and prospects for the development of a network of specially protected natural areas in industrialized regions. Materials of the interregional conference dedicated to the 20th anniversary of the natural park “Numto”]. Nizhnevartovsk. P. 106–108. (In Russian)
46. *Deineko I.P., Deineko I.V., Belov L.P.* 2007. [Study of chemical composition of pine bark]. – *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 1: 19–24.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9482860> (In Russian)
47. *Shcherbenko T.A., Koptsik G.N., Groenenberg B.-J., Lukina N.V., Livantsova S.Yu.* 2008 Uptake of nutrients and heavy metals by pine trees under atmospheric pollution. – *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* 63(2): 51–59.
<https://doi.org/10.3103/S0147687408020026>
48. *Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Niemenen T.* 2008. Litterfall production and nutrient return to forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. – *Boreal Environment Research*. 13(suppl. B): 67–91.
<http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber13/ber13-B067.pdf>
49. *Čeburnis D., Steinnes E.* 2000. Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: comparison with mosses and precipitation, role of the canopy. *Atmospheric Environment*. 34: 4265–4271.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00213-2)

**КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ**

**СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОРНЯХ
SAPOSHNIKOVIA DIVARICATA (APIACEAE) В ЗАБАЙКАЛЬСКОМ КРАЕ**

© 2022 г. В. П. Макаров¹*, М. А. Солодухина¹, О. Ф. Малых¹, Н. Ю. Михеева¹,
Е. А. Банщикова¹, В. С. Ларин¹, В. В. Бронников¹, Т. В. Желибо¹

¹Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия

*e-mail: vm2853@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.

После доработки 18.10.2021 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В статье представлены результаты исследования накопления химических элементов в корнях сапожниковии растопыренной (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk), произрастающей в северных степных районах Забайкальского края. Вид широко используется в китайской медицине для лечения ревматизма и аллергического ринита, иммунной и нервной систем, респираторных заболеваний. Биологически активные соединения растения проявляют значительную противовоспалительную, анальгезирующую, антиоксидантную, антипролиферативную, противоопухолевую и иммунорегуляторную активность. Содержание химических элементов в корнях *S. divaricata* в порядке убывания составляет следующий ряд: K > Ca > Mg > Fe > P > Na > Ti > Ba > Sr > Zn > Mn > B > Cu > Cr > Rb > Ni > V > Mo > Ce > Zr > La > Pb > Li > As > Co > Cd > Bi > Be > Sb > Se > Hg > Tl. Накопление Ti, Cr, La, Ce, Li, Fe, Ba, As, Sr, Bi, Mo, Zr, Ni, V превышает среднее содержание этих элементов в наземных растениях. Концентрация As в корнях *S. divaricata* превышает предельно допустимое содержание в лекарственном сырье и лекарственных растительных препаратах в 1.8 раза. Концентрация ряда химических элементов в корнях сапожниковии коррелирует с их содержанием в почве.

Ключевые слова: *Saposhnikovia divaricata*, химические элементы, Забайкальский край

DOI: 10.31857/S0033994622040082

На территории Забайкальского края произрастает множество лекарственных растений, которые используются для профилактики и лечения ряда заболеваний. Одним из таких растений является сапожниковия растопыренная (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk.) – представитель семейства Зонтичные (Umbelliferae), или Сельдереиные (Apiaceae).

Вид произрастает на территории Монголии, в северной и северо-восточной частях Китая и на Корейском полуострове. Ареал сапожниковии растопыренной в России находится в южной части Восточной Сибири и юго-западной части Дальнего Востока. Он охватывает такие регионы, как Республика Бурятия, Амурская область, Забайкальский, Хабаровский и Приморский края.

Сапожниковия встречается в луговых каменистых степях на склонах и шлейфах сопок, на террасах, в зарослях степных кустарников, на опушках лесостепных лесов, иногда на залежах. По отношению к увлажнению почвы, этот вид относят к ксерофитам. Растение культивируется в Китае в провинциях Аньхой, Шаньси и Ганьсу [1]. В Китае высушенные корни этого растения традици-

онно используют для лечения ревматизма и аллергического ринита, иммунной и нервной системы, респираторных заболеваний. Действующие вещества растения проявляют значительную противовоспалительную, анальгезирующую, антиоксидантную, антипролиферативную, противоопухолевую и иммунорегуляторную активность [2–9].

В Бурятии в корнях сапожниковии выявили наличие хромонов, кумаринов, эфирных масел, флавоноидов, дубильных веществ, жирных кислот, полиацетиленовых соединений, витамина E, полисахаридов. Показано, что сапожниковия растопыренная является ценным источником хромонов – цимифугина, гамаудола и их гликозидов. Основными действующими веществами считаются хромоны (prim-O-глюкозилцимифугин и 4'-O-β-D-глюкозил-5-O-метилвиссаминол), в связи с этим в фармакопее КНР стандартизацию лекарственного растительного сырья из корней сапожниковии ведут по содержанию именно этих веществ (суммарное количество не менее 0.24% [10, 11]). Установлено, что суммарное содержание хромонов варьирует в зависимости от места сбора и фазы вегетации растений [12].

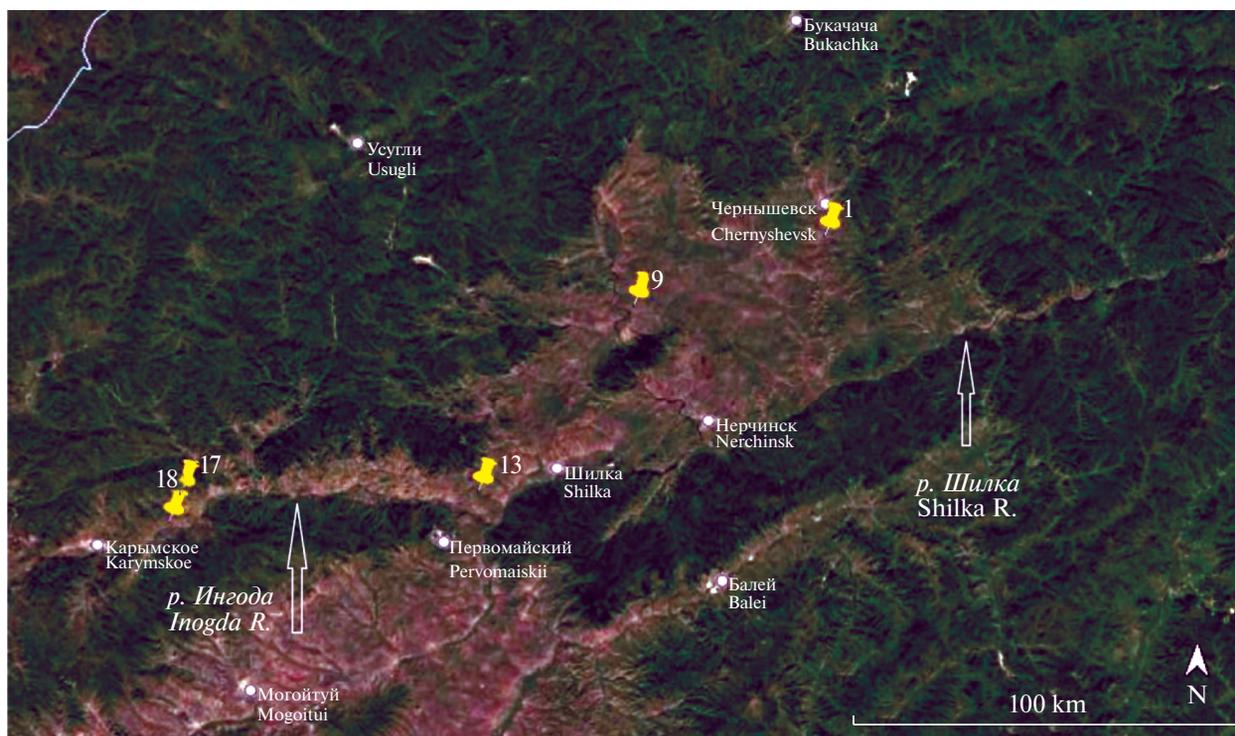


Рис. 1. Расположение пробных площадей в районе исследований.
Fig. 1. Location of the sample plots in the research area.

Важными составляющими химического состава лекарственных растений, кроме биологически активных веществ, являются микроэлементы. Как избыток, так и недостаток жизненно необходимых элементов влияет на состояние организма человека и животных. Современная классификация микроэлементов по их значимости для живых организмов имеет следующий вид: 1) жизненно необходимые – Fe, Mn, I, Cu, Zn, Co, Cr, Mo, Se; 2) условно необходимые – Li, B, Ni, V, Si, F, Br, Ti; 3) токсичные – Be, Al, Cd, Pb, Hg, Ba, Tl, Bi и др. [13].

Установлена тесная взаимосвязь между содержанием в почве отдельных микроэлементов и продуцированием растениями отдельных групп биологически активных веществ. Например, растения, продуцирующие сердечные гликозиды, избирательно поглощают Mn, Mo, Cr, а растения, продуцирующие алкалоиды – Cu, Mn, Co и т.д. [14–17].

В Забайкальском крае в настоящее время ведется незаконная массовая заготовка растения для продажи в Китай [18]. Существует реальная опасность сокращения генетического разнообразия популяций. Одним из способов сохранения вида может быть его культивирование. При этом важно оценить качество заготавливаемого сырья, его элементный состав и концентрацию токсичных элементов в растении в различных условиях местообитания и в культуре.

Цель исследований – выяснить особенности накопления химических элементов в корнях сапожниковии растопыренной (*S. divaricata* (Turcz.) Schischkin) в северных лесостепных районах Забайкальского края.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробные площади располагались на пологих склонах различной экспозиции, занятых степными разнотравно-злаковыми сообществами и старыми залежами в бассейнах рек Ингода и Шилка (рис. 1).

Почвы территории исследований преимущественно суглинистые со слабокислой реакцией солевой вытяжки. Степень обеспеченности почвы общим азотом и подвижным фосфором низкая. Напротив, обеспеченность почвы подвижным калием высокая и очень высокая (табл. 1).

Исследования проводили в августе 2020 г. на 5-ти пробных площадях (ПП) в Чернышевском, Нерчинском и Шилкинском административных районах Забайкальского края. В местах проведения исследований отбирали образцы почвы и подземных органов сапожниковии растопыренной для химического анализа. Было отобрано не менее пяти образцов на каждой пробной площади, которые затем смешивали в среднюю пробу. Химический анализ почвы проведен в ФГБУ государственной станции агрохимической службы

Таблица 1. Характеристика мест произрастания растений *S. divaricate*
Table 1. Characteristics of the growth locations of *S. divaricata*

Параметры Parameters		Номер пробной площади Sample plot number				
		1	9	13	17	18
Географические координаты Geographic coordinates		N 52.440° E 117.038°	N 52.261° E 116.327°	N 51.789° E 115.766°	N 51.732° E 114.716°	N 51.688° E 114.630°
Экспозиция, крутизна склона Slope exposure, degree		Южный, пологий Southern, gentle	Западный, пологий West, gentle	Северный, пологий Northern, gentle	Юго-восточный, пологий South-eastern, gentle	Восточный, пологий Eastern, gentle
Растительное сообщество Plant community		Степь разнотравно-злаковая Mixed herbs steppe	Степь разнотравно-злаковая Mixed herbs steppe	Степь разнотравно-злаковая Mixed herbs steppe	Степь злаково-разнотравная Mixed herbs steppe	Степь разнотравная Grassland
Особенности гранулометрического состава почвы Features of the granulometric composition of soil		Песчаная Sandy	Суглинок средний Medium loam	Суглинок средний Medium loam	Суглинок средний Medium loam	Суглинок средний Medium loam
рН солевой вытяжки pH of salt extract		6.4 ± 0.1	6.4 ± 0.1	6.0 ± 0.1	5.6 ± 0.1	6.4 ± 0.1
Содержание в почве, мг/кг Soil content, mg/kg	Азот Nitrogen	0.019	0.023	0.023	0.019	0.019
	Фосфор phosphorus	25.3 ± 8.9	48.7 ± 9.7	41.0 ± 5.6	57.1 ± 11.4	38.2 ± 7.6
	Калий Potassium	116.2 ± 17.4	195 ± 29.3	232.0 ± 30.5	95.4 ± 14.3	356.0 ± 53.4

“Костромская” принятыми в агротехнической службе методами. Концентрации элементов в растительных образцах определены в Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-9898 Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом ИСП-МС). Всего в корнях сапожниковии исследовано содержание 32 химических элементов: К, Са, Mg, Fe, P, Na, Ti, Ba, Sr, Zn, Mn, В, Cu, Cr, Rb, Ni, V, Mo, Се, Zr, La, Pb, Li, As, Co, Cd, Bi, Be, Sb, Se, Hg, Tl.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среднее содержание элементов в корнях сапожниковии может быть представлено в виде следующего ряда: К > Са > Mg > Fe > P > Na > Ti > Ba > Sr > Zn > Mn > В > Cu > Cr > Rb > Ni > V > Mo > Се > Zr > La > Pb > Li > As > Co > Cd > Bi > Be > Sb > Se > Hg > Tl (табл. 2).

Жизненно необходимые элементы

Макроэлементы

Содержание макроэлементов в корнях сапожниковии по убыванию образует следующий ряд: К > Са > Mg > Fe > P > Na.

Калий

Генеральное среднее содержания К в почве – 1.25%, на территории нашей страны – 1.36%. Калий относится к относительно подвижным элементам значительного биологического накопления. Это один из наиболее важных, необходимых элементов в организме растений [20]. Калий отличается высокой биофильностью (0.012). По величине кларка в живом веществе (0.3%), калий входит в триаду наиболее важных элементов (N, P, K). Кларк К в наземных растениях 140 г/т сухого вещества. Максимальное содержание К в золе растений семейства зонтичных очень высокое – 28.4%.

Степень обеспеченности подвижным К почв в местах произрастания сапожниковии высокая и очень высокая (95–356 мг/кг) (табл. 1). Среднее накопление элемента в корнях сапожниковии составляет 11900 ± 1500 мг/кг или 0.9–1.7% (табл. 2). Эта величина близка к кларку в наземных растениях. Коэффициент вариации – 28%. Наибольшей концентрацией К отличается ценопопуляция на ПП 9. Калий отнесен к элементам энергичного поглощения [21], средний коэффициент биологического поглощения К сапожниковией – 62.3 (26.1–109.7), наиболее высоким он является на ПП 17.

Таблица 2. Концентрация химических элементов в корнях *S. divaricata*, мг/кг (воздушно-сухое вещество)
Table 2. Concentration of chemical elements in the roots of *S. divaricata*, mg/kg (air dry matter)

Элементы Elements	Номер пробной площади Sample plot number					$X \pm m$	Кларк в наземных растениях, мг/кг [19] Clarke in land plants, mg/kg [19]	Отношение к кларку, % Relationship to clarke, %	Min–max	CV, %
	1	9	13	17	18					
K	9018	16650	13938	10463	9290	11900 ± 1500	14000	85	9000–17000	28
Ca	4526	4691	4269	4310	4744	4500 ± 100	18000	25	4300–4700	5
Mg	2165	1615	1355	1738	1418	1700 ± 100	3200	53	1400–2200	19
Fe	1595	1651	421	1204	752	1000 ± 200	140	786	400–1700	47
P	1381	583	599	1398	474	900 ± 200	2300	39	500–1400	52
Na	1318	1180	306	999	275	800 ± 200	1200	67	300–1300	60
Ti	141	146	34	104	51	90 ± 20	1.0	9500	30–150	54
Ba	98	95	56	62	106	80 ± 10	14	600	60–110	27
Sr	85	92	68	79	66	80 ± 5	26	300	70–90	14
Zn	43	45	52	37	46	45 ± 2	100	45	37–52	12
Mn	56	45	25	39	31	40 ± 6	630	6	25–56	31
B	20	19	20	20	18	19.4 ± 0.4	50	38	18.1–20.3	5
Cu	11	16	16	13	13	14 ± 1	14	100	12–16	14
Cr	32	18	3.38	9.33	6.49	14 ± 5	0.23	6087	3–32	82
Rb	11.8	16.3	6.9	11.2	4.4	10 ± 2	20	50	4–16	46
Ni	12.3	8.5	2.4	5.1	3.2	6 ± 2	3	200	2–12	65
V	3.53	3.81	0.9	2.71	1.69	2.5 ± 0.5	1.6	188	0.9–3.8	49
Mo	2.56	2.81	1.59	4.14	0.58	2.3 ± 0.6	0.9	222	0.6–4.0	57
Ce	3.26	3.41	0.69	2.97	1.2	2.3 ± 0.6	0.2	1000	0.7–3.4	55
Zr	1.97	2.59	0.33	1.63	1.61	1.6 ± 0.4	0.64	313	0.3–2.6	51
La	2.04	1.99	0.43	2.15	0.62	1.5 ± 0.4	0.085	2353	0.4–2.2	59
Pb	1.24	1.11	0.42	2.12	0.61	1.1 ± 0.3	2.7	37	0.4–2.1	60
Li	1.28	1.13	0.48	1.39	0.78	1.0 ± 0.2	0.1	1000	0.5–1.4	37
As	0.66	1.73	0.47	1.02	0.61	0.9 ± 0.2	0.2	450	0.5–1.7	57
Co	0.77	0.81	0.24	0.51	0.31	0.53 ± 0.12	0.5	100	0.24–0.81	49
Cd	0.04	0.19	0.1	0.16	0.09	0.12 ± 0.03	0.6	17	0.04–0.19	51
Bi	0.001	0.001	0.03	0.18	0.33	0.18 ± 0.06	0.06	333	0.00–0.33	133
Be	0.11	0.11	0.02	0.11	0.04	0.08 ± 0.02	0.1	80	0.02–0.11	57
Sb	0.06	0.06	0.05	0.07	0.03	0.05 ± 0.01	0.06	83	0.03–0.07	28
Se	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.024 ± 0.005	0.2	12	0.01–0.04	48
Hg	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.009 ± 0.001	0.015	60	0.005–0.01	25
Tl	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.005 ± 0.002	0.01–0.1	50–2	0.001–0.01	107

Кальций

Кларк Ca в почвах – 1.37%. Кальций является главным элементом биосферы, в том числе живого вещества, его биофильность составляет 0.2, биогенность – 0.53. Кларк Ca в золе растений – 3% [20].

Среднее содержание Ca в корнях сапожниковии составляет 4500 ± 100 мг/кг (табл. 2). Эта величина меньше кларка в наземных растениях в 4 раза (18000 мг/кг). Изменчивость концентрации

в ценопопуляциях низкая CV = 5%. Коэффициент биологического поглощения Ca сапожниковией равен 1.4.

Магний

Кларк Mg в почвах – 0.63%. Показатель биогенности Mg имеет среднюю величину (0.28). В растениях кларк Mg составляет 3200 мг/кг [20].

Средняя концентрация Mg в корнях сапожниковии – 1700 ± 100 мг/кг (табл. 2). Эта величина меньше кларка в наземных растениях в 2 раза. Уровень изменчивости содержания этого элемента в корнях исследованного вида средний ($CV = 19\%$).

Железо

Железо имеет высокую почвопрофильность (0.08–1), но его содержание не нормируется, хотя избыток, как и недостаток, является неблагоприятным для растений. Кларк Fe в почвах составляет 3.8%, кларк в биосфере – 2.2%. Железо имеет низкую фитотильность (0.005). Нормативов на содержание в растениях нет. Кларк Fe в наземных растениях составляет 140 мг/кг, его содержание существенно зависит от климатических условий, в первую очередь от количества осадков: оно обратно пропорционально их количеству [22].

Концентрации Fe в травянистых растениях Бурятии находились в пределах 59–1140 мг/кг [23]. Валовое содержание Fe в почвах района исследований равно 5000 мг/кг. Средняя концентрация Fe в корнях сапожниковии – 1000 ± 200 мг/кг при варьировании от 400 до 1700 мг/кг (табл. 2). Эта величина больше кларка в наземных растениях в 8 раз. Уровень изменчивости накопления элемента в растениях высокий ($CV = 47\%$).

Фосфор

Генеральное среднее содержание P в почвах составляет 0.08%. Нормальным для интенсивного земледелия считается содержание подвижного P_2O_5 300 мг/кг почвы. Для территории СНГ средневзвешенное содержание составляет всего 78 мг/кг [24]. Степень обеспеченности подвижным фосфором почв района исследований преимущественно низкая – 25–57 мг/кг (табл. 1). Фосфор – главный биофильный и биогенный элемент. Его средняя биогенность составляет 2.6. При недостатке P возникает фосфорное голодание растений – замедление роста, увядание листьев и снижение плодоношения. Среднее содержание P в наземных растениях – 0.12%. Соотношение Ca : P в организме обычно близко к 2 : 1. Избыток P нарушает всасывание Mg и Fe [23].

Концентрация P в корнях сапожниковии находится в пределах 500–1400 мг/кг (табл. 2). Эта величина меньше кларка в наземных растениях в 2.6 раза (2300 мг/кг). Изменчивость накопления элемента очень высокая ($CV = 52\%$). Средний коэффициент биологического поглощения P равен 22.7 и варьирует на пробных площадях от 12 до 55.

Натрий

Натрий относится к подвижным катионам биосферы значительного биологического накоп-

ления и повышенной биогенности (0.54). Среднее генеральное содержание Na в почвах составляет 0.62%. Na – биологически незаменимый элемент. В наземных растениях его среднее содержание равно 40 мг/кг [20].

Валовое содержание Na в почвах района исследований находится в пределах 81–110 мг/кг. В корнях сапожниковии среднее накопление Na равно 800 ± 200 мг/кг при варьировании от 300 до 1300 мг/кг (табл. 2). Эта величина меньше кларка в наземных растениях в 1.5 раза (1200 мг/кг). Коэффициент вариации концентрации элемента в зависимости от места произрастания является очень высоким ($CV = 60\%$).

Микроэлементы

В корнях растений сапожниковии растопыренной исследовано накопление 8 жизненно необходимых микроэлементов. Их концентрации образуют по убыванию следующую последовательность: Zn > Mn > B > Cu > Cr > Mo > Co > Se.

Цинк

Цинк в почвах широко распространен и легко подвижен. ПДК для растворимых форм составляет 23 мг/кг. Генеральное среднее Zn для почв мира по последним данным составляет 56 ± 5 г/т, по А.П. Виноградову 50 г/т. В растениях Zn участвует в окислительно-восстановительных процессах, влияет на фотосинтез, регулирует синтез крахмала, влияет на плодоношение и рост семян. Содержание Zn в растениях при фоновом его количестве в почве непостоянно – от 1.2 до 73 мг/кг сухой массы. Цинк отличается средней биофильностью, показатель фитонакопления высокий (в среднем 0.33) [22].

Концентрация Zn в лекарственных растениях Бурятии находилась в пределах 5.2–62.0 мг/кг [23]. В корнях сапожниковии концентрация Zn составляет 45.0 ± 2.4 мг/кг при варьировании от 37 до 52 мг/кг на отдельных ПП (табл. 2). Эта величина меньше кларка в наземных растениях в 2.2 раза (100 мг/кг). Степень варьирования концентрации элемента на изученных пробных площадях низкая ($CV = 12\%$). Средний коэффициент биологического поглощения Zn растением равен 178.4.

Марганец

Генеральное среднее содержание Mn в почвах оценивается в 850 мг/кг. Содержание Mn в разных видах растений изменяется в широких пределах: от 30 до 500 мг/кг [22]. Концентрация Mn в травянистых растениях Бурятии находилась в пределах 11–420 мг/кг [23]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Mn составляет 40 ± 6 мг/кг (25–56 мг/кг). Эта величина меньше кларка в на-

земных растениях в 16 раз (табл. 2). Средний коэффициент биологического поглощения элемента сапожниковией равен 13.1. Варьирование концентрации Mn в корнях сапожниковии по разным ПП высокое – 31.3%.

Медь

В почвах медь является относительно мало-подвижным элементом. Кларк в почве составляет 24 ± 3 мг/кг сухой массы. Содержание в почве 6–15 мг/кг считается недостаточным, 15–60 – нормальным и более 60 мг/кг – избыточным. Биофильность Cu средняя (4×10^{-2}), как и био-генность (0.43). Чаще всего в растениях Cu содержится в концентрации около 20 мг/кг сухой массы [22], эта величина принимается за порог, выше которого наступает избыток. Однако многие растения аккумулируют гораздо больше меди, особенно в корнях. Кларковые показатели среднего содержания Cu по многим странам в растениях 1–33 мг/кг сухой массы. Кларк Cu для наземных растений 14 мг/кг сухого вещества (табл. 2).

Концентрация Cu в лекарственных растениях Бурятии находилась в пределах 1.4–23.1 мг/кг [23]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Cu составляет 14 ± 1 мг/кг (12–16 мг/кг). Эта величина соответствует кларку наземных растений (табл. 2). Средний коэффициент биологического поглощения элемента сапожниковией равен 69.5. Коэффициент вариации имеет среднюю величину ($CV = 14\%$).

Хром

По современным данным кларк Cr в почвах 70–90 г/т. Кларк Cr для наземных растений составляет 0.23 мг/кг сухого вещества. Биологическое значение Cr изучено недостаточно. Считается, что Cr стимулирует рост сельскохозяйственных растений, но его избыток вызывает у них различные заболевания [22].

Концентрация Cr в лекарственных растениях Бурятии находилась в пределах 0.74–19.2 мг/кг [23]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Cr составляет 14 ± 5 мг/кг (3–32 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 60 раз (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 82\%$). Средний коэффициент биологического поглощения элемента сапожниковией равен 27.8.

Молибден

Кларк Mo для почв мира равен 2 мг/кг [19]. По показателям поглощения растениями Mo относится к группе среднего накопления и сильного захвата. Критический недостаток Mo в растениях от 0.01 до 6 мг/кг сухой массы. Кларк молибдена

для наземных растений равен 0.9 г/т. Содержание Mo в сельскохозяйственных культурах в пределах 0.01–0.29 мг/кг сухого вещества является недостаточной. Токсичность для злаковых культур > 16 мг/кг. В норме концентрация элемента в растениях должна находиться в пределах 0.20–20.0 мг/кг [25].

Концентрация Mo в лекарственных растениях Бурятии находилась в пределах 0.21–7.0 мг/кг [23]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Mo составляет 2.3 ± 0.6 мг/кг (0.6–4.0 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 2.5 раза. Коэффициент вариации концентраций очень высокий ($CV = 57\%$).

Кобальт

Кларк Co в почвах 10 мг/кг [19]. Содержание Co в почвах имеет важное значение и нормируется: ПДК подвижной его формы составляет 5 мг/кг. Недостаточным считается количество $Co < 5$ мг/кг. Кобальт необходим для растений. Он определяет метилирование и фиксацию азота, влияет на рост, однако в высоких количествах (> 30 г/т) вызывает омертвление листьев, уродливость и бесплодность. Кларк Co в наземных растениях составляет 0.5 мг/кг сухого вещества. Среднее содержание кобальта в сельскохозяйственных растениях 0.01–0.31 мг/кг живой массы [22].

Содержание Co в травянистых растениях Бурятии, в дельте реки Селенги, варьировало от 0.02 до 0.53 мг/кг [26]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Co составляет 0.53 ± 0.12 мг/кг (0.24–0.81 мг/кг). Эта величина близка к кларку в наземных растениях (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 49\%$).

Селен

Кларк Se в почвах бывшего СССР 0.01 мг/кг, для США – 0.4 ± 0.1 . Иногда в почве содержание Se увеличивается до 1–4 г/т и более. Низкие содержания (менее 0.5 мкг/л) также весьма нежелательны.

Среднее содержание Se в травянистых растениях варьирует от 2 до 174 мкг/кг. Содержание Se в пастбищных растениях обычно составляет в среднем 0.2, редко 4–10 и выше г/т. Растения, отобранные из селеноносной провинции Тувы, содержали селен в количестве 0.5–12 г/т сухого вещества. Устойчивые высокие концентрации этого элемента, кроме астрагалов и других бобовых (до 1000 мг/кг), установлены в бурчаке ленском (*Alyssum lenense* Adams) [27].

В корнях сапожниковии средняя концентрация Se составляла 0.024 ± 0.005 мг/кг (0.01–0.04 мг/кг). Эта величина близка к кларку в наземных растениях (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 48\%$).

Бор

Генеральное среднее содержание В в почвах России 36 ± 5 г/т, по миру 33 ± 5 г/т. Кларк В в растительности суши составляет 10 мг/кг, кларк В в наземных растениях — 50 мг/кг (табл. 2). Растения значительно различаются по концентрации В в зависимости от вида и характера почв. В целом для двудольных растений его требуется больше, чем для однодольных. Приняты следующие критические уровни содержания В в растениях: недостаток $< 5-30$, избыток $> 50-200$ мг/кг [24].

Содержание В в лекарственных растениях различных фитоценозов Забайкалья изменялось от 2.1 до 70.0 мг/кг [28]. В корнях сапожниковии средняя концентрация В составляет 19.4 ± 0.4 мг/кг (18–20 мг/кг). Эта величина меньше кларка наземных растений в 2.6 раза (табл. 2). Коэффициент вариации концентрации В низкий ($CV = 5\%$).

Условно жизненно необходимые элементы

К условно необходимым микроэлементам относятся те из них, необходимость которых для жизнедеятельности организмов с достаточной уверенностью еще не установлена, но, в то же время, они оказывают существенное биологическое действие на различные процессы метаболизма. В исследованных растениях концентрации этих элементов образуют ряд: $Ti > Ni > V > Li$.

Титан

Содержание Ti в почвах относительно высокое — в среднем 0.35%, разброс значений в поверхностном слое — от 0.1 до 9%. В почвенных растворах его концентрация составляет 0.03 мг/л. Кларк Ti в наземных растениях — 1 мг/кг. Кларк в биосфере очень высокий — 0.26 [22].

Сведений о биохимическом значении Ti для жизни растений очень мало. Содержание титана в золе листьев степных растений Урала составило от 242 до 935 г/т. Показатель биогенности Ti довольно высокий — 0.06%. Содержание Ti в лекарственных растениях различных фитоценозов Бурятии изменялось в пределах 8.6–73 мг/кг [28].

В корнях сапожниковии накапливается 90 ± 20 мг/кг элемента (от 30 до 150 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 95 раз. Варьирование накопления Ti в зависимости от места произрастания значительное и составляет 53.8% (табл. 2).

Никель

Среднее содержание Ni в почвах мира — 20 мг/кг [29]. Кларк в наземных растениях — 3.0 мг/кг. На рост растений Ni в обычных концентрациях оказывает благотворное действие. Генеральное сред-

нее для трав составило 0.95 ± 0.20 при колебаниях от 0.1 до 1.7 мг/кг сухой массы.

В травах Бурятии накопление Ni составляет 0.2–5.1 мг/кг [30]. Содержание Ni в лекарственных растениях фитоценозов Бурятии варьировало в пределах 0.14–8.85 мг/кг [28]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Ni составляет 6 ± 2 мг/кг (2–12 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 2 раза. Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 65\%$).

Ванадий

Среднее содержание V в почвах мира — 100 мг/кг [19]. Величина кларка в наземных растениях — 1.6 мг/кг. Биологическое значение ванадия изучено слабо, некоторыми исследователями он относится к жизненно важным элементам. Он участвует в обмене веществ высших растений, в фиксации азота, метаболизме железа. Поведение V сходно с таковым молибдена, он участвует в процессе фотосинтеза, незаменим для водорослей и может заменять молибден. Токсичность V для растений проявлялась при его концентрации в почве около 140 мг/кг. У некоторых видов растений хлороз может наступить при содержании V 2 мг/кг сухой массы, у других при концентрациях 14–880 мг/кг ванадий не вызывал критических изменений, но приводил к замедлению роста. Содержание V в пищевых и кормовых растениях варьирует в широких пределах — 7–2700 мкг/кг сухой массы [22].

В травянистых растениях Бурятии концентрация V находилась в пределах 0.4–1.7 мг/кг [30]. В травах Прибайкалья накопление элемента составляло 1.2–3.7 мг/кг. Один и тот же вид растений в различных экологических условиях накапливал разные количества элемента [31]. В корнях сапожниковии средняя концентрация V составляет 3 ± 1 мг/кг (1–4 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 1.6 раза (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 49\%$).

Литий

Кларк Li в почвах составляет 30 мг/кг [19]. Величина кларка в наземных растениях — 0.1 мг/кг. Токсичным для растений считается содержание хлорида 1.2–4.0, сульфата — 0.2–0.5 г/л. Нормальной считается концентрация в листьях растений, составляющая 3 мг/кг, избыточной — 5–50 мг/кг. В растениях суши среднее содержание Li составляет 0.1 мг/кг. Растения поглощают литий в различной степени. Высокая концентрация элемента (0.8 мг/кг) установлена для семейства Пасленовые. Больше всего Li в растениях, произрастающих на солончаках и других почвах повышенной солености. В растительных пищевых продуктах литий содержится в количестве 0.2–6.6 мг/кг [20].

Содержание Li в лекарственных растениях Бурятии изменялось в пределах 1.3–22.2 мг/кг сухого вещества [28]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Li составляет 1.0 ± 0.2 мг/кг (0.5–1.4 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 10 раз (табл. 2). Коэффициент вариации высокий ($CV = 37\%$).

Токсичные микроэлементы

К токсичным микроэлементам относят те элементы, биологическое значение которых достоверно не установлено, а повышенные концентрации оказывают негативное действие. ПДК Pb в растительном сырье не должно превышать 6.0, Cd – 1.0, Hg – 0.1, As – 0.5 мг/кг (ОФС.1.5.3.0009.15). В корнях сапожниковии растопыренной концентрации токсичных элементов образуют следующий ряд: Ba > Sr > Pb > As > Cd > Bi > Be > Sb > Hg > Tl.

Барий

Кларк бария в почве по современным оценкам составляет 554 ± 25 г/т. В почвах России содержание Ba колеблется в широких пределах (84–560 мг/кг). Элемент имеет очень высокий показатель биогенности (1.5). Кларк в наземных растениях – 14 мг/кг. Сведений о токсичности Ba для растений нет, хотя он присутствует в них в значительных количествах. В тоже время для человека соединения Ba очень токсичны. В наземных растениях концентрация Ba равна 14 мг/кг сухого вещества.

В лекарственных растениях Бурятии содержание Ba варьировало в пределах 18–174 мг/кг. Наибольшее содержание Ba выявлено у подмаренника настоящего (174 мг/кг), тмина обыкновенного (104 мг/кг), сабельника болотного (156 мг/кг), панцерии шерстистой (110 мг/кг). Коэффициент биологического поглощения Ba степной растительностью в среднем равен 0.65, луговой – 0.55, культурной – 0.59 [20]. Между накоплением Ba в растениях и его валовым содержанием в почвах выявлена корреляционная связь [32].

В корнях сапожниковии содержится в среднем 80 ± 10 мг/кг этого элемента (60–110 мг/кг). Эта величина больше кларка в наземных растениях в 6 раз (табл. 2). Изменчивость концентрации Ba по пробным площадям высокая ($CV = 27\%$).

Стронций

Стронций в почвах распространен широко, его кларк составляет $3 \times 10^{-2}\%$, а содержание колеблется от 18 до 3500 г/т. Нормой для почв считается содержание Sr 600 мг/кг, избыточным >600–1000 мг/кг. Биогенность Sr высокая – 0.97, для травянистых растений – 0.15. Кларк Sr для на-

земных растений равен 26 мг/кг (табл. 2). В растениях Sr обычно накапливается в корнях и стеблях, но не в листьях, в прямой пропорции с кальцием. Содержание Sr в растениях варьирует в широких пределах – от < 1 до 10000 мг/кг, обычно 10–1500 мг/кг. Более высокое содержание отмечается в бобовых (290–662 мг/кг). По другим данным более богаты Sr растения семейства зонтичных (0.044%). В живых организмах Sr выступает как аналог кальция [20].

Содержание Sr в лекарственных растениях Бурятии изменялось в пределах 33–247 мг/кг (в среднем 85 ± 7.7 мг/кг) при значительном коэффициенте вариации – 58% [33]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Sr составляла 80 ± 5 мг/кг (70–90 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 3 раза (табл. 2). Коэффициент вариации средний ($CV = 14\%$).

Свинец

Генеральное среднее содержание элемента в почвах – 38 ± 5.6 , при варьировании от 3 до 84 мг/кг [29]. Для доступности Pb основное значение имеет pH почвенных растворов. В растениях Pb присутствует постоянно, но содержание его обычно невелико. Кларковое содержание Pb в наземных растениях равно 2.7 мг/кг. Коэффициент биогенности Pb довольно низкий – в среднем 0.18. Нормальной является концентрация 5–10 мг/кг, избыточной (токсичной) – 30–300 мг/кг [27].

Растения поглощают Pb не только из почв, но и из атмосферы (иногда до половины содержащегося в них количества элемента). Естественное содержание в незагрязненных и безрудных областях лежит в пределах 0.1–10.0 мг/кг [29]. Для съедобных растений среднее содержание Pb – около 0.5, для трав – около 2.0 мг/кг.

Содержание Pb в лекарственных растениях Забайкалья варьировало от 0.46 до 2.19 мг/кг (в среднем 0.88 ± 0.06 мг/кг, $V = 46\%$), что меньше, чем ПДК свинца в лекарственном растительном сырье – 6.0 мг/кг (СанПиН 2.3.2.1078) [33].

В корнях сапожниковии средняя концентрация Pb составляет 1.1 ± 0.3 мг/кг (0.4–2.1 мг/кг). Эта величина меньше кларка в наземных растениях в 2.5 раза и не превышает предельно допустимую концентрацию в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах равную 6 мг/кг [34]. Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 60\%$). Средний коэффициент биологического поглощения Pb сапожниковией равен 1.1.

Мышьяк

В России норматив валового содержания (ОДК) для As в различных группах почв от 2 до 10 мг/кг.

Мышьяк относится в почвах к первому классу опасности. Кларк As в почвах – 5 г/т [19], по другим данным – 8.7 г/т [29]. Загрязнение почв As происходит при воздействии на почвы As-пестицидов, а также геотермальных и теплоэлектростанций, добычи и переработки углей, различных металлов и т.д.

Биохимическая роль As не изучена. Предварительная оценка кларка As в растительности суши $10^{-5}\%$. Он действует в растениях как ингибитор обмена веществ, резко снижает урожайность, особенно при недостатке фосфора. Основными накопителями As являются корни растений. Генеральное среднее содержание элемента в наземных растениях 0.02 г/т. Содержания As в съедобных частях кормовых растений составляют от 2 до 1500 г/т сухого вещества [27]. Предельно допустимое содержания мышьяка в лекарственном растительном сырье и препаратах составляет 0.5 мг/кг [34].

В Забайкальском крае лекарственные растения, произрастающие на территории одного из рудных районов, такие как *Crataegus sanguinea* Pallas, *Betula pendula* Roth, *Pentaphylloides fruticosa* (L.) O. Schwarz и *Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm на фоновом участке накапливают As до 6 мг/кг, растения месторождения Шерловая Гора – до 138.5 мг/кг, а растения техногенных массивов – до 22 мг/кг [35].

В районе исследования в корнях сапожниковии средняя концентрация As составляла 0.9 ± 0.2 мг/кг (0.5 до 1.7 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 4.5 раза (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 57\%$). Средний коэффициент биологического поглощения элемента сапожниковией равен 0.94. Максимальное превышение ПДК достигало 3.5 раза. Такое сырье считается непригодным для получения лекарственных препаратов. Этот факт необходимо учитывать при сборе и организации культивирования растения.

Кадмий

Генеральное среднее содержания Cd в почве – 0.5 г/т [19]. Фоновые содержания обычно колеблются от 0.01 до 0.5 мг/кг, а более высокие концентрации, вероятно, имеют антропогенное происхождение. Прогнозируется увеличение концентраций Cd на 0.1 мг/кг каждые 20–30 лет. Это связано с его техногенным поступлением.

Значение Cd для растений не установлено. Обнаружена прямая зависимость между его содержанием в растениях и в среде их обитания, что свидетельствует о высоком биологическом поглощении. В растительности континентов содержится в среднем 0.005 мг/кг (сухая фитомасса). Кадмий попадает в растения как из почвы, так и из воздуха [25].

Разные виды обнаруживают большие различия в концентрации Cd из одной и той же почвы – от 0.06 до 5.2 мг/кг сухого вещества. Кларковые содержания Cd в сельскохозяйственных культурах находятся в пределах от 0.009 до 0.4 мг/кг. Кларк Cd для наземных растений равен 0.6 мг/кг сухого вещества [19].

В корнях сапожниковии средняя концентрация Cd составляет 0.12 ± 0.03 мг/кг (0.04–0.19 мг/кг). Эта величина меньше кларка наземных растений в 5 раз и не превышает предельно допустимую концентрацию в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах равную 1 мг/кг [34]. Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 51\%$). Средний коэффициент биологического поглощения Cd сапожниковией равен 2.4.

Висмут

В почвах среднее содержание Bi составляет 0.2 мг/кг. В съедобных частях наземных растений содержится в среднем 0.06 мг/кг Bi. Максимальное содержание Bi в золе коры деревьев Сибири достигает 600 мг/кг, при фоновых значениях 1 мг/кг [27].

В корнях сапожниковии средняя концентрация Bi составляла 0.18 ± 0.06 мг/кг (0.001–0.33 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 1.8 раза (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 133\%$).

Бериллий

Кларк Be в почве – 1.7 ± 0.5 г/т. В России среднее содержание в почвах находится в пределах от 1.0 до 4.0 мг/кг. Концентрация Be в почвенных растворах составляет 0.4–1.0 мкг/л. Содержание Be в растениях изменяется в широких пределах – от 0.001 до 0.4 мг/кг сухой массы. Кларк Be для наземных растений составляет 0.1 мг/кг сухой массы. Среднее содержание элемента в золе наземных растений 2 г/т. Бериллий токсичен для растений, при высоких концентрациях (2–16 мг/кг), он тормозит прорастание семян, потребление Ca, Mg, P корнями, разрушает протеины и энзимы [20].

Содержание Be в лекарственных растениях Забайкалья изменялось от 0.044 до 0.37 мг/кг при средней величине 0.08 ± 0.01 мг/кг и высоком коэффициенте вариации – 74% [26]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Be составляла 0.08 ± 0.02 мг/кг (0.02–0.11 мг/кг). Эта величина близка к кларку в наземных растениях. Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 57\%$).

Сурьма

Кларк Sb в почве – 1.0 мг/кг (0.2–10.0 мг/кг). Среднее содержание Sb в растениях составляет

0.06 г/т сухого вещества. Сурьма не относится к жизненно важным элементам, хотя и стимулирует некоторые биопроцессы. В корнях сапожниковии средняя концентрация Sb составляла 0.05 ± 0.01 мг/кг (0.03–0.07 мг/кг). Эта величина близка кларку в наземных растениях (табл. 2). Коэффициент вариации высокий ($CV = 28\%$).

Ртуть

Кларк Hg в почвах – 0.12 ± 0.02 мг/кг. Максимальные концентрации Hg в поверхностном слое почв с учетом мировых данных достигают 400 мг/кг [35]. Растения поглощают Hg обычно пропорционально содержанию в субстрате. Симптомы отравления растений Hg – задержка роста всходов и развития корней, торможение фотосинтеза, снижение урожайности. Кларк Hg в наземных растениях – 0.015 мг/кг. Коэффициент поглощения Hg растительностью суши составляет 7.58. Растения различаются по фоновому содержанию Hg. В сельскохозяйственных растениях концентрации составляют от 0.9 до 86 мкг/кг [25].

В травянистых растениях Бурятии средняя концентрация Hg варьировала от 4.2 до 27.7 мкг/кг сухой массы [36]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Hg составляла 0.009 ± 0.001 мг/кг (0.01–0.005 мг/кг). Эта величина меньше кларка наземных растений в 1.7 раза и не превышает ПДК в лекарственном растительном сырье и препаратах равную 0.1 мг/кг [34]. Коэффициент вариации высокий ($CV = 25\%$). Средний коэффициент биологического поглощения элемента сапожниковией равен 0.18.

Таллий

Кларк Tl в почвах составляет 0.2 мг/кг, кларк Tl в наземных растениях – 0.01–0.1 мг/кг сухого вещества. В хвое сосны содержится от 2 до 100 мг/кг элемента. Самые высокие концентрации Tl установлены в капусте – до 125 мг/кг [27].

В корнях сапожниковии средняя концентрация Tl составляла 0.005 ± 0.002 мг/кг (0.001–0.01 мг/кг). Эта величина близка к кларку в наземных растениях. Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 107\%$).

Недостаточно изученные элементы

В корнях растений сапожниковии растопыренной исследовано накопление 4 таких микроэлементов. По содержанию они образуют следующий ряд: Rb > Ce > Zr > La.

Рубидий

В почвах и растениях Rb ведет себя подобно калию. Вследствие этого высокие его concentra-

ции довольно токсичны для растений. Если некоторые растения испытывают дефицит K, то рубидий (как и натрий), может стимулировать их рост [35]. Кларк Rb в почве – 0.015 г/т. Генеральное среднее содержание Rb в наземных растениях – 20 мг/кг [18].

В корнях сапожниковии средняя концентрация Rb составляет 10 ± 2 мг/кг (4–16 мг/кг). Эта величина меньше кларка наземных растений в 2 раза (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 46\%$).

Церий

Кларк Ce в почве – 56 мг/кг [19]. В наземных растениях количество Ce варьирует в значительных пределах: в лишайниках от 0.25 до 16.0 мг/кг, в овощных культурах от 0.002 до 0.05 мкг/кг. Среднее содержание Ce в растениях 1.2 мг/кг [37].

В корнях сапожниковии средняя концентрация Ce составляет 2.3 ± 0.6 мг/кг (0.7–3.4 мг/кг). Эта величина больше кларка в наземных растениях в 11 раз (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 55\%$).

Цирконий

Кларк Zr в почвах – 300 г/т [19]. Для растений доступность Zr считается весьма ограниченной, он имеет один из самых низких коэффициентов биологического накопления. Кларк Zr в наземных растениях составляет 0.64 мг/кг сухого вещества. Средние содержания Zr в сельскохозяйственных растениях находятся в пределах 0.02–2.6 мг/кг сухой массы [30]. Известно о токсичном действии Zr на растения, особенно на рост корней.

Содержание Zr в лекарственных растениях Забайкалья изменялось от 0.45 до 29.2 мг/кг при среднем значении 295 ± 0.72 и аномально высоком коэффициенте вариации (157%) [32]. В корнях сапожниковии средняя концентрация Zr составляет 1.6 ± 0.4 мг/кг (0.3–2.6 мг/кг). Эта величина больше кларка наземных растений в 2.5 раза. Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 51\%$).

Лантан

Лантан считается биологически легкоусвояемым металлом. Генеральное среднее La в почве 34 ± 6.5 мг/кг сухой массы [36]. Содержание La в растениях составляет от 3 до 15000 мг/кг сухой массы. В целом концентрация элемента зависит от концентрации в почве [37]. Биологическое значение La изучено мало. Известно, что лантаниды токсичны для метаболизма клеток, однако данных об их тормозящем действии на развитие растений немного [36].

Таблица 3. Связь концентрации химических элементов в корнях *S. divaricata* с характеристиками почв (коэффициент корреляции Пирсона – 0.9–1.0; $p < 0.05$)**Table 3.** The relationship between the concentration of chemical elements in *S. divaricata* roots and soil characteristics (the Pearson correlation coefficient is 0.9–1.0; $p < 0.05$)

Химические параметры почвы Soil chemical parameters	Характер связи с содержанием химических элементов в корнях <i>S. divaricata</i> The nature of the relationship with the content of chemical elements in the <i>S. divaricata</i> roots										
рН солевой вытяжки pH of the salt extract	+Ba	+Zn	–Pb								
Общий азот Total nitrogen	+K	+As	–Hg								
Подвижный P Mobile P	+Cd										
Подвижный K Mobile K	–B	–Mo	–La	–Li	–Be	–Sb					
Hg (массовая доля) Hg (mass fraction)	–Fe	–Na	–Ti	–Sr	–Mn	–Rb	–Ni	–V	–Ce	–Co	+Bi
Обменный Ca Exchangeable Ca	+Ca	–P	–B								
S подвижная форма S mobile form	–Mg	+Cu									

В корнях сапожниковии средняя концентрация La составляет 1.5 ± 0.4 мг/кг (0.4–2.2 мг/кг). Эта величина больше кларка в наземных растениях в 17.6 раза (табл. 2). Коэффициент вариации очень высокий ($CV = 59\%$).

Влияние химического состава почвы на накопление химических элементов в корнях *S. divaricata*

В Китае установлена положительная связь концентраций Mg, Na и Cu в сапожниковии с содержанием этих элементов в почве, и отрицательная – между концентрацией Mn в растении и почве. Концентрации восьми элементов в образцах растений уменьшались в следующем порядке: $Ca > Mg > Na > K > Fe > Zn > Mn > Cu$ [1].

В наших исследованиях концентрация элементов в корнях растения располагались в несколько иной последовательности: $K > Ca > Mg > Fe > Na > Zn > Mn > Cu$. В Китае средние концентрации Ca, Na, Mg и K в растениях сапожниковии были выше, чем в почвах. Согласно нашим данным, напротив, меньше. Это подтверждает значительное взаимовлияние концентраций химических элементов в почве и растении, а также указывают на возможность регуляции содержания биологически активных веществ и элементного состава растений путем внесения в почву минеральных удобрений.

В наших исследованиях установлено, что концентрации в корнях сапожниковии жизненно важных для человека элементов – Ca, Mg, P, K, Cu, Zn, Mo, а также ряда токсичных элементов (Ba, Pb, As, Hg, Cd, Be, Sb) значимо связаны с химическими свойствами почвы (табл. 3). В частности, с величиной рН почвы положительно коррелирует содержание Zn и Ba, отрицательно – содержание Pb. Количество в почве общего азота положительно связано с накоплением в корнях сапожниковии жизненно важного элемента K и токсичного элемента As, но имеет отрицательную корреляцию с накоплением Hg. При повышении содержания в почвах Hg может снижаться поглощение важных элементов биогенов – Fe, Na, Mn. Однако эти результаты получены на небольшой выборке образцов растений, поэтому их нужно рассматривать как предварительные и требующие дальнейшего подтверждения.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили выявить элементный состав корней лекарственного растения сапожниковии растопыренной *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk в одном из районов Забайкальского края (бассейны рек Ингода и Шилка). Содержание химических элементов в корнях растений исследованного вида имеет сле-

дующую последовательность: K > Ca > Mg > Fe > P > Na > Ti > Ba > Sr > Zn > Mn > B > Cu > Cr > Rb > Ni > V > Mo > Ce > Zr > La > Pb > Li > As > Co > Cd > Bi > Be > Sb > Se > Hg > Tl.

2. Элементный состав корней сапожниковии связан с химическим составом почв, на которых растения произрастают. К элементам наиболее энергичного поглощения (коэффициент поглощения > 10) относятся K, P, Mn, Zn, Cu, Cr; значительного накопления (1–10) – Cd, Ca, Pb; среднего поглощения (0.1–1.0) – As, Hg. Остальные исследованные элементы отнесены к группе слабого и очень слабого поглощения.

3. Накопление Ti, Cr, Ce, Li, Fe, Ba, As, Sr в корнях сапожниковии растопыренной является

более высоким, а накопление Ca, Mg, P, Zn, Mn, D, Cd, Pb – более низким, чем среднее содержание этих элементов в наземных растениях.

4. Установлена корреляционная связь содержания ряда макро- (Ca, Mg, P, K, Na, Fe) и микроэлементов (Co, Cu, Mn, Zn, Ba, Pb, As, Hg, Cd, Be, Sb) в корнях сапожниковии растопыренной с химическими свойствами почвы, но из-за ограниченности данных результат можно рассматривать только как предварительный.

5. Сравнительная оценка количества элементов в корнях исследованного вида с имеющимися величинами ПДК показала, что концентрация As в них превышает предельно допустимое содержание в лекарственном сырье и препаратах в 1.8 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun Jing-Bo, Gao Yu-Gang, Zang Pu, Yang He, Zhang Lian-Xue. 2013. Mineral Elements in Root of Wild *Saposhnikovia divaricata* and Its Rhizosphere Soil. – Biol. Trace Elem Res. 153(1–3): 363–370. <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9684-x>
2. Цэрэнсоном Г., Нямбаяр Х., Доржсүрэн Н., Чултэмсүрэн Е., Соодой Ч., Готов Ч. 2015. Влияние растительного препарата сапожниковии растопыренной (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk.) на вызванное коллагеном воспаление суставов в эксперименте. – Сибирский медицинский журнал (Иркутск). 132(1): 106–108. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23877306>
3. Bao Z., Zhu Z., Zhang H., Zhong Y., Wang W., Zhang J., Wu J. 2019 The complete chloroplast genome of *Saposhnikovia divaricata*. – Mitochondrial DNA Part B. 5(1): 360–361. <https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1704200>
4. Batsukh Z., Toume K., Javzan B., Kazuma K., Cai S.Q., Hayashi S., Kawahara N., Maruyama T., Komatsu K. 2020. Metabolomic profiling of *Saposhnikovia* Radix from Mongolia by LC-IT-TOF-MS/MS and multivariate statistical analysis. – J. Nat. Med. 74(1):170–188. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01361-0>
5. Kreiner J., Pang E., Lenon G.B., Yang A.W.H. 2017. *Saposhnikovia divaricata*: a phytochemical, pharmacological, and pharmacokinetic review. – Chinese J. Natural Medicines. 15(4): 255–264. [https://doi.org/10.1016/S1875-5364\(17\)30042-0](https://doi.org/10.1016/S1875-5364(17)30042-0)
6. Kim C.W., Sung J.H., Kwon J.E., Ryu H.Y., Song K.S., Lee J.K., Lee S.R., Kang S.C. 2019. Toxicological Evaluation of *Saposhnikovia* Radix Water Extract and its Antihyperuricemic Potential. – Toxicol Res. 35(4): 371–387. <https://doi.org/10.5487/TR.2019.35.4.371>
7. Li L., Geng M., Li Y., Xu Z., Xu M., Li M. 2020. Characterization of the complete plastome of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. – Mitochondrial DNA B Resour. 5(1):786–787. <https://doi.org/10.1080/23802359.2020.1715891>
8. Yang M., Wang C.-C., Wang W., Xu J.-P., Wang J., Zhang C.-H., Li M.-H. 2020. *Saposhnikovia divaricata*-An Ethnopharmacological, Phytochemical and Pharmacological Review. – Chin J. Integr. Med. 26(11): 873–880. <https://doi.org/10.1007/s11655-020-3091-x>
9. Okuyama E., Hasegawa T., Matsushita T., Fujimoto H., Ishibashi M., Yamazaki M. 2001. Analgesic components of *saposhnikovia* root (*Saposhnikovia divaricata*). – Chem. Pharm. Bull. (Tokyo). 49(2): 154–60. <https://doi.org/10.1248/cpb.49.154>
10. Урбагарова Б.М. 2019. Фармакологическое исследование сапожниковии растопыренной (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk.) корней и разработка на их основе экстракта сухого: Дисс. ... канд. фарм. наук. Улан-Удэ. 162 с.
11. Урбагарова Б.М. 2019. Фармакологическое исследование сапожниковии растопыренной корней и разработка на его основе нейропротекторного средства. – В сб.: Молекулярные и биологические аспекты химии, фармацевтики и фармакологии. Сборник тезисов докладов пятой Междисциплинарной конференции. Судак. С. 236. https://mobi-chem.org//images/conf_papers2019.pdf#page=236
12. Урбагарова Б.М., Тараскин В.В., Елисафенко Т.В., Шульц Э.Э., Королюк Е.А., Раднаева Л.Д. 2021. Содержание основных действующих веществ в корнях природного и интродуцированного растения *Saposhnikovia divari-*

- cata* (Turcz.) Schischk. — Химия растительного сырья. 3: 143–151.
<http://journal.asu.ru/cw/article/view/9152>
13. Ребров В.Г., Громова О.А. 2008. Витамины, макро- и микроэлементы. М. 960 с.
 14. Визир К.Л., Климовицкая З.М. 1964. Действие марганца на рост и развитие растений на различных этапах их онтогенеза. — В кн.: Микроэлементы в жизни растений, животных и человека. Киев. С. 29–44.
 15. Гринкевич Н.И., Боровкова Л.И., Грибовская И.Ф. 1970. Влияние микроэлементов на содержание алкалоидов в красавке. — Фармация. 5: 41–47.
 16. Гринкевич Н.И., Сорокина А.А. 1983. Роль геохимических факторов среды в продуцировании растениями биологически активных веществ. — В кн.: Биологическая роль микроэлементов. М. С. 187–193.
 17. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф. 2006. К вопросу о содержании микроэлементов в сырье перспективных видов лекарственных растений южного Предуралья. — Вестник ОГУ. 12S(62): 167–168.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19045540>
 18. Банищикова Е.А., Вахнина И.Л., Желибо Т.В. 2020. *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schiskin в степях юго-восточного Забайкалья. — Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 19–1: 87–92.
<https://doi.org/10.14258/pbssm.2020018>
 19. Воткевич Г.В., Кокин А.В. 1990. Справочник по геохимии. М. 480 с.
 20. Иванов В.В. 1994. Экологическая геохимия элементов: Справочник. В 6 кн. М. Кн. 1: s-элементы. 304 с.
 21. Перельман А.И. 1975. Геохимия ландшафта. М. 342 с.
 22. Иванов В.В. 1995. Экологическая геохимия элементов: Справочник. В 6 кн. М.: Экология, Кн. 4: Главные d-элементы. 416 с.
 23. Кашин В.К. 2009. Жизненно необходимые микроэлементы в лекарственных растениях Забайкалья. — Химия в интересах устойчивого развития. 17(4): 379–388. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12834028>
 24. Иванов В.В. 1994. Экологическая геохимия элементов: Справочник. В 6 кн. М.: Недра, Кн. 2: Главные р-элементы. 303 с.
 25. Иванов В.В. 1997. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн. М.: Экология, Кн. 5: Редкие d-элементы. 576 с.
 26. Сосорова С.Б. 2009. Кобальт в почвах и растениях дельты р. Селенга. — Почвоведение. 7: 806–813.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12601076>
 27. Иванов В.В. 1996. Экологическая геохимия элементов: Справочник. В 6 кн. М.: Недра, Кн. 3: Редкие р-элементы. 352 с.
 28. Кашин В.К. 2011. Условно необходимые микроэлементы в лекарственных растениях Забайкалья. — Химия в интересах устойчивого развития. 19(3): 259–266.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16494258>
 29. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 439 с.
 30. Сосорова С.Б., Кашин В.К. 2008. Никель в почвах и растениях дельты реки Селенги. — Плодородие. 6(45): 46–47.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12799755>
 31. Кашин В.К. 2005. Ванадий в растениях Забайкалья. — Агрохимия. 3: 67–73.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9136373>
 32. Кашин В.К. 2011. Барий в растительности Забайкалья. — Агрохимия. 1: 56–66.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15612792>
 33. Кашин В.К. 2012. Содержание токсичных микроэлементов в лекарственных растениях Забайкалья. — Агрохимия. 11: 78–81. 78–81.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18128188>
 34. ОФС.1.5.3.0009.15 Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. Pharmacopoeia.ru — сайт о регистрации лекарственных средств в России. Site about registration of Drugs in Russia and EAEU (CIS).
<https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-5-3-0009-15>
 35. Солoduхина М.А. 2012. О содержании мышьяка в некоторых лекарственных растениях Забайкальского края. — Современные проблемы науки и образования. 6.
<https://science-education.ru/ru/article/view?id=7576>
 36. Кашин В.К., Иванов Г.М. 2009. Ртуть в растениях Забайкалья. — Агрохимия. 3: 71–75.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11734461>
 37. Иванов В.В. 1997. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн. М.: Экология, Кн. 6: Редкие f-элементы. 607 с.

Elemental Content of Roots of *Saposhnikovia divaricata* (Apiaceae) in the Trans-Baikal Territory

V. P. Makarov^{a, *}, M. A. Solodukhina^a, O. F. Malykh^a, N. Yu. Mikheeva^a, E. A. Banshchikova^a,
V. S. Larin^a, V. V. Bronnikov^a, T. V. Zhelibo^a

^a*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia*

^{*}*e-mail: vm2853@mail.ru*

Abstract—The article presents the results of a study of the chemical elements accumulation in the roots of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk, growing in the northern steppe regions of the Trans-Baikal Territory. *S. divaricata* is widely used in Chinese traditional medicine for the treatment of rheumatism and allergic rhinitis, immune and nervous systems, respiratory diseases. Biologically active compounds of the plant exhibit significant anti-inflammatory, analgesic, antioxidant, antiproliferative, antitumor and immunoregulatory activity. The content of chemical elements in the roots of *S. divaricata* in descending order is as follows: K > Ca > Mg > Fe > P > Na > Ti > Ba > Sr > Zn > Mn > B > Cu > Cr > Rb > Ni > V > Mo > Ce > Zr > La > Pb > Li > As > Co > Cd > Bi > Be > Sb > Se > Hg > Tl. The accumulation of Ti, Cr, La, Ce, Li, Fe, Ba, As, Sr, Bi, Mo, Zr, Ni, V exceeds the average content of these elements in terrestrial plants. The concentration of As in the roots of *S. divaricata* exceeds the maximum permissible content for medicinal raw materials and medicinal herbal preparations by 1.8 times. The concentration of some chemical elements in the roots of *Saposhnikovia* correlates with their content in the soil.

Keywords: *Saposhnikovia divaricata*, chemical elements, Trans-Baikal Territory

REFERENCES

1. Sun Jing-Bo, Gao Yu-Gang, Zang Pu, Yang He, Zhang Lian-Xue. 2013. Mineral Elements in Root of Wild *Saposhnikovia divaricata* and Its Rhizosphere Soil. — Biol. Trace Elem Res. 153(1–3): 363–370.
<https://doi.org/10.1007/s12011-013-9684-x>
2. Tserensonom G., Nyambayar Kh., Dorzhsuren N., Chultemsuren E., Soodoi Ch., Gotov Ch. 2015. Impact of vegetative preparation of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin in collagen-induced arthritis model. — Siberian Medical J. (Irkutsk). 132(1): 106–108.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23877306> (In Russian)
3. Bao Z., Zhu Z., Zhang H., Zhong Y., Wang W., Zhang J., Wu J. 2019. The complete chloroplast genome of *Saposhnikovia divaricata*. — Mitochondrial DNA Part B. 5(1): 360–361.
<https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1704200>
4. Batsukh Z., Toume K., Javzan B., Kazuma K., Cai S.Q., Hayashi S., Kawahara N., Maruyama T., Komatsu K. 2020. Metabolomic profiling of *Saposhnikovia* Radix from Mongolia by LC-IT-TOF-MS/MS and multivariate statistical analysis. — J. Nat. Med. 74(1): 170–188.
<https://doi.org/10.1007/s11418-019-01361-0>
5. Kreiner J., Pang E., Lenon G.B., Yang A.W.H. 2017. *Saposhnikovia divaricata*: a phytochemical, pharmacological, and pharmacokinetic review. — Chinese J. Natural Medicines. 15(4): 255–264.
[https://doi.org/10.1016/S1875-5364\(17\)30042-0](https://doi.org/10.1016/S1875-5364(17)30042-0)
6. Kim C.W., Sung J.H., Kwon J.E., Ryu H.Y., Song K.S., Lee J.K., Lee S.R., Kang S.C. 2019. Toxicological Evaluation of *Saposhnikovia* Radix Water Extract and its Antihyperuricemic Potential. — Toxicol Res. 35(4): 371–387.
<https://doi.org/10.5487/TR.2019.35.4.371>
7. Li L., Geng M., Li Y., Xu Z., Xu M., Li M. 2020. Characterization of the complete plastome of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. — Mitochondrial DNA Part B. 5(1): 786–787.
<https://doi.org/10.1080/23802359.2020.1715891>
8. Yang M., Wang C.-C., Wang W., Xu J.-P., Wang J., Zhang C.-H., Li M.-H. 2020. *Saposhnikovia divaricata*-An Ethnopharmacological, Phytochemical and Pharmacological Review. — Chin. J. Integr. Med. 26(11): 873–880.
<https://doi.org/10.1007/s11655-020-3091-x>
9. Okuyama E., Hasegawa T., Matsushita T., Fujimoto H., Ishibashi M., Yamazaki M. 2001. Analgesic components of *saposhnikovia* root (*Saposhnikovia divaricata*). — Chem. Pharm. Bull. (Tokyo). 49(2): 154–60.
<https://doi.org/10.1248/cpb.49.154>
10. Urbagarova B.M. 2019. [Pharmacological study of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin roots and the development of a dry extract based on them: Abstr. ... Dis. Cand. (Pharmacology) Sci.]. Ulan-Ude. 162 p. (In Russian)
11. Urbagarova B.M. 2019. [Pharmacological study of *Saposhnikovia divaricata* roots and the development of a neuroprotective agent based on it]. — In: [Molecular and biological aspects of chemistry, pharmacy and pharmacology. Collection of abstracts of the fifth Interdisciplinary Conference]. P. 236.
https://mobi-chem.org/images/conf_papers2019.pdf#page=236 (In Russian)

12. *Urbagarova B.M., Taraskin V.V., Elisafenko T.V., Shul'ts E.E., Korolyuk E.A., Radnaeva L.D.* 2021. Contents of the main active substances in the roots of natural and introduced plant *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. – *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 3: 143–151.
<http://journal.asu.ru/cw/article/view/9152> (In Russian)
13. *Rebrov V.G., Gromova O.A.* 2008. [Vitamins, macro-and microelements]. Moscow. 960 p. (In Russian)
14. *Vizir K.L., Klimovitskaya Z.M.* 1964. [The effect of manganese on the growth and development of plants at various stages of their ontogenesis]. In: [Microelements in the life of plants, animals and humans]. Kiev. С. 29–44. (In Ukrainian)
15. *Grinkevich N.I., Borovkova L.I., Gribovskaya I.F.* 1970. The effect of trace elements on the content of alkaloids in bel-ladonna. – *Farmaciya*. 5: 41–47. (In Russian)
16. *Grinkevich N.I., Sorokina A.A.* 1983. [The role of geochemical environmental factors in the production of biologically active substances by plants]. In: [The biological role of trace elements]. Moscow: pp. 187–193. (In Russian)
17. *Nemereshina O.N., Gusev N.F.* 2006. On the question of the content of trace elements in the raw materials of promising types of medicinal plants of the southern Urals. – *Vestnik of the Orenburg State University*. 12S(62): 167–168.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19045540> (In Russian)
18. *Banshchikova E.A., Vakhnina I.L., Zhelibo T.V.* 2020. *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin in the steppes of south-eastern Transbaikalia. – *Problems of botany in Southern Siberia and Mongolia*. 19(1): 87–92.
<https://doi.org/10.14258/pbssm.2020018> (In Russian)
19. *Votkevich G. V., Kokin A.V.* 1990. [Handbook of Geochemistry]. Moscow. 480 p. (In Russian)
20. *Ivanov V.V.* 1994. [Ecological geochemistry of elements: handbook. Vol. 1 s-elements]. Moscow. 304 p. (In Russian)
21. *Perelman A.I.* 1975. [Geochemistry of the landscape]. Moscow. 342 p. (In Russian)
22. *Ivanov V.V.* 1995. [Ecological geochemistry of elements: handbook: Vol. 4. Main d-elements]. Moscow. 416 p. (In Russian)
23. *Kashin V.K.* 2009. Vitally important microelements in Transbaikalian herbs. – *Chemistry for sustainable development*. 17(4): 371–381. (In Russian)
https://sibran.ru/upload/iblock/8a0/vitally_necessary_microelements_in_herbs_in_transbaikalia.pdf
24. *Ivanov V.V.* 1994. [Ecological geochemistry of elements: handbook. Vol. 2: Main p-elements.] Moscow. 303 p. (In Russian)
25. *Ivanov V.V.* 1997. [Ecological geochemistry of elements: handbook. Vol 5: Rare d=elements]. Moscow. 576 p. (In Russian)
26. *Sosorova S.B.* 2009. Cobalt in soils and plants of the Selenga River delta. – *Eurasian Soil Science*. 42(7): 750–756.
<https://doi.org/10.1134/S1064229309070059>
27. *Ivanov V.V.* 1996. [Ecological geochemistry of elements: handbook. Vol 3: Rare p-elements]. Moscow. 352 p. (In Russian)
28. *Kashin V.K.* 2011. Conditionally essential microelements in medicinal herbs of Transbaikalia. – *Chemistry for sustainable development*. 19(3): 237–244.
https://sibran.ru/upload/iblock/6c7/conditionally_essential_microelements_in_the_medicinal_herbs_of_transbaikalia_.pdf
29. *Kabata -Pendias A., Pendias H.* 1989. Trace elements in soils and plants. Transl. from English. Moscow. 440 p. (In Russian)
30. *Sosorova S.B., Kashin V.K.* 2008. Nickel in soils and plants of the Selenga River delta. – *Plodородiye*. 6(45): 46–47.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12799755> (In Russian)
31. *Kashin V.K.* 2005. Vanadium in plants of the Transbaikalia. – *Agrochemistry*. 3: 67–73.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9136373> (In Russian)
32. *Kashin V.K.* 2011. Barium in plants of the Transbaikalia. – *Agrochemistry*. 1: 56–66.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15612792> (In Russian)
33. *Kashin V.K.* 2012. Toxic microelements in medicinal plants of the Transbaikalia. – *Agrochemistry*. 11: 78–81.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18128188> (In Russian)
34. *OFS. 1.5.3.0009.15* Determination of the content of heavy metals and arsenic in medicinal plant raw materials and medicinal plant preparations. pharmacopoeia.ru - site about registration of drugs in Russian Federation and EAEU (CIS).
<https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-5-3-0009-15> (In Russian)
35. *Solodukhina M.A.* 2012. About the content of arsenic in some medicinal plants of the Zabaikalsky Krai. – *Modern problems of science and education*. 6.
<https://science-education.ru/ru/article/view?id=7576> (In Russian)
36. *Kashin V.K., Ivanov G.M.* 2009. Mercury in plants of the Transbaikalia. – *Agrochemistry*. 3: 71–75. (In Russian)
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11734461>
37. *Ivanov V.V.* 1997. [Ecological geochemistry of elements: handbook. Vol 6: Rare f-elements]. Moscow. 607 p. (In Russian)

**АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ**

**МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ *PINUS SYLVESTRIS* (PINACEAE)
В СОСНЯКАХ ЛИШАЙНИКОВЫХ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ВЫБРОСАМИ
СЫКТЫВКАРСКОГО ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
(РЕСПУБЛИКА КОМИ)**© 2022 г. Е. А. Робакидзе¹, *, К. С. Бобкова¹¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар, Россия

*e-mail: robakidze@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 29.03.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Изложены результаты исследований (1998–2019 гг.) влияния аэротехногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (“Монди СЛПК”), функционирующего с 1969 г., на жизненное состояние древостоев и подроста в сосняках лишайниковых, расположенных на разном расстоянии от источника эмиссии. В начале исследования сосновые древостои в районе аэротехногенного загрязнения были охарактеризованы как слабо- и среднеповрежденные. С 1998 по 2019 гг. выявлено улучшение жизненного состояния древостоев, растущих как в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного производства, так и на фоновой территории. В 2005 г. сосняки лишайниковые, произрастающие в зоне воздействия выбросов, характеризовались как слабоповрежденные, в период с 2010 по 2019 гг. — как здоровые. Индексы поврежденности древостоев в импактной зоне в 2019 г. по сравнению с 1998 г. в среднем уменьшились в 3.2 раза и имели значения в диапазоне от 0.37 до 0.50. В зоне влияния выбросов сосняки лишайниковые характеризуются ослабленным лесовозобновительным процессом. Подрост представлен преимущественно сосной обыкновенной, мелкий подрост отсутствует. В импактной зоне подрост сосны характеризуется как ослабленный, в фоновых условиях — как здоровый.

Ключевые слова: мониторинг, аэротехногенное загрязнение, сосняки лишайниковые, дефолиация, дехромация, виталитетная структура древостоев, индексы поврежденности, состояние возобновления

DOI: 10.31857/S0033994622040094

Изучение динамики развития лесных сообществ в условиях воздействия атмосферных выбросов и оценка реакции растений на изменение уровня загрязнения является одной из важных проблем экологии. В настоящее время этот аспект исследований в России приобрел особую актуальность в связи с существенным изменением объема аэротехногенных выбросов загрязняющих веществ [1–3]. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) занимает одну из ведущих позиций в формировании лесных массивов на Европейском Северо-Востоке России. Способность создавать значительную биомассу в условиях, непригодных для других видов древесных растений, является свидетельством ее больших адаптивных способностей [4].

Большое значение при проведении мониторинга состояния лесов и индикации качества окружающей природной среды имеет распределение де-

ревьев по классам повреждения — экологическая структура насаждения [1]. Согласно А.В. Яблокову [5], экологическая структура популяции — это расчленение древостоя на пространственно обособленные группы деревьев, находящиеся в специфических взаимосвязях с биотическими и абиотическими факторами среды. При антропогенном загрязнении популяция распадается на группировки особей, находящихся в различном состоянии жизнедеятельности [6].

В последнее время оценка состояния древостоев основывается на концепции виталитетной структуры, характеризующей соотношение в их составе особей, имеющих разное жизненное состояние (виталитет). Распределение особей по категориям состояния получило название виталитетного спектра. Эта концепция реализована в работе В.Т. Ярмишко с соавторами [7], посвященной сосновым лесам Кольского полуостро-

ва. Использование этого подхода и соответствующих методов анализа позволяет давать оценку и проводить сравнение состояния древостоев на определенной территории. Анализ виталитетных спектров древесного яруса лесных фитоценозов выявляет не только естественные процессы их развития и самоподдержания, но и воздействие стрессовых факторов, в том числе аэротехногенного загрязнения [3].

Важным показателем устойчивого развития лесных фитоценозов является характер естественного лесовозобновления. Количество и жизненное состояние подростка под пологом древостоев служит индикатором экологических и фитотенотических условий. Известно, что подрост хвойных древесных растений, развивающийся под пологом спелого древостоя, представляет собой часть естественного возобновительного фонда [8]. Подрост лесных насаждений характеризуется большим разнообразием и может классифицироваться по целому комплексу признаков (происхождению, возрасту, высоте, жизнеспособности). Состояние подростка характеризует способность лесного сообщества к самовосстановлению и непрерывному развитию. Молодые деревца, находящиеся в стадии интенсивного роста, остро реагируют на изменение водного и питательного режима, активно вовлекают в обмен веществ химические соединения, находящиеся в окружающей среде даже недолгое время.

АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (“Монди СЛПК”) является крупнейшим предприятием целлюлозно-бумажного производства в Европейской части России. СЛПК функционирует с 1969 г., среди его атмосферных выбросов сероорганические соединения, оксиды серы, азота, углерода, щелочная пыль. По данным публичных экологических отчетов предприятия, суммарное количество выбросов в 1998 г. составило 31 тыс. т, в 2006 – 20 тыс. т, в 2010 – 17 тыс. т, в 2015 – 10 тыс. т, в 2020 – 7.8 тыс. т [9]. Загрязнение среды этими выбросами оказывает существенное влияние на лесные экосистемы [10].

Для определения состояния лесов широкое распространение получил разработанный IUFRO метод мониторинга лесов на региональном и локальном уровнях в процессе выполнения программы ICP-Forests [11, 12]. Мониторинг состояния лесов успешно проводится и в странах Европы [13–15].

Цель данной работы – оценить динамику состояния деревьев и древостоев сосновых лесов лишайниковой группы типов в условиях длительного аэротехногенного воздействия целлюлозно-бумажного производства АО “Монди СЛПК” на территории Республики Коми.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в среднетаежных сосняках лишайниковых (*Pinetum cladinosum*), расположенных на разном расстоянии от источника эмиссии загрязняющих веществ АО “Монди СЛПК”. Постоянные пробные площади (ППП) были заложены в 1998–2000 годах. Сосняки на фоновой территории (ППП 28, 29, 30) расположены на расстоянии от 51 до 56 км от источника выбросов. Сосняки импактной территории (ППП 13, 14, 17) – на расстоянии от 7.3 до 11.2 км (табл. 1). Для исследованных лишайниковых фитоценозов, которые развиваются на борových террасах, на иллювиально-железистых подзолах, характерны разновозрастные древостои послерубочного и слепожарного происхождения. Древостои чистые по составу, сформированы сосной обыкновенной, имеют невысокую продуктивность. Краткая характеристика древостоев приведена в табл. 1. Подлесок отсутствует. Куртинно расположенный по площади подрост различной густоты состоит в основном из сосны обыкновенной.

Слабо развитый травяно-кустарничковый ярус представлен брусникой (*Vaccinium vitis-idaea* L.), толокнянкой обыкновенной (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.), вереском обыкновенным (*Calluna vulgaris* (L.) Hill.) и осокой верещатниковой (*Carex ericetorum* Pall.). В мохово-лишайниковом покрове содоминируют лишайники *Cladonia rangiferina* (L.) Web., *C. stellaris* (Opiz) Brodo. и *C. sylvatica* (L.) Hoffm., пятнами встречаются мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Polytrichum juniperinum* Hedw. и *P. commune* Hedw.

Выбор экспериментальных участков, расположенных в зоне воздействия выбросов АО “Монди СЛПК” и в фоновом районе для проведения исследований, предусматривал их сопоставимость по основным лесоводственно-таксационным характеристикам и лесорастительным условиям. Характеристика древостоев проведена согласно методам лесной таксации [16, 17]. Обработку материалов выполнили по [18]. Жизненное состояние деревьев сосны в древостоях определено согласно “Руководству...” [11, 12]. Каждое дерево в древостое характеризовалось совокупностью признаков, каждый из которых служит для оценки поврежденности. Наиболее информативны показатели состояния ассимиляционного аппарата. С помощью бинокля (“БПЦ 2 12 × 45М”, Россия) с расстояния, равного высоте дерева, у всех живых деревьев на ППП оценивали в баллах: степень дехромации, т.е. изменения цвета хвои, который является важным признаком и первым из визуальных индикаторов состояния дерева. Информативным признаком, характеризующим состояние дерева, является также степень дефо-

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев исследуемых сосновых лесов
Table 1. Mensurational characteristics of the studied tree stands in Scots pine forests

Номер ППП (расстояние от "Монди СЛПК", км) Sample plot number (distance from Mondi SLPK, km)	Состав древостоя Stand composition	Год наблюдений Year of observation	Возраст, лет Age, years	Число растущих деревьев, экз./га Number of growing trees, ind./ha	Средние Mean value			Общий запас, м ³ /га Total stock, m ³ /ha
					высота, м height, m	диаметр, см diameter, cm		
Сосновые леса в зоне действия выбросов АО "Монди СЛПК" Pine forests in the zone affected by Mondi SLPK emissions								
13 (7.3)	10С	2000	90–110	1180	16.9	16.2	200	
		2010	102–122	992	17.0	19.0	231	
		2019	111–131	912	17.0	20.0	229	
14 (11.0)	10С	1998	60–100	980	15.3	16.1	196	
		2010	72–122	992	19.0	19.0	258	
		2019	81–131	1054	19.0	20.0	284	
17 (11.2)	10С	1998	65–90	1530	16.0	14.7	206	
		2010	72–102	1500	17.2	17.0	237	
		2019	81–111	1175	19.0	20.0	273	
Сосновые леса фонового района Pine forests of in the reference area								
29 (51.0)	10С	1998	90–110	380	14.7	21.7	104	
		2010	102–122	464	14.3	20.0	138	
		2019	64–131	579	14.3	20.0	145	
30 (52.0)	10С	1998	80–120	1050	16.0	17.0	189	
		2010	92–132	987	16.0	20.0	216	
		2019	101–141	1120	16.0	20.0	257	
28 (56.0)	10С	1998	70–80	360	16.1	25.2	143	
		2010	82–92	417	18.0	26.2	241	
		2019	92–102	629	16.4	24.0	232	

лиации – изреживания – по сравнению с абсолютно здоровым деревом.

По степени дехромации хвои и дефолиации деревья распределяли на четыре класса, используя следующую шкалу: 0 – <10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100%. Кроме этого, учитывали долю сухих ветвей 1-го порядка в кроне по шкале: 0 < 10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–50%, 3 – 51–99%. Состояние вершины, как наиболее важной части кроны дерева, оценивали отдельно по следующей шкале: 0 – живая, 1 – поврежденная, 2 – усыхающая и 3 – сухая. С учетом степени дефолиации, дехромации, наличия сухих сучьев в кроне и состояния вершины каждому дереву в исследуемых сосняках присваивался определенный класс повреждения:

0 класс – здоровое дерево, не имеет внешних признаков повреждения кроны и ствола, любые повреждения хвои <10% по отношению ко всей массе ассимиляционного аппарата, что не сказывается на состоянии дерева;

I класс – слабо поврежденное дерево (повреждение по одному или сумме всех признаков составляет 11–25%);

II класс – средне поврежденное дерево (26–60% повреждений);

III класс – сильно поврежденное (отмирающее) дерево (61–99% повреждений);

IV класс – отмершее дерево (100% повреждений).

Отмершие деревья обычно делятся на подклассы IVa (свежий сухостой) и IVб (старый сухостой): нет хвои, постепенно опадают ветви и кора). Согласно В.А. Алексееву [19], старый сухостой практически не влияет на поврежденность древостоя в целом, но при расчете необоснованно снижает индекс его жизненного состояния, поэтому мы при анализе жизненного состояния учитывали только свежий сухостой.

Для оценки жизненного состояния древостоев рассчитывали индекс их поврежденности по формуле средневзвешенного класса повреждения составляющих древостой деревьев, предложенной А.С. Алексеевым [1]. Индекс поврежденности является интегральным показателем состояния, на основании которого можно сравнивать разные по составу древостои. Для получения более точных результатов за основу расчета брали не число деревьев разных классов повреждения, а их стволовой запас древесины [19]:

$$I = \left(\sum_{i=0}^4 i w_i \right) / W,$$

где: I – индекс поврежденности древостоя, баллы; i – баллы (от 0 до 4) классов повреждения деревьев; w_i – стволовой запас древесины деревьев

i -го класса повреждения, м³/га; W – общий запас древостоя, м³/га.

С учетом величины индекса поврежденности древостои классифицировали по А.С. Алексееву [1] на следующие категории: здоровый древостой ($I = 0–0.5$), ослабленный древостой ($I = 0.6–1.5$), сильно ослабленный древостой ($I = 1.6–2.5$), отмирающий древостой ($I = 2.6–3.5$) и сухостой ($I > 3.6$).

На ППП в 1998 и 2019 гг. проводили учет подроста сосны обыкновенной. К подросту относится поколение древесных растений с возрастом от 2 лет и старше, а в условиях севера – старше 10 лет (ГОСТ 18486-87). В лесоводственной практике принято относить к подросту древесные растения высотой более 0.25 м и диаметром менее 6 см [20]. Учитывали общее количество растений подроста, их распределение по высоте и жизненное состояние. Классификацию состояния подроста проводили по категориям “благонадежный”, “неблагонадежный” и “сухой” [18].

Индекс жизненного состояния подроста определяли по формуле, предложенной В.А. Алексеевым [19]:

$$C = (100n_1 + 70n_2 + 30n_3) / N,$$

где C – индекс жизненного состояния подроста в момент наблюдения; n_1, n_2, n_3 – число здоровых (благонадежных), ослабленных (неблагонадежных) и усыхающих особей подроста на 1 га соответственно; N – общее количество подроста, включая сухостой. При величине индекса, равной 100–80% подрост считали здоровым, при 79–50% – ослабленным, при 49–20% – сильно ослабленным и при 19% и ниже – разрушенным.

Статистическую обработку данных проводили, используя пакет программ Microsoft Excel 2010 (лицензия Института биологии Коми НЦ УрО РАН). Указаны средние арифметические значения и их стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За прошедшие 19 лет изменений в составе исследуемых древостоев не произошло. Запас древесины в сосняках лишайниковых увеличился как в зоне загрязнения, так и на фоновых участках (табл. 1).

Параметры состояния деревьев фонового района

Дехромация. В сосняках лишайниковых на фоновой территории доминируют (от 66 до 84%) здоровые деревья (рис. 1). Более высокие значения доли участия здоровых деревьев отмечены в начале исследования – в 1998 и 2000 гг. В интервале от 1998 до 2010 гг. число здоровых деревьев постепенно уменьшалось (1998 г. – $87 \pm 7.8\%$, 2005 г. – $73 \pm 6.5\%$, 2010 – 66 ± 5.9) и в дальней-

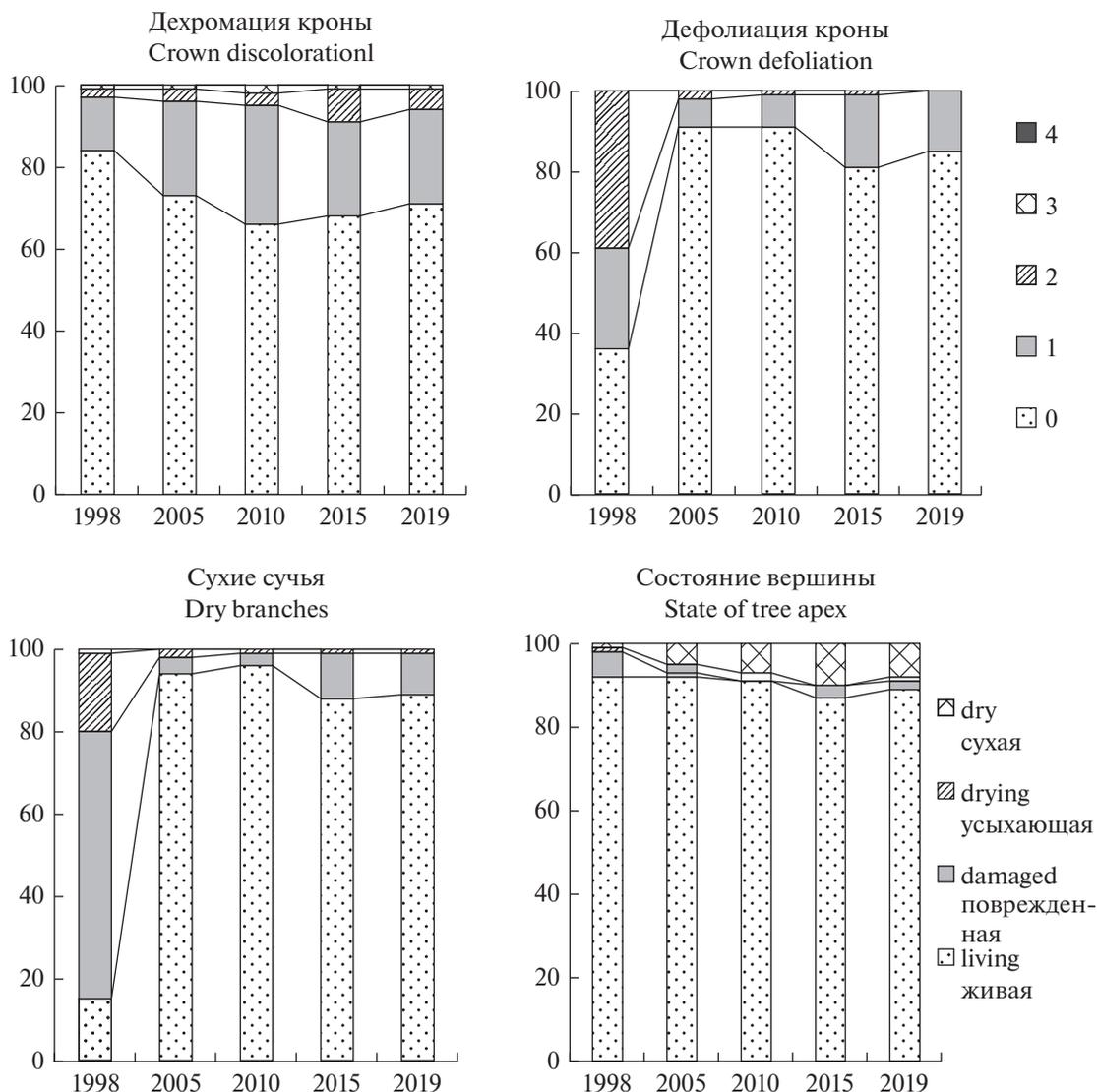


Рис. 1. Показатели состояния деревьев сосны обыкновенной в сосняках лишайниковых фоновых района. Степень дехромации и дефолиации кроны, доля сухих ветвей: 0 – менее 10%, 1 – от 11 до 25%, 2 – от 26 до 60%, 3 – от 61 до 99%, 4 – 100%.

По горизонтали – год наблюдений, лет; по вертикали – доля деревьев, %.

Fig. 1. The tree state indicators of Scots pine in lichen pine forests of the background area.

The degree of dechromization and defoliation of the crown, the proportion of dry branches: 0 – less than 10%, 1 – from 11 to 25%, 2 – from 26 to 60%, 3 – from 61 to 99%, 4 – 100%.

X-axis – the year of observations, years; y-axis – the proportion of trees, %.

шем существенно не изменялось, составляя в 2015 и 2019 гг. соответственно 68 и 71%. За исследованный период возросла доля деревьев со слабой (11–25%) и средней (26–60%) степенью дехромации. Во все годы наблюдений отсутствовали деревья 4 класса дехромации.

Дефолиация. Доля деревьев 0 класса дефолиации на фоновой территории в 1998 г. была равна $36 \pm 3.2\%$, к 2019 г. она увеличилось в 2.4 раза ($85 \pm 7.7\%$) (рис. 1). За этот период снизилась доля деревьев 1 класса дефолиации (с $25 \pm 3.2\%$ в 1998 г. до $15 \pm 1.4\%$ в 2019 г.). На начало исследо-

вания деревья со средней (2 класс) степенью дефолиации составляли $39 \pm 3.5\%$, в 2019 г. они отсутствовали. Деревья с сильной степенью (3 класс) дефолиации в исследуемых сосняках не были отмечены за весь период наблюдения.

Состояние вершин. Зафиксировано некоторое ухудшение состояния вершин деревьев в фоновом районе (рис. 1): доля деревьев сосны с неповрежденной вершиной достоверно не изменилась ($92 \pm 7.4\%$ – $89 \pm 8.8\%$). Участие деревьев с поврежденной вершиной сократилось по сравнению с

1998 г., однако достоверно увеличилась доля деревьев с усохшей вершиной: от 1 ± 0.09 до $8 \pm 0.7\%$.

Объем сухих сучьев. В 1998 г. в фоновом районе большинство деревьев отличалось наличием сухих сучьев (рис. 1). В 2005–2019 гг., напротив, основная часть деревьев не имела сухих сучьев. Участие деревьев без сухих сучьев с 1998 по 2019 гг. увеличилось примерно в 6 раз (1998 г. – $15 \pm 2.4\%$, 2019 г. – $89 \pm 7.9\%$). Доля деревьев, имеющих в объеме кроны от 11 до 25% сухих сучьев, за этот период уменьшилась в 6.5 раза и составила $10 \pm 0.9\%$. Значительно уменьшилась (с 19 ± 1.7 до $1 \pm 0.07\%$) доля деревьев с долей сухих сучьев от 26 до 60%.

Параметры состояния деревьев зоны импактных участков

Дехромация. По показателю дехромации за весь период наблюдений состояние деревьев сосны обыкновенной в импактной зоне практически оставалось на одном уровне. Участие деревьев с повреждением < 10% варьировало в пределах 52–69% (рис. 2). За период наблюдений несколько увеличилась доля деревьев со слабой степенью дехромации кроны (1998 г. – $31 \pm 2.3\%$, 2019 г. – $43 \pm 3.9\%$), но в 6 раз уменьшилась доля деревьев со средней степенью дехромации (1998 г. – $12 \pm 1.5\%$, 2019 г. – $2 \pm 0.3\%$).

Дефолиация. В период 2010–2019 гг. по сравнению с 1998 г. в исследуемых сосняках лишайниковых доля деревьев сосны без потерь хвои увеличилась в 3.8 раза и составила $77 \pm 6.9\%$ (рис. 2). Участие деревьев со слабой (1 класс), средней (2 класс) и сильной (3 класс) дефолиацией кроны сократилось. Доля деревьев со слабой степенью дефолиации кроны за рассматриваемый период уменьшилось в 1.5 раза и составила $22 \pm 1.9\%$. Если в 1998 году доля деревьев со средней степенью дефолиации кроны составляла $42 \pm 3.8\%$, то в 2015 и 2019 гг. деревья с такой степенью повреждения отсутствовали. В древостоях значительно (до $1 \pm 0.07\%$) уменьшилась доля участия деревьев с сильно выраженной потерей хвои. Эти изменения показывают, что по степени дефолиации кроны деревьев состояние древостоев улучшилось.

Состояние вершин. Повреждения верхушек деревьев могут быть вызваны воздействием высоких концентраций загрязняющих веществ в воздухе в результате разовых выбросов. Средняя доля деревьев со здоровой вершиной в 2019 г. по сравнению с 1998 г. ($95 \pm 6.7\%$) достоверно уменьшилась и составила $84 \pm 7.6\%$ (рис. 2). К 2019 г. значительно (до $12 \pm 1.1\%$) выросла доля деревьев с усыхающими и сухими вершинами.

Объем сухих сучьев. Наиболее значительные изменения состояния деревьев сосны в сосняках лишайниковых по этому показателю произошли в период с 1998 по 2005 гг., в дальнейшем измене-

ния были незначительны. Средняя доля деревьев без сухих сучьев в 2019 г. по сравнению с 1998 г. увеличилась в 5.8 раза и достигла $87 \pm 7.8\%$ от общего количества (рис. 2). Участие деревьев, имеющих от 11 до 25% сухих сучьев, за этот период уменьшилось в 4 раза и составило $12 \pm 1.1\%$. Значительно – до $1 \pm 0.09\%$ сократилась доля деревьев, имеющих в кроне от 26 до 50% сухих сучьев. Деревья, имеющие в кроне высокую долю (от 61 до 99%) сухих сучьев, отсутствовали.

Схожесть закономерностей, характеризующих изменение состояния древостоев в сосняках лишайниковых на импактных и фоновых территориях, может свидетельствовать о существенном влиянии на их состояние не только антропогенных, но и природных факторов, в частности влажности почв. В сосняках лишайниковых рассматриваемого региона запасы влаги могут варьировать от труднодоступных до оптимальных. Положительное влияние на влажность иллювиально-железистых почв сосняков лишайниковых оказывает мощность и глубина залегания цементированных прослоек. Эти прослойки выполняют роль водоупора. Они снижают интенсивность просачивания атмосферных осадков вглубь, способствуют более длительной задержке атмосферных осадков в верхних горизонтах почвенного профиля, улучшая тем самым снабжение корней растений влагой [21, 22].

Виталитетная структура

За период наблюдений с 1998 по 2019 гг. виталитетный спектр фоновых сосновых древостоев (51–66 км от источника загрязнения) существенно изменился в сторону улучшения (рис. 3а). Доля участия здоровых деревьев достоверно увеличилась (с 56 ± 5.0 до $76 \pm 6.8\%$), доля деревьев I класса повреждения уменьшилась в 1.5 раза, II класса повреждения – в 2 раза, свежий сухой (класс IVa) отсутствует.

В зоне влияния целлюлозно-бумажного производства в период с 1998 по 2019 гг. жизненное состояние древостоев сосны в целом также улучшилось (рис. 3б), однако следует отметить более высокую вариабельность виталитетной структуры сосновых древостоев по сравнению с фоновыми сосняками. В период 1998–2010 гг. регистрируется достоверное увеличение доли участия здоровых деревьев (с 32 ± 5.0 до $78 \pm 5.0\%$). В 2015 г. жизненное состояние древостоев ухудшилось по сравнению с 2010 г., а в дальнейшем снова наблюдалось улучшение их состояния. В 2019 г. доля здоровых деревьев увеличилась до $71 \pm 6.4\%$, при этом уменьшились доли деревьев разной степени поврежденности, что указывает на улучшение в целом состояния древостоев.

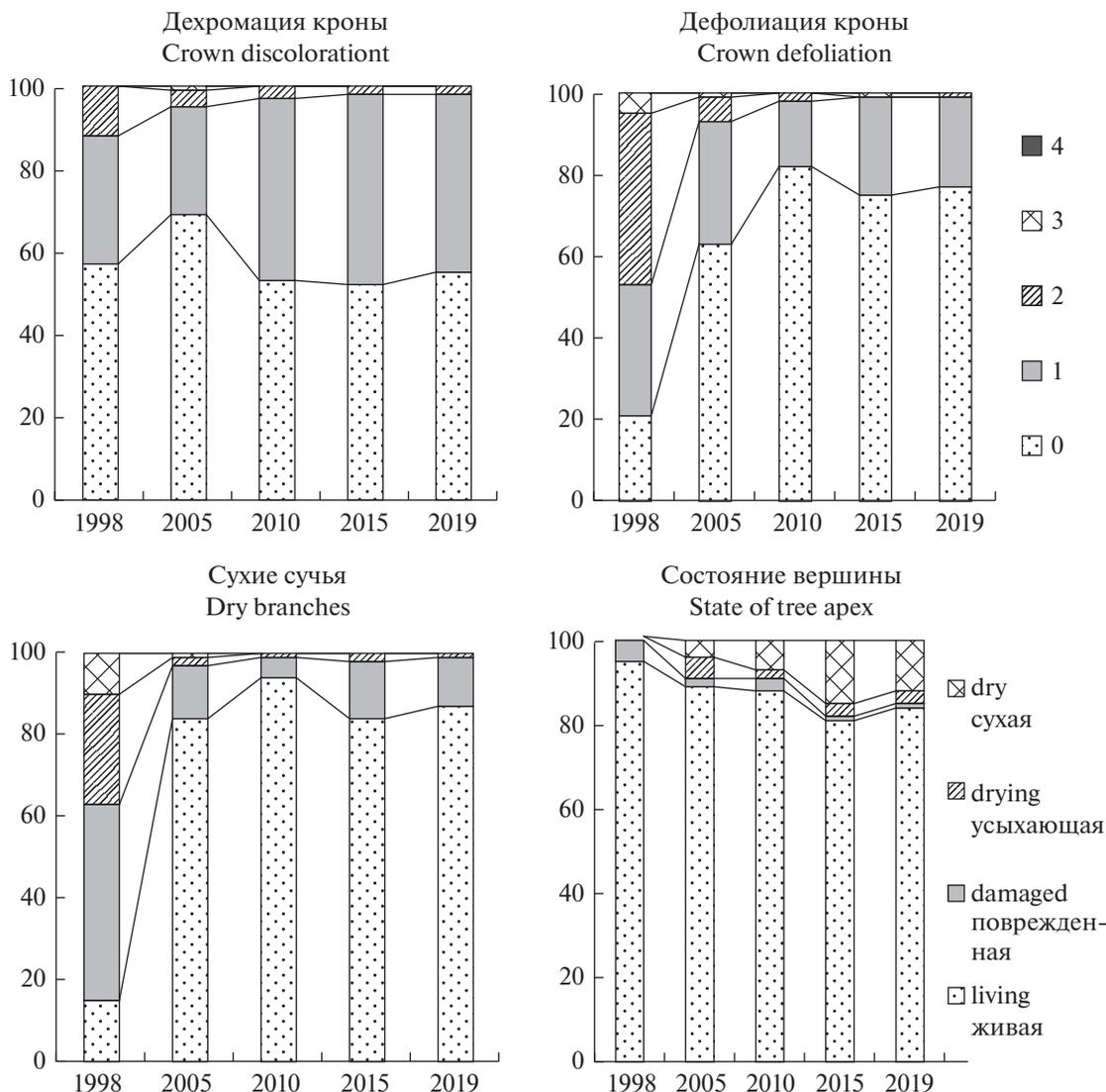


Рис. 2. Показатели состояния деревьев сосны обыкновенной в сосняках лишайниковых загрязненного района. Степень дехромации и дефолиации кроны, доля сухих ветвей: 0 – менее 10%, 1 – от 11 до 25%, 2 – от 26 до 60%, 3 – от 61 до 99%, 4 – 100%.

По горизонтали – год наблюдений; по вертикали – доля деревьев, %.

Fig. 2. The tree state indicators of Scotch pine in lichen pine forests of the contaminated area.

The degree of crown discoloration and defoliation, the proportion of dry branches: 0 – less than 10%, 1 – 11–25%, 2 – 26–60%, 3 – 61–99%, 4 – 100%.

X-axis – the years of observations; y-axis – the proportion of trees, %.

Индексы поврежденности

На фоновых участках индекс поврежденности древостоев сосны в 1998 г. варьировал от 0.59 до 0.77 (табл. 2), что характеризовало их как ослабленные. К 2005 г. ослабленным остался фитоценоз на ППП 28 из-за слома и усыхания вершин в результате повреждения их ветром. Сосняки на ППП 29 и 30 вошли в категорию “здоровые”. С 2010 до 2019 г. все древостои сосняков лишайниковых фоновой территории по индексу поврежденности характеризуются как здоровые.

Среднее значение индекса поврежденности древостоев импактной зоны в 2019 г. уменьшилось по сравнению с 1998 г. в 3.2 раза при диапазоне варьирования от 0.39 до 0.47 (табл. 2). Анализ динамики индексов поврежденности древостоев на этой территории за период с 1998 по 2019 гг. свидетельствует об улучшении жизненного состояния сосняков, произрастающих в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного производства АО “Монди СЛПК”. Если в 1998 г. исследуемые сосновые древостои были оценены

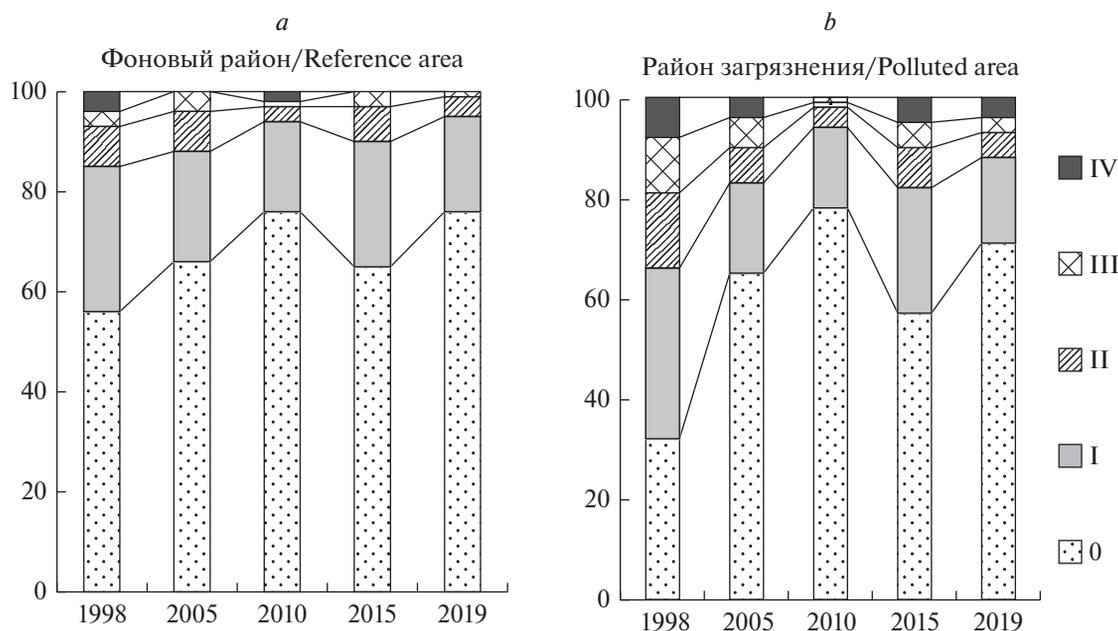


Рис. 3. Динамика виталитетной структуры древостоев сосняков лишайниковых в фоновом (а) и загрязненном (b) районах.

Категории состояния: 0 – <10%, I – от 11 до 25%, II – от 26 до 60%, III – от 61 до 99%, IV – 100% повреждений.

По горизонтали – год наблюдений; по вертикали – доля деревьев, %.

Fig. 3. Dynamics of the stands vitality structure in lichen Scots pine forests in the background (a) and polluted (b) areas.

Vitality categories: 0 – <10%, I – 11–25%, II – 26–60%, III – 61–99%, IV – 100% damage.

X-axis – year of observations; y-axis – proportion of trees, %.

как средне- и сильноповрежденные, в 2005 – как слабоповрежденные, то в 2010, 2015 и 2019 гг. – как здоровые.

Таким образом, в 2019 г. все исследованные сосновые древостои как фонового района, так и зоны воздействия аэротехногенных выбросов следует отнести к здоровым.

Значительное улучшение состояния древостоев в сосняках лишайниковых в импактной зоне в

период с 1998 по 2019 гг. произошло, в основном, за счет снижения степени дефолиации и дехромации крон деревьев. Однако значения этих параметров остаются в этом районе на более высоком уровне, чем в фоновом: в 2019 г. на фоновых территориях доля деревьев без дехромации хвои составила $71 \pm 6.4\%$, на загрязненных была достоверно ниже – $55 \pm 4.9\%$. Доля деревьев без потери хвои в фоне выросла до $85 \pm 7.7\%$, в импактной зоне – до $77 \pm 6.9\%$.

Таблица 2. Динамика индексов поврежденности сосновых древостоев, рассчитанных по запасу древесины, в фоновом районе и в условиях загрязнения среды выбросами “Монди СЛПК”

Table 2. The damage indices of Scots pine tree stands in the reference area and under pollution from Mondi SLPK, calculated on the sanding crop basis

Год наблюдений Year of observations	№ ППП и расстояние от АО “Монди СЛПК”, км Sample plot (Site) number and distance from Mondi SLPK, km					
	Site 13 (7.3 km)*	Site 14 (11.0 km)	Site 17 (11.2 km)	Site 28 (56.0 km)	Site 29 (51.0 km)	Site 30 (52.0 km)
1998	1.99	1.13	1.2	0.59	0.77	0.64
2005	0.85	0.70	0.68	0.66	0.42	0.49
2010	0.47	0.39	0.28	0.29	0.36	0.22
2015	0.37	0.50	0.40	0.30	0.50	0.40
2019	0.40	0.47	0.39	0.33	0.47	0.38

Примечание: * – здесь и в табл. 4 в скобках указано расстояние от “Монди СЛПК”.

Note: * – here and in the table 4 in brackets is the distance from Mondi SLPK.

Таблица 3. Распределение подроста сосны обыкновенной по категориям состояния в исследованных сосновых фитоценозах, экз./га

Table 3. Status categories of Scots pine undergrowth in Scots pine phytocoenoses, ind./ha

Номер ППП (расстояние от “Монди СЛПК”, км) Sample plot number (distance from Mondi SLPK, km)	Год наблюдений Year of observation	Всего Total	Жизненное состояние Life condition		
			благонадежный reliable	неблагонадежный unreliable	сухой dry
Сосновые леса в зоне действия выбросов АО “Монди СЛПК” Pine forests in the zone affected by Mondi SLPK emissions					
14 (11.0)	1998	758	629 (83%)	43 (6%)	86 (11%)
	2019	454	254 (56%)	54 (12%)	146 (32%)
17 (11.2)	1998	477	33 (7%)	233 (49%)	211 (44%)
	2019	508	283 (56%)	75 (15%)	150 (29%)
Сосновые леса фонового района Pine forests in the reference area					
29 (51)	1998	—	—	—	—
	2019	1082	1000 (92%)	75 (7%)	7 (1%)
30 (52)	1998	1134	400 (35%)	527 (47%)	207 (18%)
	2019	580	480 (83%)	87 (15%)	13 (2%)
28 (56)	1998	3030	1200 (39.5%)	1140 (37.5%)	690 (23%)
	2019	2046	1650 (81%)	125 (6%)	271 (13%)

Примечание: прочерк означает отсутствие данных.
Note: dash means no data.

На начальный период исследования (1998 г.) суммарное количество выбросов АО “Монди СЛПК” составило 31 тыс. т, поэтому одним из основных факторов, оказывающим влияние на развитие древостоев в этот период, предположительно было аэротехногенное загрязнение. По данным публичных экологических отчетов предприятия [9], количество выбросов уже к 2005 г. уменьшилось до 24 тыс. т и далее продолжало уменьшаться. За последние годы значительно (в 12 раз) уменьшились выбросы сероводорода и в 2 раза меркаптанов, отмечено сокращение эмиссии СО и специфических веществ.

Этими изменениями можно объяснить наблюдаемый характер динамики виталитетной структуры сосновых древостоев в период с 1998 по 2019 гг. Об улучшении их состояния свидетельствует увеличение доли здоровых деревьев и сокращение доли слабо- и сильноповрежденных как на загрязненной, так и на фоновой территориях. Динамика жизненного состояния древостоев на загрязненной и фоновой территориях имеет одинаковую направленность, поскольку все исследуемые фитоценозы находятся на одной стадии развития, произрастают в близких по типу условиях местообитания. Несмотря на то, что поврежденность сосняков лишайниковых на импактной территории к началу исследований была довольно высокой, имеющийся потенциал естественной устойчивости позволил им восста-

новиться при уменьшении уровня аэротехногенной нагрузки.

Состояние подроста

Под пологом исследуемых сосняков лишайниковых подрост состоит, в основном, из сосны обыкновенной, единично встречаются ель сибирская и береза. В ближнем к источнику эмиссии загрязняющих веществ сосняке мшисто-лишайниковом (ППП 13) подрост практически отсутствует. На территории импактной зоны небольшое количество подроста (454–758 экз га⁻¹), обнаружено в сосняках лишайниковых на ППП 14 и ППП 17 (табл. 3). В 1998 г. в сосняке на ППП 17, древостой которого отличается более высокой густотой (табл. 1) численность подроста была более низкой, чем на ППП 14, а в 2019 г. по этому показателю ППП 14 и 17 не различались. На фоновой территории подрост сосны представлен в целом более значительным числом особей – от 580 до 2046 экз./га. Однако следует отметить, что при близкой густоте древостоев на ППП 30 в фоновой зоне и на ППП 14 в импактной зоне численность подроста является сопоставимой (580–1134 экз га⁻¹ и 454–758 экз га⁻¹ соответственно). На ППП 28 и 29, отличающихся в 1.5–2 раза более низкой густотой древостоя, численность подроста превышает указанные величины в 2–4 раза (табл. 3).

Таблица 4. Индекс жизненного состояния (%) подроста сосны обыкновенной в сосняках фонового района и в условиях загрязнения выбросами “Монди СЛПК”**Table 4.** The vital state index of Scots pine undergrowth in the pine forests of the reference area and under pollution from Mondi SLPK

Год наблюдений Year of observation	Site 14 (11 km)	Site 17 (11.2 km)	Site 29 (51 km)	Site 30 (52 km)	Site 28 (56 km)
1998	86	31	–	59	63
2019	62	63	96	90	84

Примечание: прочерк означает отсутствие данных.
Note: Dash means no data.

Одним из показателей состояния возобновления является высотная структура подроста. Подрост обычно подразделяют по высоте на три категории крупности: мелкий – до 0.5 м, средний – от 0.6 до 1.5 м и крупный – более 1.5 м [23]. В сосняках лишайниковых как в пределах импактной зоны, так и на фоновой территории представлен преимущественно крупный подрост сосны и подрост средней высоты (рис. 4). В условиях загрязнения зоны в 2019 г. отмечалось отсутствие мелкого подроста сосны. В сосняках лишайниковых фонового района на ППП 28 и 29 мелкий подрост представлен в количестве от 264 до 438 экз. га⁻¹, однако преобладает крупный подрост. Следует также отметить, что в фоновом сосняке с более высокой полнотой древостоя (ППП 30) под пологом значительно преобладает подрост крупной категории, а численность новых поколений является очень низкой.

Оценка состояния подроста сосны (табл. 3) показала, что в 2019 г. в фоновом районе на всех пробных площадях преобладал (от 80 до 90%) “благонадежный” подрост, по сравнению с 1998 г. на ППП 28 и 30 его доля увеличилась примерно в 2 раза. Участие “неблагонадежного” подроста к 2019 г. сократилось в 3–6 раз (с 37–47 до 6–15%). Доля сухого подроста на фоновой территории в 2019 г. по сравнению 1998 г. сократилась с 18–23 до 2–13%.

В сосновом фитоценозе на ППП 14, подверженном влиянию аэротехногенного загрязнения, большую часть возобновления (83%) в 1998 г. также составлял “благонадежный” подрост. К 2019 г. его доля уменьшилась до 56%, при этом возросло участие “неблагонадежного” (с 6 до 12%) и сухого (с 11 до 32%) подроста. В сосняке импактной зоны на ППП 17 доля “благонадежного” подроста с 1998 по 2019 гг., напротив, многократно увеличилась (с 7 до 56%), а доля “неблагонадежного” снизилась примерно в 3 раза (с 49 до 15%). В сосняках зоны загрязнения довольно много сухого подроста. Его доля за период исследования на ППП 14 увеличилась в 3 раза (с 11 до 32%), а на ППП 17 несколько снизилась (с 44 до 29%). В целом в 2019 г. в сосняках лишайниковых в условиях загрязне-

ния доля участия “благонадежного” подроста (56%) была существенно ниже, чем в фоновом районе (80–90%).

В 1998 г. по величине индекса жизненного состояния подрост сосны на ППП 14 и 17, расположенных в зоне аэротехногенного воздействия, мог быть охарактеризован соответственно как здоровый и сильно ослабленный, в 2019 г. – как ослабленный (табл. 4). В сосняках на фоновой территории в 1998 г. индекс жизненного подрост сосны составил от 59 до 63% (ослабленный), а в 2019 г. – от 84 до 96%, что характеризует его как здоровый.

Естественное возобновление леса является динамичным процессом, а его успешность определяется типом леса, структурой насаждения и биологическими особенностями древесных пород. Результаты исследования возобновления сосны в сосняках лишайниковых загрязненной территории показали, что на данный момент лесовозобновление недостаточное, подрост по состоянию характеризуется как ослабленный, при этом мелкий подрост полностью отсутствует. Это может быть вызвано не только действием загрязнения, но и конкуренцией с древостоем за ресурсы минерального питания [21]. В то же время подрост сосны в сосняках фонового района по индексу жизненного состояния характеризуется как здоровый.

Лесовозобновительный процесс в лесных фитоценозах во многом определяется количеством и качеством семян, поступивших в почву [24]. Известно, что в условиях аэротехногенного загрязнения наблюдаются нарушения в репродуктивной деятельности растений [25–27]. Показано также, что в лесных сообществах корневая конкуренция со стороны древостоя является одним из факторов, определяющих развитие подроста, и имеет особое значение в том случае, когда какой-нибудь фактор находится в минимуме. В сосняках лишайниковых исследуемого региона к этим факторам относится бедность почвы элементами питания и также недостаток влаги в отдельные периоды наблюдений [21, 22]. Ослабление и гибель соснового подроста под пологом материн-

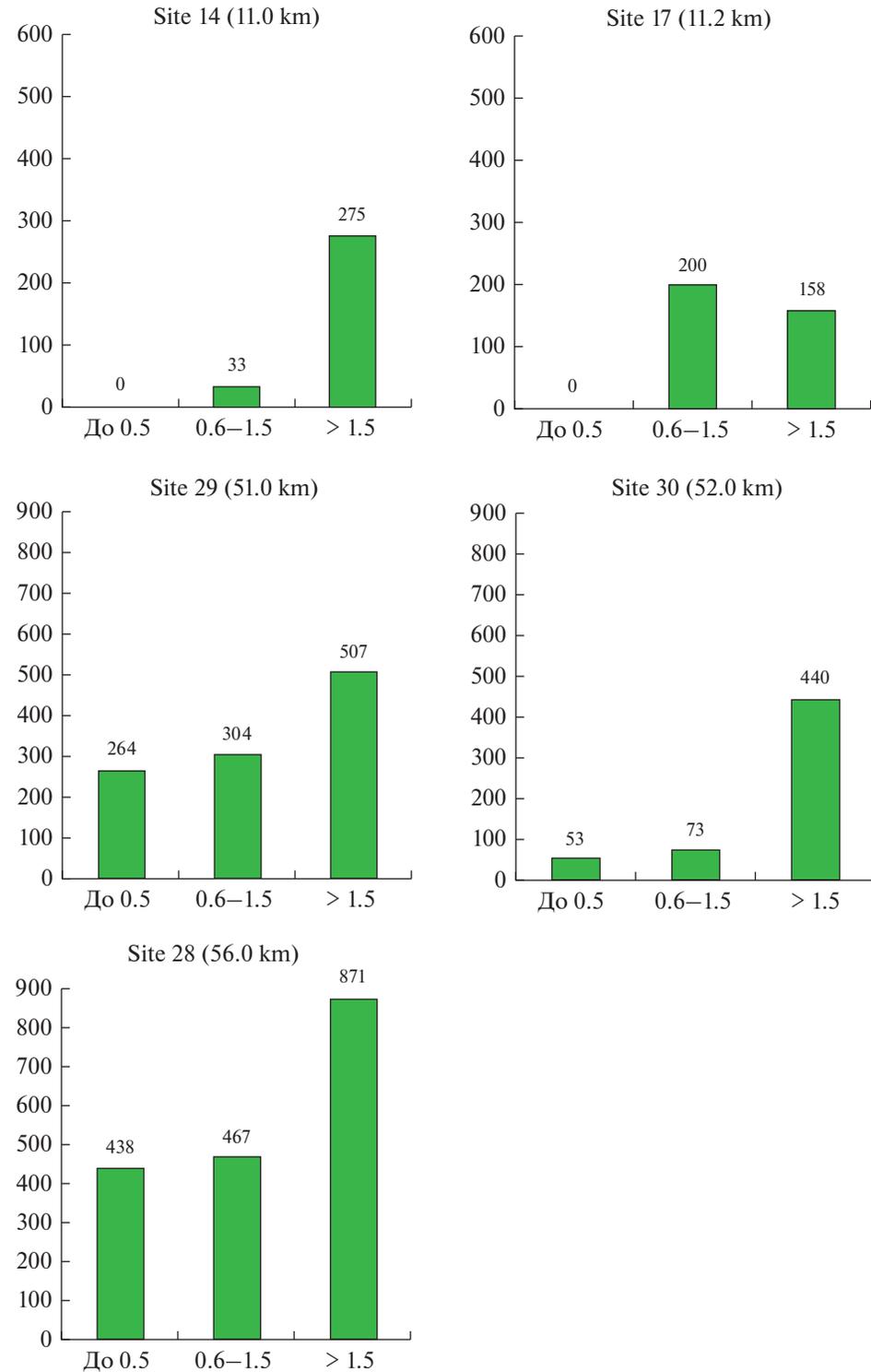


Рис. 4. Распределение подроста сосны обыкновенной по высоте в сосновых древостоях загрязненной (ППП 14, 17) и фоновой (ППП 28, 29, 30) территорий (данные 2019 г.).

По горизонтали – высота, м; по вертикали – количество подроста, экз./га.

Fig. 4. Height distribution of Scots pine undergrowth in pine stands of the polluted (Site 14, 17) and background (Site 28, 29, 30) territories (2019 data).

X-axis – height, m; y-axis – number of undergrowth, ind./ha.

ского древостоя сосняков лишайниковых в импактной зоне, видимо, определяется, с одной стороны, корневой конкуренцией между древостоем и подростом за питательные элементы и влагу, с другой — аэротехногенным загрязнением выбросами целлюлозно-бумажного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведены итоги 20-летнего (1998–2019 гг.) мониторинга состояния древостоев сосняков лишайниковых в условиях аэротехногенного загрязнения выбросами целлюлозно-бумажного производства АО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” (Республика Коми), функционирующего с 1969 г. В начале исследований по совокупности показателей жизненного состояния древостоя и подроста сосновые древостои в районе аэротехногенного загрязнения были охарактеризованы как слабо- и среднеповрежденные. За период исследований в связи со снижением объема аэротехногенных выбросов выявлено улучшение жизненного состояния древостоев в пределах импактной зоны. В 2005 г. древостои сосняков лишайниковых, произрастающих на загрязненных участках, характеризовались как слабоповрежденные, в период с 2010 по 2019 гг. — как здоровые.

Для сосняков лишайниковых импактной зоны характерно нарушение лесовозобновительного процесса. Если по общей численности подростов при одинаковой густоте древостоя существенных различий между сосняками импактной и фоновой зон нет, то по высотной структуре выявлены заметные различия. В составе соснового подростов на территории импактной зоны отсутствуют малоразмерные особи высотой менее 0.5 м, которые представляют наиболее молодые поколения. По индексу жизненного состояния подрост сосны в условиях зоны загрязнения характеризуется как “ослабленный”, на фоновой территории — как “здоровый”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России” (122040100031-8) и хозяйственной темы “Оценка долговременного влияния АО “Монди СЛПК” на биологическое разнообразие в районе производства” (договор № 45-2018 от 24 апреля 2018 г.).

Выражаем благодарность Н.В. Торлоповой, принимавшей активное участие в сборе и анализе экспериментального материала в разные периоды исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.С. 1997. Мониторинг лесных экосистем. СПб. 116 с.
2. Алексеев А.С. 2003. Мониторинг лесных экосистем. 2-е изд. СПб. 215 с.
3. Ярмишко В.Т., Баккал И.Ю., Борисова О.В., Горшков В.В., Катютин П.Н., Лянгузова И.В., Мазная Е.А., Ставрова Н.И., Ярмишко М.А. 2009. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб. 276 с.
4. Леса Республики Коми. 1999. М. 332 с.
5. Яблоков А.В. 1987. Популяционная биология. М. 303 с.
6. Алексеев А.С. 1990. Анализ экологической структуры популяции *Picea abies* (Pinaceae) в условиях атмосферного загрязнения. — Бот. журн. 75(9): 1277–1284.
7. Ярмишко В.Т., Горшков В.В., Ставрова Н.И. 2003. Виталитетная структура *Pinus sylvestris* L. в лесных сообществах с разной степенью и типом антропогенной нарушенности. — Растительные ресурсы. 39(4): 1–19.
8. Семечкин И.В. 1970. Динамика возрастной структуры древостоев и методы ее изучения. — В кн.: Вопросы лесоведения. Красноярск. Т. 1. С. 422–446.
9. Экологические отчеты 2006, 2009–2010, 2013–2015. Mondi Сыктывкарский ЛПК <https://www.mondigroup.com/en/sustainability/sustainability-reports-and-publications/>
10. Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А. 2003. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса). Екатеринбург. 147 с.
11. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest.* 1994. Hamburg, Prague. 177 p.
12. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. Part III.* 2002. <http://www.icp-forests.org/pdf/manual3.pdf>
13. *Forêts déperissement et pollution atmosphérique à longue distance: Résultats de la notation 1992 du réseau CEE en France.* 1993. — La forêt privée. 211: 61–63.
14. Kandler O. 1993. Air pollution and forest decline in Central Europe. — 15th Int. Bot. Cong.: Abstr. Yokogama, P.58.
15. Bullarin-Denti A., Cocucci S.M., Di Girolamo F. 1998. Environmental pollution and forests stress: A multidisciplinary approach study on alpine forest ecosystems. — Chemosphere. 4–5: 1049–1054. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)10170-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)10170-9)
16. Захаров В.К. 1967. Лесная таксация. М. 406 с.

17. *ОСТ 56-69-83*. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. 1983. М. 60 с.
18. *Лесотаксационный справочник для Северо-Востока европейской части СССР*. 1986. Архангельск. 358 с.
19. *Алексеев В.А.* 1989. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. — *Лесоведение*. 4: 51–57.
20. *Мелехов И.С., Корконосова Л.И., Чертовской В.Г.* 1965. Руководство по изучению типов концентрированных вырубок. 2-е изд. М.: Наука. 180 с.
21. *Листов А.А.* 1986. Боры беломошники. М.: Агропромиздат. 181 с.
22. *Верхоланцева Л.А.* 1965. О влажности почв сухих боров. — *Тр. Коми филиала АН СССР*. 14: 49–56.
23. *Мелехов И.С.* 1989. Лесоводство. М.: Агропромиздат. 302 с.
24. *Мелехов И.С.* 1960. Рубки и возобновление леса на Севере. Архангельск. 180 с.
25. *Федотов И.С., Карабань Р.Т., Тихомиров Ф.А., Сисигина Т.И.* 1983. Оценка действия двуокиси серы на сосновые насаждения. — *Лесоведение*. 6: 23–27.
26. *Ставрова Н.И.* 1990. Семеношение сосны. — Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова. Л. С. 94–103.
27. *Васфилов С.П.* 2005. Влияние загрязнения воздуха на сосну обыкновенную. Екатеринбург. 212 с.

Monitoring the State of Scots Pine in Lichen Pine Forests Affected by Emissions from Mondi Syktyvkar Timber Industry Complex (Komi Republic)

E. A. Robakidze^{a, *}, K. S. Bobkova^a

^a*Institute of Biology of Komi Science Centre, Ural Branch RAS, Syktyvkar, Russia*

^{*}*e-mail: robakidze@ib.komisc.ru*

Abstract—The paper reviews the results of the 1998–2019 studies on the effect of the aerotechnogenic pollution from the pulp and paper production of the JSC Mondi Syktyvkar Timber Industry Complex (Mondi SLPK) operating since 1969, on the vital state of trees, tree stands and undergrowth in lichen pine forests located at different distances from the source of emission. Within the observation period, we did not find any changes in composition of pine stands both in the affected zone and background areas. At the beginning of our studies, pine phytocenoses in the area affected by air pollution were characterized as slightly and moderately damaged by the majority of vital state parameters. From 1998 to 2019, the vital state of stands growing both in the pulp and paper mill-impacted zone and in the background area improved. In 2005, lichen pine forests growing in the polluted zone were characterized as slightly damaged, and in 2010–2019 — as healthy. In 2019, as compared to 1998, the damage indices of stands in the impacted zone decreased by 3.2 times and ranged from 0.37 to 0.50. In the emission zone, forest regeneration in lichen pine forests is weak. The undergrowth is mostly formed by pine trees of different height, but small trees are absent. In the impacted areas, the density of undergrowth decreased, as compared to the background territory. According to the vital state index, the undergrowth in the affected zone is rated as weakened, and in the background area — as healthy.

Keywords: monitoring, aerial anthropogenic pollution, lichen pine forests, stand vital state, defoliation, discoloration, damage index, undergrowth

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the research theme “Zonal patterns of the structural and productivity dynamics of primary and anthropogenically modified forest and peat ecosystems of the European North-East of Russia” (122040100031-8) and the contract-based theme “Assessment of the long-term effects of the JSC Mondi SLPK on the biological diversity of the production area” (contract no. 45-2018 dated by April 24, 2018).

The authors are grateful to N.V. Torloпова for her involvement in collecting and analyzing the experimental material in different periods of research.

REFERENCES

1. *Alekseev A.S.* 1997. [Monitoring of forest ecosystems]. Saint Petersburg. 116 p. (In Russian)
2. *Alekseev A.S.* 2003. [Monitoring of forest ecosystems]. 2nd edition. Saint Petersburg. 215 p. (In Russian)
3. *Yarmishko V.T., Bakkal I.Yu., Borisova O.V., Gorshkov V.V., Katyunin P.N., Lyanguzova I.V., Maznaya E.A., Stavrova N.I., Yarmishko M.A.* 2009. [Dynamics of forest communities in Northwest Russia]. — Saint Petersburg. 276 p. (In Russian)
4. [*Forests of the Komi Republic*]. 1999. Moscow. 332 p. (In Russian)
5. *Yablokov A.V.* 1987. [Population biology]. Moscow. 303 p. (In Russian)

6. *Alekseev A.S.* 1990. Analysis of ecological structure of the *Picea abies* (Pinaceae) population growing under atmospheric pollution. – Bot. zhurn. 75(9): 1277–1284. (In Russian)
7. *Yarmishko V.T., Gorshkov V.V., Stavrova N.I.* 2003. *Pinus sylvestris* L. vital state structure in the tree layer of pine forest with different degree and type of anthropogenic disturbance (Kola Peninsula). – Rastitelnye resursy. 39(4): 1–19. (In Russian)
8. *Semechkin I.V.* 1970. Dynamics of age structure of forest stands and methods of her studying. In: [Problems of forest science]. Vol. 1. Krasnoyarsk. 422–446. (In Russian)
9. *Sustainability reports.* 2006, 2009–2010, 2013–2015. Mondi Syktyvkar LPK. <https://www.mondigroup.com/en/sustainability/sustainability-reports-and-publications/>
10. *Torloпова N.V., Robakidze E.A.* 2003. [The effect of pollutants on coniferous phytocenoses (by the example of the Syktyvkar timber complex)]. Ekaterinburg. 147 p. (In Russian)
11. *Manual* on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. 1994. Hamburg, Prague. 177 p.
12. *Manual* on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. Part III. 2002. <http://www.icp-forests.org/pdf/manual3.pdf>
13. *Forêts dépérissement et pollution atmosphérique à longue distance: Résultats de la notation 1992 du réseau CEE en France.* 1993. – La forêt privée. 211: 61–63.
14. *Kandler O.* Air pollution and forest decline in Central Europe. 1993. – 15th Int. Bot. Cong.: Abstr. Yokogama, P. 58.
15. *Bullarin-Denti A., Cocucci S.M., Di Girolamo F.* 1998. Environmental pollution and forests stress: A multidisciplinary approach study on alpine forest ecosystems. – Chemosphere. 4–5: 1049–1054. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)10170-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)10170-9)
16. *Zakharov V.K.* 1967. [Forest taxation]. Moscow. 406 p. (In Russian)
17. *Industry Standard 56-69-83.* [Forest inventory plots. Methods for establishing]. 1983. Moscow. 60 p. (In Russian).
18. [Forest mensuration manual for the Northeast of the European part of the USSR]. 1986. Arkhangelsk. 358 p. (In Russian).
19. *Alekseev V.A.* 1989. [Diagnostics of a vital state of trees and forest stands]. – Lesovedenie. 4: 51–57. (In Russian)
20. *Melekhov I.S., Korkonosova L.I., Chertovskij V.G.* 1965. [Types of concentrated cuttings study guide]. Moscow. 180 p. (In Russian)
21. *Listov A.A.* 1986. [Lichen pine forests]. Moscow. 181 p.
22. *Verkholantseva L.A.* 1965. [On the soil moisture in dry lichen pine forests]. – Trudy Komi Filiala AN SSSR. 14: 49-56. (In Russian)
23. *Melekhov I.S.* 1989. [Forestry]. Moscow. 302 p.
24. *Melekhov I.S.* 1960. [Cutting and renewal of the forests in the north]. Arkhangelsk. 180 p. (In Russian)
25. *Fedotov I.S., Karaban R.T., Tikhomirov F.A., Sisigina T.I.* 1983. [Assessment of the sulfur dioxide effect on pine plantations]. – Lesovedeniye. 6: 23–27. (In Russian)
26. *Stavrova N.I.* 1990. [Pine seed]. In: [Effects of industrial atmospheric pollution on pine forests of the Kola Peninsula]. Leningrad. P. 94–103. (In Russian)
27. *Vasfilov S.P.* 2005. [The effect of air pollution on the pine]. Ekaterinburg. 212 p. (In Russian)

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ И КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ЭКСПЛАНТОВ *PINUS SYLVESTRIS* (PINACEAE)

© 2022 г. М. А. Ершова¹*, Р. В. Игнатенко¹, Е. В. Новичонок¹, О. В. Чирва¹, Н. А. Галибина¹

¹Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, Россия

*e-mail: maria_ershova_karnc@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

Несмотря на существование достаточного количества протоколов для получения соматических зародышей *Pinus sylvestris* L., данные о влиянии предварительной стерилизации растительных эксплантов на инициацию соматического эмбриогенеза практически отсутствуют. В ходе исследования были подобраны оптимальные сроки сбора незрелых шишек и выбран безопасный и эффективный протокол предварительной стерилизации незрелых семян. Согласно полученным данным, “временное окно”, при котором стадия развития зиготического зародыша подходит для введения растительного материала в культуру *in vitro* на Петрозаводской лесосеменной плантации I порядка (Карелия) в 2020 г. приходилось на конец третьей декады июня—второй декады июля (при сумме эффективных температур 406.8–655.5 градусо-дней соответственно (при базовой температуре 5 °C)). Тогда как в 2021 г. период, подходящий для взятия образцов, был короче (третья декада июня—первая декада июля (400.7–664.7 градусо-дней)). Наряду с этим представлены результаты по изучению влияния различных типов стерилизующих агентов (70% этанол, перманганат калия, гипохлорит натрия (коммерческий отбеливатель “Белизна”), перекись водорода), их концентраций и времени воздействия на всхожесть зрелых семян *P. sylvestris*. Установлено отрицательное влияние раствора 70% этанола на данный показатель. Всхожесть зрелых семян после такой обработки не превышала 20%. У обработанных раствором этанола незрелых семян после двух месяцев в культуре *in vitro* не наблюдались признаки развития или гибели. В то время как растворы коммерческого отбеливателя “Белизна” и перекиси водорода в различных концентрациях (до 20%) не влияли на всхожесть семян (всхожесть семян 40 и 49% соответственно, контроль 49%). Также был апробирован метод стерилизации зеленых шишек, без дальнейшей обработки семян, и введение в культуру *in vitro* мегагаметофитов *P. sylvestris*. Такой вариант обработки оказался эффективным, контаминации за время культивирования мегагаметофитов зафиксировано не было.

Ключевые слова: соматический эмбриогенез, стерилизация растительного материала, *Pinus sylvestris*, культура *in vitro*, Карелия

DOI: 10.31857/S0033994622040057

Сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. — один из самых распространенных и хозяйственно ценных видов хвойных растений в мире, ее древесина широко востребована, особенно в странах Северной Европы [1]. Попытки использовать методы классической селекции для получения сосны обыкновенной с заданной для нужд лесоперерабатывающей промышленности древесиной пока не дают желаемого результата. Данный вид с трудом поддается вегетативному размножению методом черенкования, в связи с чем методы биотехнологии являются наиболее перспективными для его массового размножения [2, 3].

Соматический эмбриогенез — перспективный биотехнологический метод массового тиражирования растений. Свое применение соматический эмбриогенез нашел как для размножения куль-

турных растений [4–7], так и для размножения редких и исчезающих видов [8–10]. Особенно актуально использование данного метода для медленнорастущих древесных растений, а также в программах лесной селекции [3, 11]. Преимуществом соматического эмбриогенеза является то, что большое число генетически идентичных соматических зародышей в культуре *in vitro* может быть получено в течение всего года.

К настоящему моменту разработаны достаточно подробные протоколы для получения соматических зародышей сосны обыкновенной [12–16]. Однако, по сравнению с другими представителями рода *Pinus*, сосна обыкновенная остается трудным видом для размножения путем соматического эмбриогенеза, в связи с чем оптимизация протоколов получения соматических зародышей для

нее до сих пор актуальна [3]. Ряд сложностей существует на стадии инициации: короткий промежуток времени, в течение которого экспланты вводятся в культуру *in vitro*, низкая частота инициации эмбрионного каллуса, подбор генотипов, обладающих компетентностью к соматическому эмбриогенезу [15, 17, 18]. Некоторые авторы отмечают, что поражение растений бактериальной и грибной инфекцией, которая часто встречается во всех тканях и органах хвойных, также сильно усложняет культивирование [19] и может выступать в роли факторов, лимитирующих рост и жизнедеятельность клеточных культур [20]. В связи с этим, важным этапом является подбор оптимального протокола предварительной стерилизации растительных эксплантов.

В литературе имеются сведения об использовании различных стерилизующих агентов для обработки растительного материала представителей семейства Pinaceae: этиловый спирт, гипохлорит натрия (кальция), диацид, перманганат калия, йод, а также растворы различных коммерческих моющих средств [14–16, 21–25]. Однако информация об их последующем влиянии на инициацию соматического эмбриогенеза встречается редко.

Целью нашего исследования стало определение оптимальных сроков сбора шишек *Pinus sylvestris* в условиях южной Карелии и подбор условий стерилизации растительного материала для введения в культуру *in vitro*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования служили незрелые семена шестнадцати клонов плюсовых деревьев *P. sylvestris*, располагающихся в среднетаежной подзоне Карелии на Петрозаводской лесосеменной плантации I порядка (ЛСП I) (61.92° с.ш.; 34.41° в.д.). Шишки собирали на разных стадиях формирования зиготического зародыша с конца июня по начало августа 2020 и 2021 гг. Стадию развития зиготического зародыша определяли с помощью стереомикроскопа (Leica, Германия).

Поскольку период сбора незрелых семян для введения в культуру весьма ограничен, часть исследований (определение влияния стерилизующих агентов на всхожесть семян и контаминацию) проводили на зрелых семенах *P. sylvestris*, сбор которых производился в 2017 г. с деревьев, произрастающих в естественных фитоценозах (Олонецкий р-н Республики Карелия). Данные семена были предоставлены отделом “Карельская лесосеменная станция” филиала ФБУ Рослесозащита ЦЗЛ Ленинградской обл.

Стерилизация незрелых семян

В рамках исследования было апробировано три способа предварительной обработки растительного материала.

В 2020 г. для предварительной обработки незрелых семян был использован протокол, подобранный на основе исследований Третьяковой с соавт. [2, 22, 24, 26], и применяющийся при обработке семян *Pinus pumila*, *Pinus sibirica*, *Larix* sp. Зеленые шишки вскрывали с помощью скальпеля и доставали незрелые семена. Семена заворачивали в марлевые мешочки и помещали в 15% мыльный раствор на 10 мин, после чего промывали под проточной водой в течение 3 мин. Марлевые мешочки с семенами переносили в 0.3% раствор перманганата калия на 10 мин и далее промывали дистиллированной водой в трехкратной повторности. Затем в условиях стерильного бокса микробиологической безопасности семена обрабатывали 70% этанолом (10 мин), трехкратно промывали стерильной дистиллированной водой и обрабатывали 15% раствором перекиси водорода (5 мин), с последующей трехкратной промывкой.

В 2021 г. незрелые семена извлекали из шишек, заворачивали в марлевые мешочки и обрабатывали в мыльном растворе в течение 10 мин, затем, после промывания под проточной водой, в стерильных условиях семена помещали в раствор “Белизны” на 10 мин. Далее семена промывали в трех порциях стерильной дистиллированной воды, после чего обрабатывали 20% раствором перекиси водорода в течение 10 мин с последующей трехкратной промывкой стерильным дистиллятом.

Также в 2021 г. была апробирована методика по стерилизации зеленых шишек *P. sylvestris*. Шишки, собранные в июне, 1.5 мес. хранили при низких положительных температурах (4 °С) в холодильнике. Для обработки шишек были опробованы два протокола по стерилизации, описанные Lelu с коллегами [27] и Abrahamsson с соавт. [16]. Согласно первому, шишки помещали в 95% раствор этанола с добавлением капли Твин 20 и выдерживали в течение 20 мин, после чего промывали в стерильной дистиллированной воде. По второму протоколу зеленые шишки 1–2 мин обрабатывали 70% этанолом, затем перемещали в разбавленный коммерческий отбеливатель (содержащий 0.5% гипохлорит натрия), дополненный парой капель Твин 20 на 20 мин. После поверхностной стерилизации согласно описанным протоколам, шишки вскрывали и извлекали незрелые семена в стерильных условиях. Семена ничем не обрабатывали.

Таблица 1. Варианты и продолжительность стерилизующей обработки зрелых семян
Table 1. Types and duration of sterilization treatments applied to mature seeds

№	Мыло Soap	KMnO ₄ 10%	“Белизна” commercial bleach “Belizna”	C ₂ H ₅ OH 70%	H ₂ O ₂ 15%	H ₂ O ₂ 20%	HCl 0.1N%	
1	10	—	10	5	5	—	—	
2		—	10	5	—	—	—	
3		—	—	5	5	—	—	
4		—	—	5	—	—	—	
5		—	—	—	5	—	—	
6		—	—	—	—	5	—	
7		10	—	—	10	5	—	
8		—	—	10	—	—	7	10
9		—	—	10	—	—	10	—
10		—	—	10	—	5	—	—
Контроль Control	—	—	—	—	—	—	—	

Примечание: продолжительность обработки стерилизующим компонентом указана в минутах.
 Note: The duration of the sterilization treatment is indicated in minutes.

Введение мегаспорофитов в культуру in vitro

Из незрелых семян извлекали мегаспорофиты, содержащие зиготические зародыши, которые помещали на поверхность питательной среды DCR с модификацией [28], содержащей 9 мМ 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2.4 D) и 4.4 мМ 6-бензиламинопурина (6-БАП) [16]. В качестве загустителя использовали Gelrite 3.5 г/литр питательной среды. Также среда содержала антибиотик широкого спектра Цефотоксим. Экспланты на питательных средах помещали в термостат и культивировали в темноте при температуре 22 ± 1 °С. Регистрацию заражения проводили каждые три дня.

Стерилизация зрелых семян

В исследовании использовали наиболее часто встречающиеся в литературе и более доступные стерилизующие растворы, которые применяются при соматическом эмбриогенезе хвойных [2, 22, 24, 29–33 и др.].

Зрелые семена *P. sylvestris* выдерживали в 15% мыльном растворе в течение 10 мин и промывали под проточной водой, затем в условиях бокса микробиологической безопасности семена обрабатывали в соответствии с методиками, представленными в таблице 1, с трехкратной промывкой в стерильной дистиллированной воде между использованием различных агентов.

Влияние различных концентраций и времени воздействия перекиси водорода изучали отдельно от других стерилизующих агентов, так как в литературе описан широкий диапазон концентраций,

используемых при обработке растительного материала [30, 31, 33]. Зрелые семена в стерильных условиях обрабатывали раствором перекиси водорода в концентрациях 5, 7, 10, 15, 20% и экспозиции для каждой концентрации — 5, 6, 7, 8, 10 мин, затем промывали три раза в стерильной дистиллированной воде.

Оценка всхожести и энергии прорастания обработанных семян

Обработанные семена в условиях ламинар-бокса помещали по 30 штук в чашки Петри на двухслойную фильтровальную бумагу, смоченную стерильной дистиллированной водой. Семена проращивали на свету при комнатной температуре. Энергию прорастания определяли на 7 сут, всхожесть на 15 сут в соответствии с ГОСТ 13056.6-97 [34]. Повторность опыта трехкратная. Контаминацию оценивали на 7 сут исследования.

Математическая обработка данных

Статистическая обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась в программе PAST. Сравнение выборок проводилось с использованием непараметрического критерия Манна–Уитни. Различия считали достоверными при уровне значимости $p \leq 0.05$.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП “Карельский научный центр” и при поддержке НОЦ “Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования”.

Таблица 2. Сумма эффективных температур (градусо-дней) в летний сезон 2020 и 2021 гг. на ЛСП I
Table 2. The effective temperatures sum (number of degree days) in summers of 2020 and 2021 at Petrozavodsk seed orchard

2020 год 2020			2021 год 2021		
дата date	сумма градусо-дней sum of degree-days	стадия развития зиготического зародыша stage of the zygotic embryo development	дата date	сумма градусо-дней sum of degree-days	стадия развития зиготического зародыша stage of the zygotic embryo development
01.06	109.4	1	01.06	162	1–2
11.06	225.3	2	11.06	276.1	2–3
21.06	340.8	3	20.06	400.7	3–4
27.06	406.8	3–4	21.06	422.6	3–4
01.07	444.1	4–5	01.07	593.0	5
11.07	555.8	5	06.07	664.7	5–6
20.07	655.5	5–6	11.07	761.3	7–8
21.07	669.4	6–7	21.07	926.7	9
01.08	787.6	8–9	01.08	1057.7	

Примечание: полужирным шрифтом выделены оптимальные суммы эффективных температур для сбора зеленых шишек. Стадия развития зиготического зародыша указана согласно данным Pullman и Webb (рис. 1) [37].

Note: In boldface – the optimum accumulation of effective temperatures for collecting green cones. The zygotic embryo development stages are denoted according to Pullman and Webb (Fig. 1) [37].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение оптимальной даты сбора шишек для введения мегегаметофитов в культуру in vitro в 2020–2021 г.

У видов рода *Pinus* в качестве эксплантов обычно используют мегегаметофиты с незрелыми зиготическими зародышами до стадии дифференцировки семядолей [16]. Согласно данным литературы, инициация каллусообразования в культуре *in vitro* у *P. sylvestris* отмечается при сборе шишек в период, соответствующий сумме эффективных температур 402–650 градусо-дней (при базовой температуре 5 °C) [15, 35, 36]. В результате проведенных исследований установлено, что на ЛСП I в 2020 г. оптимальный период для сбора незрелых шишек составлял 24 дня (с 27.06 по 20.07), тогда как в 2021 г. “временное окно” сократилось до 17 дней (с 20.06 по 06.07). В табл. 2 представлены значения сумм среднесуточных температур на начало каждой декады, начало и конец оптимального периода согласно данным литературы [15, 35, 36], а также стадия развития зиготического зародыша [37]. Подобное “временное окно” необходимо отслеживать ежегодно.

Введение мегегаметофитов в культуру in vitro в 2020 г.

В 2020 г. для определения стадий развития зиготических зародышей на ЛСП I с июня по начало августа были собраны зеленые шишки. Формирование зиготического зародыша – постепенный

многоэтапный процесс, в результате которого на одном конце гипокотила формируются семядоли, на другом зародышевый корешок [18].

Стадии развития зиготических зародышей подробно описаны в литературе для *Pinus taeda* [37, 38]. Авторы отмечают, что наиболее подходящими для введения в культуру *in vitro* являются 2–4 стадии развития зиготических зародышей (рис. 1). Согласно данным других исследователей, зиготические зародыши до дифференцировки семядолей являются оптимальными для инициации соматического эмбриогенеза [16]. Начиная со стадии 6 (рис. 1), у зародыша формируются семядоли, которые развиваются в семядольные листья. Stasolla и Yeung [39] отмечают, что у представителей рода *Pinus* крайне тяжело происходит перестройка программы развития, и более ранние стадии имеют больше шансов на дедифференцировку, а затем и на образование пролиферирующих проэмбриогенных масс [40, 41], и, следовательно, на получение соматических зародышей.

В рамках проведенного исследования мы наблюдали развитие мегегаметофитов (рис. 2): от прозрачного и мягкого, до белого плотного эндосперма. В развитии зиготического зародыша были отмечены следующие изменения: зародыш становился белым и непрозрачным, находился на халазальном конце коррозийной полости (стадия 3, рис. 1), затем его вершина принимала куполообразную форму (стадия 4, рис. 1). На следующей стадии отчетливо был виден примордиум апикальной меристемы (стадия 5, рис. 1) [37, 38].

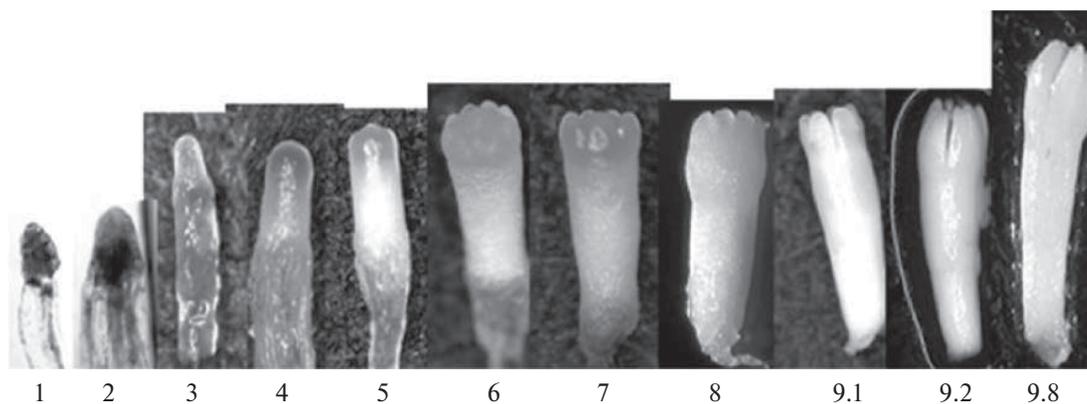


Рис. 1. Последовательность стадий развития зиготического зародыша у *Pinus taeda* [38]. Цифрами 1–9.8 обозначены стадии развития зародыша.

Fig. 1. Sequence of the zygotic embryo development in *Pinus taeda* [38]. The numbers 1–9.8 indicate the stages of zygotic embryo development.

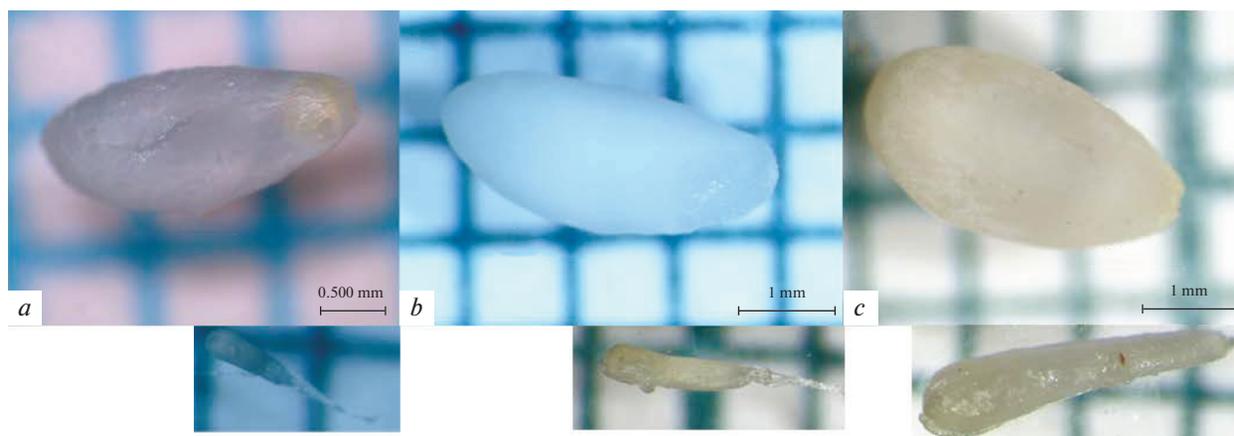


Рис. 2. Мегagamетафиты и находящиеся в них зародыши *Pinus sylvestris* введенные в культуру *in vitro*. *a* – мегagamетафит и зиготический зародыш на 4 стадии развития; *b* – на 5 стадии развития; *c* – на 9 стадии развития. Масштабная линейка: *a* – 0.5 мм; *b–c* – 1 мм.

Fig. 2. *Pinus sylvestris* megagametophytes and embryos introduced into *in vitro* culture. *a* – megagametaphyte and zygotic embryo at the 4th stage of development; *b* – at the 5th stage of development; *c* – at the 9th stage of development. Scale bar: *a* – 0.5 mm; *b–c* – 1 mm.

В более поздний период (конец июля–начало августа) регистрировали 6–8 стадии развития зиготического зародыша. На данных стадиях у зародыша были отчетливо видны развивающиеся семядоли (рис. 1).

В летний сезон 2020 г. после двух месяцев культивирования инициация соматического эмбриогенеза не регистрировалась. Заражение также отсутствовало, никаких признаков развития и/или гибели мегagamетофитов мы не наблюдали. Вероятно, причиной полученного результата стало негативное влияние стерилизующих растворов, используемых в исходном протоколе предварительной стерилизации. Для проверки этой гипотезы было изучено влияние разных способов стерилизации на всхожесть зрелых семян *P. sylvestris*.

Способы стерилизации зрелых семян

Подбор условий стерилизации является важнейшим этапом в процессе культивирования растительных тканей. Исследователям необходимо не допустить контаминации в культуре *in vitro* и при этом сохранить жизнеспособность эксплантов. В литературе [14, 16, 27, 30, 33, 42] встречается множество протоколов предварительной стерилизации растительного материала для рода *Pinus*. Все протоколы условно можно разделить на три типа: обработка только шишек, обработка шишек, а затем семян, обработка семян, а также мегagamетафитов.

В зарубежных источниках описаны протоколы поверхностной стерилизации зеленых шишек без

дальнейшей обработки незрелых семян. Шишки обеззараживают 70–96% этанолом [14, 16, 27, 42], 0.5–1% гипохлоритом натрия [16, 35]. Lelu-Walter с соавт. [14] сообщают о том, что при поверхностной стерилизации шишек, без какой-либо обработки семян, уровень контаминации составляет менее 0.1%.

Еще одним вариантом стерилизации растительного материала является обеззараживание как шишек, так и семян. В этом случае для обработки шишек также используют 70% этанол [30, 32, 33] и коммерческие моющие средства [32]. Семена стерилизуют раствором перекиси водорода, к которому иногда добавляют несколько капель Твин 20 [30, 32, 33]. Время обработки семян перекисью водорода также отличается и варьирует от 8 [30] до 15 мин [32, 33, 43].

Третий тип протоколов стерилизации чаще встречается в отечественной литературе. Так, например, Третьякова и Шуваев [24] обрабатывали семена *Pinus pumila* 0.3% перманганатом калия, затем извлекали мегагаметофиты из семян и стерилизовали 3% спиртовым раствором йода, с последующим трехкратным промыванием в стерильной дистиллированной воде, после чего на питательную среду помещали зиготические зародыши.

В наших исследованиях предварительная оценка влияния на всхожесть семян различных концентраций перекиси водорода (5, 7, 10, 15, 20%), а также длительности обработки по времени (5, 6, 7, 8, 10 мин) показала, что ни один вариант статистически значимо не отличается от контроля (семена, не обработанные стерилизующими растворами). Хотя, в литературе представлены данные по использованию слабых растворов перекиси водорода в качестве предпосевной обработки семян с целью повышения всхожести и продуктивности растительного материала [44]. Орынбаев и Джалилов [45] установили, что обработка семян капусты 2–4% растворами перекиси водорода не влияет на всхожесть семян (опытные образцы достоверно не отличаются от контроля), но способствует уменьшению развития сосудистого бактериоза. Pitel и Wang [46] описывают положительное влияние предпосевной обработки семян *Pinus monticola* перекисью водорода. Авторы отмечают положительный эффект воздействия 35% раствора перекиси водорода, после обработки которой всхожесть семян возросла (35.4%) в отличие от контроля (10.7%).

В рамках исследования было установлено, что из 10 апробированных вариантов предварительной стерилизации (табл. 1) на всхожесть зрелых семян *P. sylvestris* в сравнении с контролем не оказала воздействие обработка согласно протоколам № 4, 6, 9 и 10 (рис. 3.1, 4), что свидетельствует о безопасности для эксплантов растворов перекиси водорода и “Белизны”, как по отдельности, так и

при сочетании данных агентов. Полученные нами данные соответствуют сведениям, представленным в литературе [46–49]. Для многолетнего травянистого растения рода *Agastache* описано отсутствие достоверных отличий между всхожестью семян обработанных 5% гипохлоритом натрия и нестерильным семенным материалом – контрольными растениями [48]. Плаксиенко с соавт. [49] отмечают улучшение показателей энергии прорастания и всхожести семян пшеницы после обработки растворами гипохлорита натрия различных концентраций. Wenny и Dumgoese [47] сообщают о позитивном влиянии обработки семян раствором, состоящим из двух частей коммерческого отбеливателя (гипохлорит натрия) и трех частей воды, на примере сосны обыкновенной. Авторы обращают внимание на то, что такая обработка снижает поражение грибной инфекцией и повышает всхожесть семян.

Стоит отметить, что на 15 сут после предварительной обработки контаминация наблюдалась во всех чашках Петри кроме тех, которые стерилизовали в соответствии с протоколами № 2 и 3 (рис. 3.2), что может свидетельствовать о высокой стерилизующей способности 70% этанола, в отличие от остальных исследуемых растворов. При этом всхожесть семян, обработанных раствором спирта, не превышала 2 и 20% соответственно (рис. 3.1). Это может свидетельствовать об отрицательном влиянии этанола на всхожесть зрелых семян сосны обыкновенной.

В некоторых опытных образцах контаминация была зарегистрирована на 7 сут после начала эксперимента (рис. 3). Часто встречалась грибная инфекция, которая развивалась, несмотря на обработку семян стерилизующими растворами (рис. 5). В литературе описывается проблема поражения семян и проростков различными представителями царства Грибы [19, 20, 47]. Авторы сообщают, что бактериальная и грибная инфекции часто встречаются во всех тканях и органах хвойных [19], что затрудняет культивирование в асептических условиях [20].

Введение мегагаметофитов в культуру in vitro в 2021 г.

В рамках данного исследования в культуру *in vitro* в 2021 г. было введено 674 экспланта с зародышами на 3–6 стадиях развития. Незрелые семена стерилизовали в соответствии с протоколом № 9 (табл. 1). Заражение бактериальной и грибной инфекцией было зарегистрировано в среднем в $21.7 \pm 4.8\%$ исследуемого растительного материала. Необходимо отметить, что экспланты собранные с 12 клонов плюсовых деревьев *P. sylvestris* на ЛСП I не подвергались контаминации в условиях *in vitro*. Тогда как все незрелые семена, собранные с 2 деревьев, были инфицированы, не-

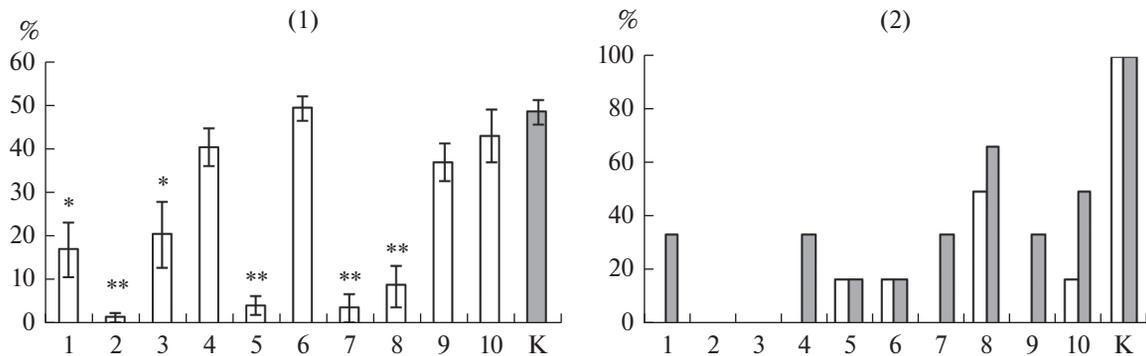


Рис. 3. Лабораторная всхожесть семян *Pinus sylvestris* (1) (белые столбики – опытные варианты; серый столбик – контроль) и доля образцов, подвергшихся контаминации (2) (белый столбик – 7 сут; серый столбик – 15 сут) при разной стерилизующей обработке.

Статистически значимые различия между контролем и анализируемыми вариантами предварительной обработки обозначены: * – $p < 0.05$; ** – $p < 0.01$. (Цифрами 1–10 обозначен номер протокола обработки табл. 1, буквой ‘К’ обозначен контроль).

По горизонтали: 1) ‘Белизна’, 70% этанол, 15% перекись водорода; 2) ‘Белизна’, 70% этанол; 3) 70% этанол, 15% перекись водорода; 4) ‘Белизна’; 5) 70% этанол; 6) 15% перекись водорода; 7) 10% KMnO_4 , 70% этанол, 15% перекись водорода; 8) ‘Белизна’, 20% перекись водорода, 0.1% HCl ; 9) ‘Белизна’, 20% перекись водорода; 10) ‘Белизна’, 15% перекись водорода.

Fig. 3. Laboratory seed germination (1) (white bars – experimental treatments; gray bar – control) and the proportion of contaminated samples (2) (white bar – 7 days; gray bar – 15 days) under different sterilization treatment.

Statistically significant differences between the control and the experimental treatments are indicated: * – $p < 0.05$; ** – $p < 0.01$. (Numbers 1–10 indicate the treatments according to Table 1, the letter ‘K’ denotes control).

X-axis: sterilizing agents – 1) commercial bleach ‘Belizna’, 70% ethanol, 15% hydrogen peroxide; 2) commercial bleach ‘Belizna’, 70% ethanol; 3) 70% ethanol, 15% hydrogen peroxide; 4) commercial bleach ‘Belizna’; 5) 70% ethanol; 6) 15% hydrogen peroxide; 7) 10% KMnO_4 , 70% ethanol, 15% hydrogen peroxide; 8) commercial bleach ‘Belizna’, 20% hydrogen peroxide, 0.1% HCl ; 9) commercial bleach ‘Belizna’, 20% hydrogen peroxide; 10) commercial bleach ‘Belizna’, 15% hydrogen peroxide.

смотря на предварительную стерилизацию эксплантов. При этом заражение проявлялось на 8–12 сут эксперимента, после того как мегагаметофит набухал и ткани, окружающие зародыш, начали разрушаться. В литературе встречается информация об эндофитных микроорганизмах, находящихся внутри различных тканей сосны [50–52]. Liliĵa с соавт. были выделены эндофиты из шишек и зрелых семян сосны обыкновенной [49]. Исследования проводились на растительном материале после поверхностной стерилизации гипохлоритом натрия в течение 5 мин. Среди выделенных микроорганизмов были представители как грибов, так и бактерий [50].

В результате культивирования мегагаметофитов *P. sylvestris* в течение 9 недель культуру клеток получить не удалось. Важно отметить, что из некоторых зародышей, введенных в культуру *in vitro*, развивались растения. Доля эксплантов, из которых формировались растения варьировала в зависимости от генотипа от 0 до 33% и в среднем составляла $9.4 \pm 10\%$.

Одной из причин отсутствия образования каллуса у части эксплантов может являться то, что некоторые зародыши находились на более поздней стадии развития (стадии 6–9, рис. 1). Так, Lelu с коллегами [27] описали развитие зиготического зародыша на питательной среде инициации с дальнейшим формированием растения. Авторы

сообщают, что образование растений происходило у зародышей на предсемядольной стадии развития – поздней, по мнению исследователей, для дедифференцировки и инициации каллусообразования. Другой причиной может являться то, что часть деревьев, с которых были собраны шишки, обладали низким репродуктивным потенциалом и не способны образовывать эмбриогенный каллус. Так, Niskanen с коллегами [53] показали, что на успех инициации влиял генотип как материнского, так и отцовского растения. Haggman с соавт. [36] описывают, что на успех индукции соматического эмбриогенеза влияние оказывали генотип интактного растения и среда инициации. Также авторы предполагают, что дата сбора эксплантов в рамках оптимального периода не влияет на инициацию соматического эмбриогенеза.

Мы предполагаем, что отсутствие формирования каллуса из незрелых зародышей может быть связано с неподходящим составом питательной среды. Исследование с использованием в качестве эксплантов зрелых семян *P. sylvestris*, собранных с Петрозаводской ЛСП и естественного сосняка на севере Карелии, показало, что на питательной среде (DCR), содержащей повышенные концентрации фитогормонов, образовывался каллус [54].

Часть собранных зеленых шишек после 1.5 мес. нахождения в холодильнике была обработана сте-

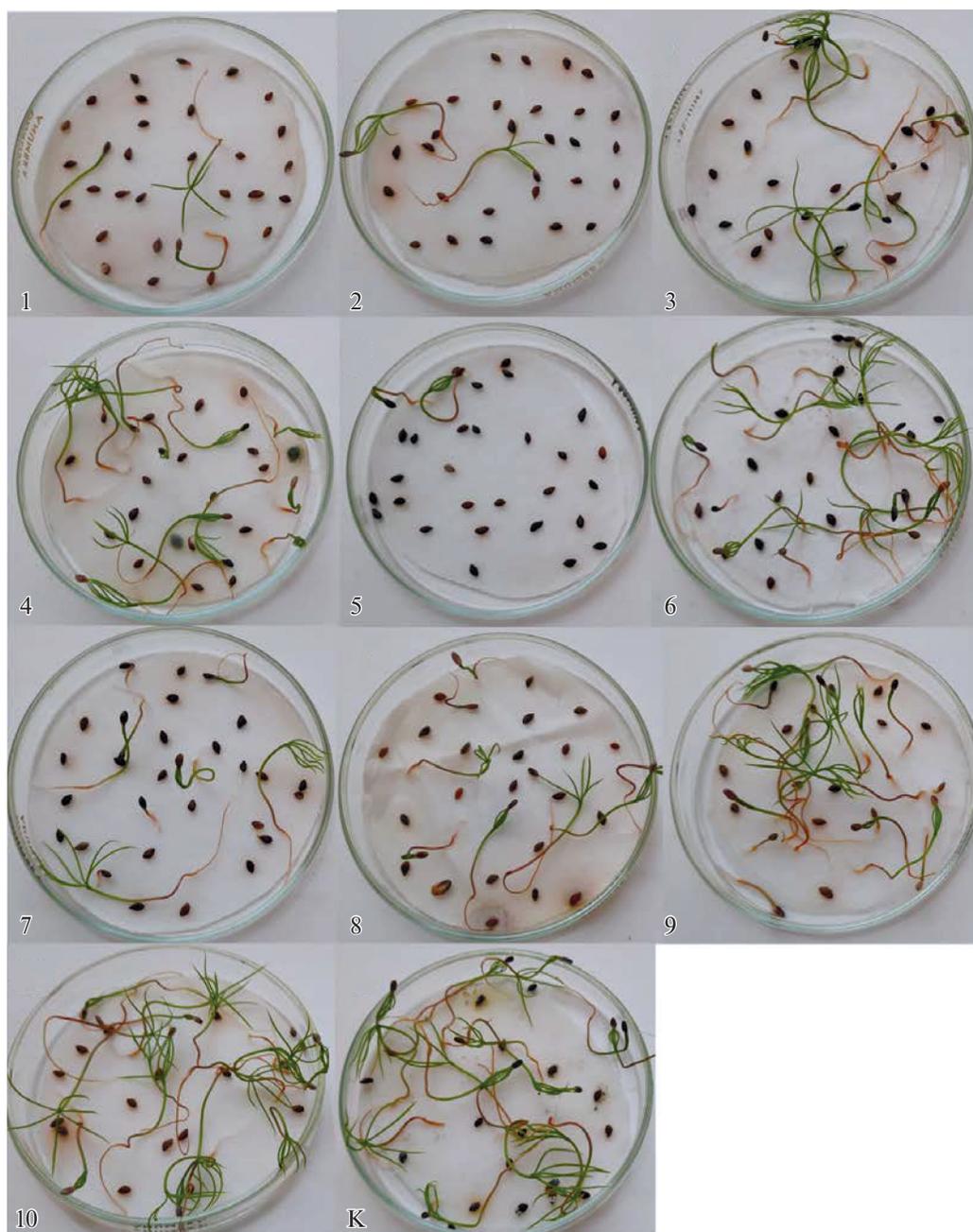


Рис. 4. Лабораторная всхожесть семян *Pinus sylvestris* при различных вариантах предварительной стерилизации (цифрами обозначены номера обработок в соответствии с табл. 1).

Fig. 4. Laboratory germination of *Pinus sylvestris* seeds under various sterilization treatments (numbers indicate the treatments according to Table 1, “K” denotes control).

рилизующими растворами (95% раствор этанола с добавлением капли Твин 20; 70% этанолом, разбавленный коммерческий отбеливатель, содержащий 0.5% гипохлорит натрия, дополненный парой капель Твин 20). Из шишек в стерильных условиях были извлечены мегагаметофиты, которые помещались на питательную среду без предварительной обработки семян. В результате после

30 сут культивирования контаминация не наблюдалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Период сбора незрелых шишек отличается в различных регионах и определяется по сумме среднесуточных температур. В Карелии на ЛСП I

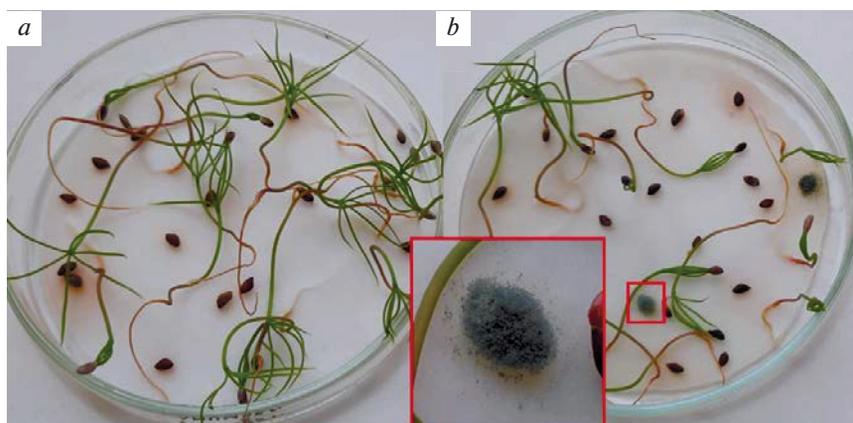


Рис. 5. Образцы проросших семян *Pinus sylvestris* без заражения (а) и с заражением (б).
Fig. 5. Uncontaminated (a) and contaminated (b) samples of germinated *Pinus sylvestris* seeds.

в 2020 г. оптимальным периодом для сбора растительного материала был конец третьей декады июня—вторая декада июля (сумма эффективных температур при базовой температуре +5 °С — 406.8—669 градусо-дней). В 2021 г. ввиду аномально жаркого лета “временное окно” для сбора зеленых шишек сократилось — третья декада июня—первая декада июля (400.7—664.7 градусо-дней). Зародыши, собранные в этот период, находились на оптимальных (с 3 по 6) стадиях развития для инициации соматического эмбриогенеза. Тем не менее, такой мониторинг сумм температур и многократный сбор растительного материала необходимо проводить ежегодно.

Стоит отметить, что короткий период сбора растительного материала значительно сокращает объемы проводимых работ. В связи с этим, для минимизирования подобных ограничений рекомендуем собирать зеленые шишки в более раннее время (до 3 стадии развития зиготического зародыша) и хранить их при низких положительных температурах (4 °С). При подобном хранении в холодильнике развитие зародышей продолжается, но медленнее, что предоставляет исследователям больше времени для работы с растительным материалом.

В результате проведенного исследования установлено влияние различных стерилизующих агентов на всхожесть зрелых семян *P. sylvestris*. Ингибирующее действие на прорастание семян оказал раствор 70% этанола. Наиболее удачным вариантом предварительной обработки, по нашему мнению, является использование коммерческого отбеливателя “Белизна” и 15–20% перекиси водорода. Наряду с выбранным протоколом предварительной стерилизации при введении в культуру *in vitro* мегагаметофитов из незрелых семян *P. sylvestris* был апробирован вариант стерилизации зеленых шишек и извлечением незрелых семян в стерильных условиях ламинар-бокса.

Данный способ стерилизации оказался эффективным, поскольку не оказывал влияния на жизнеспособность эксплантов и предотвращал инфицирование мегагаметофитов в культуре *in vitro*. Однако необходимо учитывать тот факт, что зеленые шишки и поверхность незрелых семян могут быть заражены бактериальной или грибной инфекцией и сочетание различных способов обработки (стерилизация как зеленых шишек, так и семян) может способствовать снижению контаминации в культуре *in vitro*. Но наличие эндофитных организмов в интактных растениях затрудняет использование их органов и тканей для инициации соматического эмбриогенеза, тем самым усложняя поиск деревьев-доноров.

Необходимым этапом при запуске работ с культурой *in vitro* является подбор оптимальных условий культивирования. Следует обратить внимание на то, что рекомендованные протоколы для получения соматических зародышей, могут быть не эффективными для объектов из разных географических районов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН.

Авторы благодарят отдел “Карельская лесосеменная станция” Центра защиты леса Ленинградской области (ФБУ Рослесозащита) за предоставленные для изучения семена *Pinus sylvestris*. Также выражают благодарность д. с.-х. н., заведующему лабораторией лесных биотехнологий Института леса КарНЦ РАН Раевскому Борису Владимировичу и к.б.н, старшему научному сотруднику, руководителю аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН Никеровой Ксении Михайловне за помощь в сборе шишек с клонов плюсовых деревьев на Петрозаводской ЛСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Houston D.T., de Rigo D., Caudullo G.* 2016. *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. – In: European atlas of forest tree species. Luxembourg. P. 132–133.
https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/efdac/download/Atlas/pdf/Pinus_sylvestris.pdf
2. *Третьякова И.Н., Ворошилова Е.В., Шуваев Д.Н., Пак М.Э.* 2012. Перспективы микроклонального размножения хвойных в культуре *in vitro* через соматический эмбриогенез. – Хвойные бореальной зоны. 30(1–2): 180–186.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20285298>
3. *Новичонок Е.В., Галибина Н.А., Раевский Б.В., Ершова М.А., Гуляева Е.Н.* 2019. Соматический эмбриогенез сосны обыкновенной: современное состояние вопроса, перспективы применения в лесном хозяйстве. – Труды КарНЦ РАН. 12: 5–18.
<https://doi.org/10.17076/eb1118>
4. *Noerhadi T., Yasuda T., Siregar A., Budji R.G.* 1985. Induction of somatic embryos in cultured leaf explants of *Coffea arabica*. – Proc. Inst. Tehnol. Bandung. 2–3: 41–49.
<https://journals.itb.ac.id/index.php/jmfs/article/download/9518/3599/27343>
5. *Machado A.D., Puschmann M., Puhringer H., Kremen R., Katinger H., Machado L.D.* 1995. Somatic embryogenesis of *Prunus subhirtella autumn rosa* and regeneration of transgenic plants after *Agrobacterium*-mediated transformation. – Plant Cell Reports. 14(6): 335–340.
<https://doi.org/10.1007/bf00238592>
6. *Garin E., Grenier E., Grenier-De March Gh.* 1997. Somatic embryogenesis in wild cherry (*Prunus avium*). – Plant Cell, Tissue, Organ Cult. 48(2): 83–91.
<https://doi.org/10.1023/a:1005729621557>
7. *Малаева Е.В.* 2018. Изучение особенностей соматического эмбриогенеза представителей рода *Begonia* L. в культуре *in vitro*. – Субтропическое и декоративное садоводство. 65: 109–117.
<https://doi.org/10.31360/2225-3068-2018-65-109-117>
8. *Litz R.E., Moon P.A., Chavez Avila V.M.* 2005. Somatic embryogenesis and regeneration of endangered cycad species. – II International Symposium on Biotechnology of Tropical and Subtropical Species. 692: 75–80.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.692.8>
9. *Kang H.D., Moon H.K., Lee S.K.* 2014. Micropropagation via somatic embryogenesis of rare and endangered species, *Acanthopanax seoulenses* Nakai. – Forest science and technology. 10 (4): 190–196.
<https://doi.org/10.1080/21580103.2014.913536>
10. *Мурасева Д.С.* 2016. Размножение и сохранение *in vitro* редких и эндемичных видов рода *Fritillaria* L.: Дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск. 149 с.
11. *Третьякова И.Н., Ворошилова Е.В., Шуваев Д.Н.* 2014. Каллусогенез и индукция соматического эмбриогенеза у гибридных зародышей семян *Pinus sibirica*. – Физиология растений. 61(2): 297–303.
<https://doi.org/10.7868/s0015330314020171>
12. *Park Y.S., Lelu-Walter M.A., Harvengt L., Trontin J.F., MacEacheron I., Klimaszewska K., Bonga J.M.* 2006. Initiation of somatic embryogenesis in *Pinus banksiana*, *P. strobus*, *P. pinaster*, and *P. sylvestris* at three laboratories in Canada and France. – РСТОС. 86(1): 87–101.
<https://doi.org/10.1007/s11240-006-9101-7>
13. *Park Y.-S., Beaulieu J., Bousquet J.* 2016. Multi-varietal forestry integrating genomic selection and somatic embryogenesis. In: Vegetative propagation of forest trees. National Institute of Forest Science. Online edition. P. 302–322.
https://www.iufro.org/download/file/24668/4296/vegetative-propagation-of-forest-trees_pdf
14. *Lelu-Walter M.A., Bernier-Cardou M., Klimaszewska K.* 2008. Clonal plant production from self- and cross-pollinated seed families of *Pinus sylvestris* (L.) through somatic embryogenesis. – РСТОС. 92(1): 31–45.
<https://doi.org/10.1007/s11240-007-9300-x>
15. *Aronen T., Pehkonen T., Rynänen L.* 2009. Enhancement of somatic embryogenesis from immature zygotic embryos of *Pinus sylvestris*. – Scan. J. For. Res. 24(5): 372–383.
<https://doi.org/10.1080/02827580903228862>
16. *Abrahamsson M., Clapham D., von Arnold S.* 2018 Somatic Embryogenesis in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 123–133.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_9
17. *Lelu-Walter M.-A., Klimaszewska K., Miguel C., Aronen T., Hargreaves C., Teyssier C., Trontin J.F.* 2016. Somatic Embryogenesis for More Effective Breeding and Deployment of Improved Varieties in *Pinus* spp.: Bottlenecks and Recent Advances. In: Somatic embryogenesis: fundamental aspects and applications. P. 319–365.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-33705-0_19
18. *Шуклина А.С., Третьякова И.Н.* 2019. Соматический эмбриогенез видов рода *Pinus* в культуре *in vitro*. – Успехи современной биологии. 139(2): 184–195.
<https://doi.org/10.1134/s004213241902008x>
19. *Красноперова В.В., Бухарина И.Л., Исламова Н.А.* 2016. Особенности введения в культуру *in vitro* хвойных древесных пород. – АгроЭкоИнфо. 2: 7 с.

20. Дунаева С.Е., Оследкин Ю.С. 2015. Бактериальные микроорганизмы, ассоциированные с тканями растений в культуре *in vitro*: идентификация и возможная роль. — Сельскохозяйственная биология. 50(1): 3–15. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.1.3rus>
21. Плынская Ж.А., Аешина Е.Н., Величко Н.А. 2008. Культивирование хвойных в условиях *in vitro*. — Хвойные бореальной зоны. 25(1–2): 68–70.
22. Третьякова И.Н., Барсукова А.В. 2012. Соматический эмбриогенез лиственниц и кедра сибирского в Сибири. — Лесоведение. 6: 63–70. <http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/275>
23. Зайцева Ю.Г., Новикова Т.И. 2014. Клональное микроразмножение *Rhododendron dauricum*. — Вестник НГУ. Серия: Биология, клиническая медицина. 12(1): 26–31. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21271152>
24. Третьякова И.Н., Шуваев Д.Н. 2015. Соматический эмбриогенез *Pinus pumila* и продуктивность эмбриогенных линий при длительном культивировании *in vitro*. — Онтогенез. 46(5): 327–337. <https://doi.org/10.7868/s0475145015050092>
25. Кох Ж.А., Литовка Ю.А., Маколова П.В., Шабанова К.А., Павлов И.Н. 2020. Биохимический состав вегетативных эксплантов и каллусов *Pinus sibirica* DuRoi. — Химия растительного сырья. 4: 395–403. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2020048530>
26. Третьякова И.Н., Ижболдина М.В. 2009. Индукция соматического эмбриогенеза у кедра сибирского. — Лесоведение. 5: 43–49. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13500459>
27. Lelu M.-A., Bastien C., Drugeault A., Gouez M.-L., Klimaszczyńska K. 1999. Somatic embryogenesis and plantlet development in *Pinus sylvestris* and *Pinus pinaster* on medium with and without growth regulator. — Physiologia Plantarum. 105(4): 719–728. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105417.x>
28. Burg K., Helmersson A., Bozhkov P., von Arnold S. 2007. Developmental and genetic variation in nuclear micro satellite stability during somatic embryogenesis in pine. — J. Exp. Bot. 58(3):687–698. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl241>
29. Широков А.И., Крюков Л.А. 2012. Основы биотехнологии растений: электронное учебно-методическое пособие. Нижний Новгород. 49 с. http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/files/Method_Shirokov_Kryukov.pdf
30. Montalbán I.A., Moncaleán P. 2018. *Pinus radiata* (D. Don) Somatic Embryogenesis. In: Step wise protocols for somatic embryogenesis of important woody plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 1–11. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_1
31. Pullman G. 2018. Embryogenic Tissue Initiation in Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.). In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 13–32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_2
32. Celestino C., Carneros E., González-Cabrero N., Hernández I., Toribio M. 2018. Stone Pine *Pinus pinea* L. In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 63–81. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_5
33. Pereira C., Montalbán I.A., Correia S.I., Canhoto J., Moncaleán P. 2018. Aleppo pine *Pinus halepensis* Mill. In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 159–166. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_12
34. ГОСТ 13056.6-97. 1998. Межгосударственный стандарт. Метод определения всхожести. Семена деревьев и кустарников. Дата введения: 1998-07-01. М. 27 с. <https://docs.cntd.ru/document/1200025567>
35. Keinonen-Mettälä K., Jalonen P., Eurola P., von Arnold S., von Weissenberg K. 1996. Somatic embryogenesis of *Pinus sylvestris*. — Scand. J. For. Res. 11(1–4): 242–250. <https://doi.org/10.1080/02827589609382933>
36. Häggman H., Jokela A., Krajinakova J., Kauppi A., Niemi K., Aronen T. 1999. Somatic embryogenesis of Scots pine: cold treatment and characteristics of explants affecting induction. — J. Exp. Bot. 50(341):1769–1778. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.341.1769>
37. Pullman G.S., Webb D.T. 1994. An embryo staging system for comparison of zygotic and somatic embryo development. — In: Proc TAPPI Biol Sci Symp. (Minneapolis, MN, USA October 3–6.1994). p. 31–34. <http://hdl.handle.net/1853/1824>
38. Cairney J., Pullman G.S. 2007. The cellular and molecular biology of conifer embryogenesis. — New Phytol. 176(3): 511–536. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02239.x>
39. Stasolla C., Yeung E.C. 2003. Recent advances in conifer somatic embryogenesis: improving somatic embryo quality. — Plant Cell, Tissue Organ Cult. 74(1): 15–35. <https://doi.org/10.1023/A:1023345803336>

40. Mo L.H., von Arnold S. 1991. Origin and Development of Embryogenic Cultures from Seedlings of Norway Spruce (*Picea abies*). — J. Plant Physiol. 138(2): 223–230.
[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80275-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80275-0)
41. Arnold S., Clapham D., Abrahamsson M. 2019. Embryology in conifers. — Advances in Botanical Research. 89: 157–184.
<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2018.11.005>
42. Cano M., Morcillo A., Humánez A., Mendoza-Poudereux I., Alborch A., Segura J. Arrillaga I. 2018. Maritime Pine *Pinus Pinaster* Aiton. In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 167–179.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_13
43. Третьякова И.Н., Пак М.Э., Иваницкая А.С., Орешкова Н.В. 2016. Особенности соматического эмбриогенеза длительно пролиферирующих эмбрионных клеточных линий *Larix sibirica in vitro*. — Физиология растений. 63(6): 812–822.
<https://doi.org/10.7868/s0015330316050134>
44. Баранова Т.В., Калаев В.Н., Воронин А.А. 2014. Экологически безопасные стимуляторы роста для предпосевной обработки семян. — Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 7: 96–102.
45. Орынбаев А.Т., Джалилов Ф.С. 2018. Обеззараживание семян капусты от сосудистого бактериоза. — Картофель и овощи. 1: 23–25.
<https://doi.org/10.25630/pav.2018.1.17457>
46. Pitel J.A., Wang B.S.P. 1985. Physical and chemical treatments to improve laboratory germination of western white pine seeds. — Can. J. For. Res. 15(6): 1187–1190.
<https://doi.org/10.1139/x85-194>
47. Wenny D.L., Dumroese R.K. 1987. Germination of conifer seeds surface-sterilized with bleach. — Tree Plant. Notes. 38(3):18–21. <https://rngr.net/publications/tpn/38-3/germination-of-conifer-seeds-surface-sterilized-with-bleach>
48. Поливанова О.Б. 2015. Влияние режима стерилизации на всхожесть семян *Agastache* Clayton ex Gronov. и рост растений *in vitro*. — Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 150-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Москва. С. 63–65.
<http://elib.timacad.ru/dl/full/sbornik-150-let-rgau-msha-2015.pdf/view>
49. Плаксиенко И.Л., Мищенко О.В., Колесникова Л.А., Сакало А.И., Хмара Е.А. 2020. Влияние гипохлорита натрия на всхожесть и энергию прорастания образцов пшеницы. — Селекция и генетика: инновации и перспективы: Сб. материалов Международной науч.-практ.конф. к 100-летию кафедры селекции и генетики. Горки, 189–193.
<https://baa.by/upload/science/conferencii/selekcija-i-genetika-innovacii-i-perspektivi-20.pdf>
50. Niskanen A.M., Lu J., Seitz S., Keinonen K., von Weissenberg K., Pappinen A. 2004. Effect of parent genotype on somatic embryogenesis in Scots pine (*Pinus sylvestris*). — Tree Physiol. 24(11): 1259–1265.
<https://doi.org/10.1093/treephys/24.11.1259>
51. Lilja A., Hallaksela A.M., Heinonen R. 1995. Fungi colonizing Scots-pine cone scales and seeds and their pathogenicity. — Eur. J. For. Path. 25(1): 38–46.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1995.tb01070.x>
52. Pirttilä A.M., Pospiech H., Laukkanen H., Myllylä R., Hohtola A. Two Endophytic Fungi in Different Tissues of Scots Pine Buds (*Pinus sylvestris* L.). — Microb. Ecol. 45(1): 53–62.
<https://doi.org/10.1007/s00248-002-1038-8>
53. Ganley R.J., Newcombe G. Fungal endophytes in seeds and needles of *Pinus monticola*. — Mycological Research. 110(3): 318–327.
<https://doi.org/10.1016/j.mycres.2005.10.005>
54. Игнатенко Р.В., Ершова М.А., Галибина Н.А., Чирва О.В. 2022. Стратегия развития зрелых мегагаметофитов *Pinus sylvestris* L. в культуре *in vitro* при разных условиях. — Материалы V (XIII) Международной ботанической конференции молодых ученых в Санкт-Петербурге. СПб. 109.
https://www.binran.ru/files/publications/Proceedings/Proceedings_IBC/IBC_2022_Proceedings.pdf

Optimization of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Explants Sterilization Protocol and Cultivation Conditions

M. A. Ershova^{a, *}, R. V. Ignatenko^a, E. V. Novichonok^a, O. V. Chirva^a, N. A. Galibina^a

^aDepartment of Multidisciplinary Scientific Research of Karelian Research Centre, Petrozavodsk, Russia

*e-mail: maria_ershova_karnc@mail.ru

Abstract—Despite the existence of a sufficient number of protocols for obtaining somatic embryos of *Pinus sylvestris* L., there are almost no data on the effect of plant explants pre-treatment on the somatic embryogenesis initiation. During the study, the optimal timing for collecting green cones and the safe and effective protocol for immature seeds pre-treatment. According to the data obtained, in 2020, the end of the third decade of June-second decade of July turned out to be a suitable time interval in Karelia (by the accumulation

of effective temperatures of 406.8–669 degree-days, respectively (base +5 °C). Whereas in 2021 this period was shorter (the third decade of June—the first decade of July (400.7–664.7 degree-days)). Much attention was paid to the study of the various types of sterilizing agents' effect (70% ethanol, potassium permanganate, sodium hypochlorite (commercial bleach “Belizna”), hydrogen peroxide), their concentrations and exposure time on the *Pinus sylvestris* seeds germination. The negative effect of 70% ethanol solution on this indicator was established. The mature seeds germination rate did not exceed 20% after treatment. The megagametophytes treated with this sterilizing solution did not show signs of development or death after two months of cultivation. At the same time solutions of commercial bleach “Belizna” and hydrogen peroxide in various concentrations (up to 20%) did not affect seeds germination (seed germination rate was 37–49% respectively, control – 49%). The methods of green cones sterilization without further seed treatment, and the introduction of *Pinus sylvestris* megagametophytes into culture *in vitro* were also tested. This treatment option proved to be effective; no contamination was recorded during the megagametophytes cultivation.

Keywords: somatic embryogenesis, surface sterilization of plant material, *Pinus sylvestris*, Karelia

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out under state order to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. The authors are grateful to the Department of the Karelian Forest Seed Station of the Center for Forest Protection of the Leningrad Region (FBU Roslesozashchita) for providing *Pinus sylvestris* seeds. They also express their gratitude to D. Sc., Head of the Laboratory for Forest Biotechnologies of the Forest Research Institute KarRC RAS Boris V. Rayevsky and Ph.D., Head of the Analytic Laboratory of the Forest Research Institute KarRC RAS Ksenia M. Nikerova for their help in collecting cones from plus tree clones at the Petrozavodsk Forest Seed Plantation.

REFERENCES

1. Houston D.T., de Rigo D., Caudullo G. 2016. *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. – In: European atlas of forest tree species. Luxembourg. P. 132–133.
https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/efdac/download/Atlas/pdf/Pinus_sylvestris.pdf
2. Tretyakova I.N., Voroshilova E.V., Shuvaev D.N., Pak M.Eh. 2012. [Prospects of microclonal reproduction of conifers in culture *in vitro* through somatic embryogenesis]. – *Khvoinye boreal'noi zony*. 30(1–2): 180–186.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20285298> (In Russian)
3. Novichonok E.V., Galibina N.A., Raevskii B.V., Ershova M.A., Gulyaeva E.N. 2019. Somatic embryogenesis in Scots pine: state of knowledge, and prospective applications in forestry]. – *Transactions of KarRC RAS*. 12: 5–18.
<https://doi.org/10.17076/eb1118> (In Russian)
4. Noerhadi T., Yasuda T., Siregar A., Budji R.G. 1985. Induction of somatic embryos in cultured leaf explants of *Coffea arabica*. – *Proc. Inst. Tehnol. Bandung*. 2–3: 41–49.
<https://journals.itb.ac.id/index.php/jmfs/article/download/9518/3599/27343>
5. Machado A.D., Puschmann M., Puhlinger H., Kremen R., Katinger H., Machado L.D. 1995. Somatic embryogenesis of *Prunus subhirtella autumn rosa* and regeneration of transgenic plants after *Agrobacterium*-mediated transformation. – *Plant Cell Reports*. 14(6): 335–340.
<https://doi.org/10.1007/bf00238592>
6. Garin E., Grenier E., Grenier-De March Gh. 1997. Somatic embryogenesis in wild cherry (*Prunus avium*). – *Plant Cell, Tissue, Organ Cult.* 48(2): 83–91.
<https://doi.org/10.1023/a:1005729621557>
7. Malaeva E.V. 2018. Studying special features in somatic embryogenesis of *Begonia* L. representatives *in vitro*. – *Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo*. 65: 109–117.
<https://doi.org/10.31360/2225-3068-2018-65-109-117> (In Russian)
8. Litz R.E., Moon P.A., Chavez Avila V.M. 2005. Somatic embryogenesis and regeneration of endangered cycad species. – In: II International Symposium on Biotechnology of Tropical and Subtropical Species. 692: 75–80.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.692.8>
9. Kang H.D., Moon H.K., Lee S.K. 2014. Micropropagation via somatic embryogenesis of rare and endangered species, *Acanthopanax seoulenses* Nakai. – *Forest science and technology*. 10(4): 190–196.
<https://doi.org/10.1080/21580103.2014.913536>
10. Muraseva D.S. 2016. [Reproduction and preservation *in vitro* of rare and endemic species of the genus *Fritillaria* L. Abstr. ... Diss. Doct. (Biology) Sci.]. Novosibirsk. 149 p. (In Russian)
11. Tretyakova I.N., Voroshilova E.V., Shuvaev D.N. 2014. Callusogenesis and somatic embryogenesis induction in hybrid embryos from the seeds of *Pinus sibirica*. – *Russ. J. Plant Physiol.* 61(2): 274–280.
<https://doi.org/10.1134/s1021443714020162>

12. Park Y.S., Lelu-Walter M.A., Harvengt L., Trontin J.F., MacEacheron I., Klimaszewska K., Bonga J.M. 2006. Initiation of somatic embryogenesis in *Pinus banksiana*, *P. strobus*, *P. pinaster*, and *P. sylvestris* at three laboratories in Canada and France. — PCTOC. 86(1): 87–101.
<https://doi.org/10.1007/s11240-006-9101-7>
13. Park Y.-S., Beaulieu J., Bousquet J. 2016. Multi-varietal forestry integrating genomic selection and somatic embryogenesis. In: Vegetative propagation of forest trees. National Institute of Forest Science. Online edition. P. 302–322.
https://www.iufro.org/download/file/24668/4296/vegetative-propagation-of-forest-trees_pdf
14. Lelu-Walter M.A., Bernier-Cardou M., Klimaszewska K. 2008. Clonal plant production from self- and cross-pollinated seed families of *Pinus sylvestris* (L.) through somatic embryogenesis. — PCTOC. 92(1): 31–45.
<https://doi.org/10.1007/s11240-007-9300-x>
15. Aronen T., Pehkonen T., Ryyänen L. 2009. Enhancement of somatic embryogenesis from immature zygotic embryos of *Pinus sylvestris*. — Scan. J. For. Res. 24(5): 372–383.
<https://doi.org/10.1080/02827580903228862>
16. Abrahamsson M., Clapham D., von Arnold S. 2018 Somatic Embryogenesis in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 123–133.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_9
17. Lelu-Walter M.-A., Klimaszewska K., Miguel C., Aronen T., Hargreaves C., Teyssier C., Trontin J.F. 2016. Somatic Embryogenesis for More Effective Breeding and Deployment of Improved Varieties in *Pinus* spp.: Bottlenecks and Recent Advances. In: Somatic embryogenesis: fundamental aspects and applications. P. 319–365.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-33705-0_19
18. Shuklina A.S., Tret'yakova I.N. 2019. Somatic embryogenesis of species of the genus *Pinus* in culture *in vitro*. — Uspekhi sovr. biol. 139(2): 184–195. (In Russian)
<https://doi.org/10.1134/S004213241902008X>
19. Krasnoperova V.V., Bukharina I.L., Islamova N.A. 2016. [Features of introduction of coniferous tree species into the culture *in vitro*]. — AgroEcoInfo. 2: 7 p. (In Russian)
http://agroecoinfo.ru/STATYI/2016/2/st_211.doc
20. Dunaeva S.E., Osledkin Yu.S. 2015. Bacterial microorganisms associated with the plant tissue culture: identification and possible role (review). — Agricultural biology. 50(1): 3–15. (In Russian).
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.1.3rus>
21. Plynskaya Zh.A., Aeshina E.N., Velichko N.A. 2008. [*In vitro* cultivation of conifers]. — Conifers of the Boreal Area. 25(1–2): 68–70. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11806181> (In Russian)
22. Tret'yakova I.N., Barsukova A.V. 2012. Somatic embryogenesis of larch and Siberian pine in Siberia. — Russian Journal of Forest Science. 6: 63–70.
<http://lesovedenie.ru/index.php/forestry/article/view/275>
23. Zaytseva Yu.G., Novikova T.I. 2014. Clonal micropropagation of *Rhododendron dauricum*. — Vestnik NGU. Seriya: Biologiya, klinicheskaya meditsina. 12(1): 26–31.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=21271152> (In Russian)
24. Tret'yakova I.N., Shuvaev D.N. 2015. Somatic embryogenesis in *Pinus pumila* and productivity of embryogenic lines during long-term cultivation *in vitro*. — Russ. J. Dev. Biol. 46(5): 276–285.
<https://doi.org/10.1134/s1062360415050070>
25. Koh Zh.A., Litovka Yu.A., Makolova P.V., Shabanova K.A., Pavlov I.N. 2020. Biochemical composition of vegetative explants and callus of *Pinus sibirica* Du Tour. — Khimija rastitel'nogo syr'ya. 4: 395–403.
<https://doi.org/10.14258/jcprm.2020048530> (In Russian)
26. Tret'yakova I.N., Izholdina M.V. 2009. Induction of Siberian pine somatic embryogenesis. — Russian Journal of Forest Science. 5: 43–49.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=13500459> (In Russian)
27. Lelu M.-A., Bastien C., Drugeault A., Gouez M.-L., Klimaszewska K. 1999. Somatic embryogenesis and plantlet development in *Pinus sylvestris* and *Pinus pinaster* on medium with and without growth regulator. — Physiol. Plant. 105(4): 719–728.
<https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105417.x>
28. Burg K., Helmersson A., Bozhkov P., von Arnold S. 2007. Developmental and genetic variation in nuclear micro satellite stability during somatic embryogenesis in pine. — J. Exp. Bot. 58(3): 687–698.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erl241>
29. Shirokov A.I., Kryukov L.A. 2012. [Fundamentals of plant biotechnology: an electronic educational and methodological manual]. Nizhny Novgorod. 49 p. (In Russian)
http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/files/Method_Shirokov_Kryukov.pdf

30. *Montalbán I.A., Moncaleán P.* 2018. *Pinus radiata* (D. Don) Somatic Embryogenesis. In: Step wise protocols for somatic embryogenesis of important woody plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 1–11.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_1
31. *Pullman G.* 2018. Embryogenic Tissue Initiation in Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.). In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 13–32.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_2
32. *Celestino C., Carneros E., González-Cabrero N., Hernández I., Toribio M.* 2018. Stone Pine *Pinus pinea* L. In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 63–81.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_5
33. *Pereira C., Montalbán I.A., Correia S.I., Canhoto J., Moncaleán P.* 2018. Aleppo pine *Pinus halepensis* Mill. In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 159–166.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_12
34. Interstate Standard. GOST 13056.6-97. 1998. Seeds of trees and shrubs. Method for determination of germination. Moscow. 27 p.
<https://docs.cntd.ru/document/1200025567> (In Russian)
35. *Keinonen-Mettälä K., Jalonen P., Eurola P., von Arnold S., von Weissenberg K.* 1996. Somatic embryogenesis of *Pinus sylvestris*. – Scand. J. For. Res. 11(1–4): 242–250.
<https://doi.org/10.1080/02827589609382933>
36. *Häggman H., Jokela A., Krajnakova J., Kauppi A., Niemi K., Aronen T.* 1999. Somatic embryogenesis of Scots pine: cold treatment and characteristics of explants affecting induction. – J. Exp. Bot. 50(341): 1769–1778.
<https://doi.org/10.1093/jxb/50.341.1769>
37. *Pullman G.S., Webb D.T.* 1994. An embryo staging system for comparison of zygotic and somatic embryo development. – In: Proc TAPPI Biol Sci Symp. (Minneapolis, MN, USA October 3–6.1994). P. 31–34.
<http://hdl.handle.net/1853/1824>
38. *Cairney J., Pullman G.S.* 2007. The cellular and molecular biology of conifer embryogenesis. – New Phytol. 176(3): 511–536.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02239.x>
39. *Stasolla C., Yeung E.C.* 2003. Recent advances in conifer somatic embryogenesis: improving somatic embryo quality. – Plant Cell, Tissue Organ Cult. 74(1): 15–35.
<https://doi.org/10.1023/A:1023345803336>
40. *Mo L.H., von Arnold S.* 1991. Origin and Development of Embryogenic Cultures from Seedlings of Norway Spruce (*Picea abies*). – J. Plant Physiol. 138(2): 223–230.
[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80275-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80275-0)
41. *Arnold S., Clapham D., Abrahamsson M.* 2019. Embryology in conifers. – Advances in Botanical Research. 89: 157–184.
<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2018.11.005>
42. *Cano M., Morcillo A., Humánez A., Mendoza-Poudereux I., Alborch A., Segura J. Arrillaga I.* 2018. Maritime Pine *Pinus pinaster* Aiton. In: Step Wise Protocols for Somatic Embryogenesis of Important Woody Plants. Forestry Sciences. V. 84. P. 167–179.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89483-6_13
43. *Tretyakova I.N., Park M.Eh., Ivanitskaya A.S., Oreshkova N.V.* 2016. Peculiarities of somatic embryogenesis of long-term proliferating embryogenic cell lines of *Larix sibirica in vitro*. – Russ. J. Plant Physiol. 63(6): 800–810.
<https://doi.org/10.1134/S1021443716050137>
44. *Baranova T.V., Kalaev V.N., Voronin A.A.* 2014. [Environmentally friendly growth stimulators for pre-sowing seed treatment]. – Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. 7: 96–102.
45. *Orynbaev A.T., Dzhaliilov F.S.* 2018. Disinfection of cabbage seeds from black rot. – Kartoffel' i ovoshchi. 1: 23–25.
<https://doi.org/10.25630/pav.2018.1.17457>
46. *Titel J.A., Wang B.S.P.* 1985. Physical and chemical treatments to improve laboratory germination of western white pine seeds. – Can. J. For. Res. 15(6): 1187–1190.
<https://doi.org/10.1139/x85-194>
47. *Wenny D.L., Dumroese R.K.* 1987. Germination of conifer seeds surface-sterilized with bleach. – Tree Plant. Notes. 38(3): 18–21.
<https://rngr.net/publications/tpn/38-3/germination-of-conifer-seeds-surface-sterilized-with-bleach>
48. *Polivanova O.B.* 2015. [The effect of the sterilization treatments on the germination of *Agastache* Clayton ex Gronov. seeds and plant growth *in vitro*]. In: [International scientific conference of the young scientists dedicated to the 150-th anniversary of the RSAU – MTAA (Moscow, June 2–3, 2015)]. Moscow. P. 63–65.
<http://elib.timacad.ru/dl/full/sbornik-150-let-rgau-msha-2015.pdf/view>

49. *Plaksienko I.L., Mishchenko O.V., Kolesnikova L.A., Sakalo A.I., Khmara E.A.* 2020. [Effect of sodium hypochlorite on germination and germination energy of wheat samples]. In: [Selection and genetics: innovations and prospects. Proceedings of the International scientific-practical conference. (Gorki, November 20, 2020)]. Gorki. P. 189–193. <https://baa.by/upload/science/conferencii/selekcija-i-genetika-innovacii-i-perspektivi-20.pdf>
50. *Niskanen A.M., Lu J., Seitz S., Keinonen K., von Weissenberg K., Pappinen A.* 2004. Effect of parent genotype on somatic embryogenesis in Scots pine (*Pinus sylvestris*). – *Tree Physiol.* 24(11): 1259–1265. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.11.1259>
51. *Lilja A., Hallaksela A.M., Heinonen R.* 1995. Fungi colonizing Scots-pine cone scales, seeds and their pathogenicity. – *Eur. J. For. Path.* 25(1): 38–46. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1995.tb01070.x>
52. *Pirttilä A.M., Pospiech H., Laukkanen H., Myllylä R., Hohtola A.* Two Endophytic Fungi in Different Tissues of Scots Pine Buds (*Pinus sylvestris* L.). – *Microb. Ecol.* 45(1): 53–62. <https://doi.org/10.1007/s00248-002-1038-8>
53. *Ganley R.J., Newcombe G.* Fungal endophytes in seeds and needles of *Pinus monticola*. – *Mycological Research.* 110(3): 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2005.10.005>
54. *Ingnatenko R.V., Ershova M.A., Galibina N.A., Chirva O.V.* 2022. Developmental strategy of *Pinus sylvestris* L. mature megagametophytes cultured *in vitro* under different conditions. – Proceedings of V (XIII) International Botanical Conference of Young Scientists in Saint-Petersburg. Saint Petersburg. P. 109. https://www.binran.ru/files/publications/Proceedings/Proceedings_IBC/IBC_2022_Proceedings.pdf