

СОДЕРЖАНИЕ

Том 58, вып. 3, 2022

К юбилею Заместителя Главного редактора журнала Василия Трофимовича Ярмишко 219

ОБЗОРЫ

Перспективы использования *Aronia melanocarpa* (Rosaceae) в онкологической практике

О. Ю. Рыбалкина, Т. Г. Разина, Е. П. Зуева, В. Ю. Андреева, Г. Н. Зюзьков,
Г. И. Калинкина, В. В. Жданов 222

СТАТЬИ И СООБЩЕНИЯ Биология ресурсных видов

Факторы регуляции водообмена хвои *Picea obovata* (Pinaceae) в условиях
средней подзоны тайги

С. Н. Сенькина 236

Интродукция ресурсных видов

Репродуктивные особенности дальневосточных видов рода *Iris* (Iridaceae)
в условиях *ex situ*

Л. Н. Миронова, В. А. Калинкина 244

Компонентный состав ресурсных видов

Сезонная динамика содержания полисахаридов в надземной части
Ferula kuhistanica (Apiaceae)

Д. З. Азизов, Р. К. Рахманбердыева, М. Х. Маликова, М. А. Маматханова 254

Сравнительное изучение содержания полифенольных соединений в растениях
видов *Cirsium esculentum*, *Cirsium serratuloides* и *Ancathia igniaria* (Asteraceae)

Е. А. Кастерова, Е. С. Прокопьева, А. Е. Мудрикова, С. С. Кравцова 261

Антропогенное воздействие на растительные ресурсы

Состояние агропопуляций *Elytrigia repens* (Poaceae) на промышленных отвалах
на территории Кемеровской области

Н. В. Шерemet, Т. Г. Ламанова 272

Формирование растительного покрова при лесной рекультивации
песчано-гравийного карьера в Республике Карелия

Е. Э. Костина, Г. В. Ахметова, А. Н. Пеккоев, В. А. Харитонов, А. М. Крышень 290

Оценка состояния среды в Санкт-Петербурге по показателю флуктуирующей асимметрии
листьев *Betula pendula* (Betulaceae)

М. М. Дорофеева, С. А. Бонецкая 311

Contents

Vol. 58, issue 3, 2022

To the Anniversary of Vasily T. Yarmishko, Deputy Chief Editor of the Journal 219

REVIEW

Prospects for the Use of *Aronia melanocarpa* (Rosaceae) in Cancer Therapy

*O. Yu. Rybalkina, T. G. Razina, E. P. Zueva, V. Yu. Andreeva, G. N. Zyuz'kov,
G. I. Kalinkina, V. V. Zhdanov*

222

ARTICLES AND COMMUNICATIONS

Biology of Resource Species

Factors Regulating Water Exchange in the Needles of Siberian Spruce from the Middle Taiga Subzone

S. N. Senkina

236

Introduction of Resource Species

Reproductive Features of the *ex situ* *Iris* (Iridaceae) Species from the Russian Far East

L. N. Mironova, V. A. Kalinkina

244

Component Composition of Resource Species

Seasonal Dynamics of Polysaccharides in the Aerial Parts of *Ferula kuhistanica* (Apiaceae)

D. Z. Azizov, R. K. Rakhmanberdyeva, M. Kh. Malikova, M. A. Mamatkhanova

254

Comparative Study of the Polyphenolic Compounds Content in the Aerial Parts of *Cirsium esculentum*, *C. serratuloides*, and *Ancathia igniaria* (Asteraceae)

E. A. Kasterova, E. S. Prokopyeva, A. E. Mudrikova, S. S. Kravtsova

261

Anthropogenic Influence on Plant Resources

State of *Elytrigia repens* (Poaceae) Agronomic Populations on Spoil Banks in the Forest–Steppe Zone (Kemerovo Region)

N. V. Sheremet, T. G. Lamanova

272

Development of Vegetation Cover of the Forest Restoration Sites (Case Study of a Sand and Gravel Pit in Karelia)

E. E. Kostina, G. V. Akhmetova, A. N. Pekkoiev, V. A. Kharitonov, A. M. Kryshen

290

Assessing the State of Urban Environment in Saint-Petersburg by the Indicator of *Betula pendula* (Betulaceae) Leaf Fluctuating Asymmetry

M. M. Dorofeeva, S. A. Bonetskaya

311

К ЮБИЛЕЮ ЗАМЕСТИТЕЛЯ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА ВАСИЛИЯ ТРОФИМОВИЧА ЯРМИШКО

DOI: 10.31857/S0033994622030050



26 июля 2022 г. исполнилось 75 лет Заместителю Главного редактора нашего журнала, доктору биологических наук, профессору Василию Трофимовичу Ярмишко. Научная и научно-организационная деятельность Василия Трофимовича вот уже более 40 лет связана с Ботаническим институтом им. В.Л. Комарова РАН, в котором он прошел путь от младшего научного сотрудника до Директора. Около 60 лет назад Василий Трофимович сделал свой главный в жизни и дальнейшем научном пути выбор — поступил на учебу в Лисинский лесной техникум. В 1969 г. В.Т. Ярмишко стал сначала студентом, а затем аспирантом Ленинградской лесотехнической академии (ныне Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова). Результатом исследований, выполненных под руководством Н.И. Рубцова, а позже А.Ф. Чмыра и

Г.И. Редько, стала кандидатская диссертация на тему: “Конкурентные влияния лиственных пород на ель в зоне корневых систем при реконструкции лиственных молодняков лесокультурными методами”, которая была им успешно защищена в 1976 г.

В 1978 г. В.Т. Ярмишко был приглашен на работу в Ботанический институт им. В.Л. Комарова АН СССР (ныне Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН) в качестве сотрудника новой Лаборатории экологии растительных сообществ, созданной под руководством д. б. н. В.А. Алексеева для участия в исследованиях по советско-американскому проекту “Взаимодействие между лесными экосистемами и загрязнителями”. Работа в Лаборатории на многие годы определила область научных интересов и тематику исследований Василия Трофимовича, связанных с проблемами трансформации состава и структуры, изменением параметров роста, продуктивности и жизненного состояния древостоев бореальных лесов под влиянием аэротехногенного загрязнения. В 80–90-е годы прошлого века В.Т. Ярмишко стал одним из разработчиков нового актуального направления исследований, связанного с оценкой действия на лесную растительность особого экологического фактора — промышленного загрязнения среды.

Научно-исследовательскую работу Василий Трофимович сочетал с обязанностями Начальника Природоохранной экспедиции БИН РАН и руководителя ряда экспедиционных отрядов. Под его руководством и при непосредственном участии в период с 1981 по 2021 г. были проведены масштабные полевые исследования в лесных сообществах на территории Мурманской, Новгородской и Ленинградской областей, Вьетнама, Финляндии, Монголии. Основное внимание он уделял исследованию вопросов формирования морфоструктуры крон, динамики линейного и радиального роста, состояния ассимиляционных органов, формирования надземной фитомассы, строения корневых систем одного из главных лесообразующих видов Европейского севера — сосны обыкновенной в условиях разного уровня промышленного загрязнения. В.Т. Ярмишко принимал активное участие в разработке методических вопросов оценки жизненного со-

стояния деревьев и древостоев, индикации степени нарушенности лесных экосистем, многолетнего мониторинга лесных сообществ. Разработанные им методологические подходы широко используются отечественными и зарубежными исследователями.

В 1987 г. Василий Трофимович стал руководителем коллектива, в котором он вел свою научную деятельность, и оставался им до 2016 г. В 1994 г. В.Т. Ярмишко успешно защитил в Ботаническом институте им. В.Л. Комарова РАН диссертацию на соискание ученой степени доктора биологических наук на тему: “Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ее сообщества в условиях атмосферного загрязнения на Европейском Севере”. В этой работе были обобщены результаты многолетнего изучения особенностей строения, продуктивности и жизненного состояния сосновых лесов в условиях загрязнения среды окислами серы и пылью тяжелых металлов на Кольском Севере (Мурманская обл.). Особое внимание было уделено вопросам динамики исследуемых сообществ, выявлению основных стадий дигрессии сосновых лесов под воздействием аэротехногенных загрязнителей.

В течение последних 6 лет В.Т. Ярмишко руководит Отделом Ботанический сад Петра Великого БИН РАН. Он является Вице-президентом Русского ботанического общества и членом Бюро Совета ботанических садов России.

В.Т. Ярмишко опубликовано более 270 научных работ. Он был одним из основных авторов, изданных в 1990 г. коллективных монографий “Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение” и “Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова”. В 1997 г. им была опубликована монография “Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере”, подготовленная по материалам докторской диссертации, завершившая очередной этап многолетних исследований влияния промышленных эмиссий на сосновые леса на северном пределе распространения. В.Т. Ярмишко являлся одним из авторов и ответственным редактором коллективных монографий “Методы изучения лесных сообществ” (2002), “Проблемы экологии растительных сообществ Севера” (2005), “Динамика лесных сообществ северо-запада России” (2009). В этих работах представлены результаты многолетних маршрутных, полустационарных и экспериментальных исследований сотрудников Лаборатории экологии растительных сообществ БИН, посвященных разнообразию и динамике лесных сообществ, находящихся под влиянием хронического антропогенного воздействия или восстанавливающихся после разовых катастрофических природных и антропогенных нарушений. В 2013 г.

В.Т. Ярмишко совместно с монгольскими коллегами была подготовлена монография “Особенности восстановления нарушенных сосновых лесов Монголии”, в которой обобщены результаты многолетних исследований сосновых лесов Монголии, которые проводились под руководством Василия Трофимовича лесным отрядом Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции. Заслуги В.Т. Ярмишко в организации и проведении этих исследований отмечены высшей наградой академии наук Монголии “Золотая медаль Хубилай Хаана”, Золотой медалью в честь 50-летия СРМКБЭ и АНМ и присвоением звания “Заслуженный эколог Монголии”.

Много времени и сил В.Т. Ярмишко отдавал и по сей день отдает научно-организационной деятельности. С 1996 г. он являлся сначала Заместителем Директора по научной работе, а с 2001 по 2016 г. — Директором Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН. В период своего пребывания на посту Директора Василий Трофимович был инициатором и организатором масштабных мероприятий по реконструкции Ботанического сада, ремонту и обновлению оранжерей и комплекса старинных зданий Института. Его деятельность была отмечена медалью “К 300-летию Санкт-Петербурга” и Почетной грамотой РАН.

В течение многих лет В.Т. Ярмишко является председателем диссертационного совета Д 002. 211. 02 при Ботаническом институте им. В.Л. Комарова РАН и экспертом РАН.

С 1996 г. Василий Трофимович ведет преподавательскую работу и является Заведующим кафедрой ботаники и дендрологии в Институте леса и природопользования Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова. В 2001 г. ему было присвоено звание профессора. В.Т. Ярмишко разработаны курсы лекций “Ботаническое ресурсоведение” и “Промышленная ботаника”. Под его руководством подготовлено 5 докторских и 14 кандидатских диссертаций.

Василий Трофимович состоит членом редколлегии целого ряда журналов ботанического профиля: “Известия РАН. Серия биологическая”, Труды Карельского НЦ РАН. Серия экологические исследования”, “Сибирский лесной журнал”, “Промышленная ботаника НАН Украины”, Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии”. В течение многих лет он является членом редколлегии и Заместителем главного редактора журнала РАН “Растительные ресурсы” — одного из центральных периодических изданий, публикующих результаты фундаментальных и прикладных исследований в области ботанического ресурсоведения. Востребованность В.Т. Ярмишко как члена редколлегии журнала “Растительные

ресурсы” обусловлена не только его общей высокой профессиональной эрудицией, организационными способностями, но и большим опытом исследований ресурсоведческой направленности. В течение многих лет он возглавлял работу по проектам Программ РАН “Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий”, “Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга”. Редколлегия журнала глубоко благодарна Василию Трофимовичу за активное участие в ее работе

в качестве эксперта-рецензента, внимательность, требовательность, конструктивность рекомендаций при обсуждении и оценке уровня научных публикаций.

От всей души поздравляем Василия Трофимовича Ярмишко с юбилеем, желаем доброго здоровья, благополучия, успешной научной, организационной и редакторской деятельности.

Коллектив редколлегии журнала
“Растительные ресурсы”

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *ARONIA MELANOCARPA* (ROSACEAE) В ОНКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

© 2022 г. О. Ю. Рыбалкина¹, *, Т. Г. Разина¹, Е. П. Зуева¹, В. Ю. Андреева², Г. Н. Зюзьков¹, Г. И. Калинкина², В. В. Жданов¹

¹Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН, Научно-исследовательский институт фармакологии и регенеративной медицины им. Е.Д. Гольдберга, г. Томск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Сибирский государственный медицинский университет”, г. Томск, Россия

*e-mail: olgatomsk87@gmail.com

Поступила в редакцию 17.12.2021 г.

После доработки 26.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

В обзоре представлены последние сведения из литературных источников и авторские данные о некоторых фармакологических свойствах *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot. Особое внимание уделено исследованиям в области экспериментальной и клинической онкологии.

Ключевые слова: фармакологическая активность, *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot, антоцианы, флавоноиды

DOI: 10.31857/S0033994622030098

В последние годы наблюдается тенденция к более широкому применению различных природных биологически активных веществ в качестве средств для профилактики и лечения многих социально-значимых заболеваний [1]. Ярким примером источника таких веществ является Арония черноплодная (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot) [2]. Это растение высоко ценилось как противопропростудное и вяжущее средство [3, 4].

Арония черноплодная — *A. melanocarpa* относится к семейству розоцветных Rosaceae и представляет собой многолетний листопадный кустарник высотой до 3 м. Продуктивный возраст ветвей — не более 10 лет. Восстановление куста происходит за счет ежегодно образующихся порослевых побегов и корневых отпрысков. Однолетние побеги красно-бурые, побеги старшего возраста — темно-серые. Корневая система мочковатая, состоит из вертикально и горизонтально расположенных корней. Листья обратнояйцевидные, с пильчатым краем, очередные, длиной 4–8 см и шириной 3–5 см, летом — ярко-зеленые, осенью — красные; верхняя сторона листьев кожистая, глянцевая, гладкая, темно-зеленая, нижняя — слабоопушенная с беловато-матовым оттенком. Цветки небольшие, белые, пятилепестные, двуполые, собраны в плотные щитковидные соцветия 5–6 см в диаметре. Цветет арония в мае–июне примерно через 2 недели после распускания листьев, цветение продолжается 12–15 дней. Аро-

ния — самоопыляемое растение, а позднее цветение исключает возможность повреждения цветков весенними заморозками, что обеспечивает хорошее ежегодное плодоношение. Плоды созревают в конце августа–начале сентября, плодоношение начинается с 3–5 лет. Плоды шаровидной формы, реже — сдавленно-округлые, черного цвета, с сизым налетом, диаметром 10–15 мм. Кожича плодов плотная, мякоть фиолетово-красная, почти черная, вкус кисло-сладкий, вяжущий [5].

Родина аронии — восточная часть Северной Америки. В 1935 г. растение попало сначала на Алтай, а затем распространилось по другим регионам. В культуру в России была введена И.В. Мичуриным, который рекомендовал ее для северного садоводства. Благодаря своей неприхотливости и зимостойкости *A. melanocarpa* интродуцирована почти во всех эколого-географических районах нашей страны, даже в тех, где затруднено возделывание других плодово-ягодных культур. Растение светолюбивое, к почвам малотребовательное. Размножают аронию семенами, вертикальными и горизонтальными отводками, делением куста, корнеотпрысками, зелеными черенками и прививкой [6].

Плоды *A. melanocarpa* являются официальным лекарственным сырьем [7] и внесены в Государственный реестр лекарственных средств (гос.

регистрация на сухие плоды № 85/301/5, на свежие — № 71/609/16, № 73/941/24) [8].

Плоды *A. melanocarpa* содержат множество соединений, таких как углеводы, органические кислоты, аминокислоты, минералы, витамины, ароматические соединения и полифенолы [9]. Химический состав плодов аронии зависит от многих факторов, включая климатические условия, состав почвы, зрелость ягод, методы сбора урожая и условия хранения [10].

Углеводы. Основными углеводами, входящими в состав плодов аронии черноплодной, являются сахара, а их общее содержание может варьировать от 68 до 158 г/кг [11]. Согласно анализу химического состава, среди сахаров можно выделить глюкозу (11–40 г/кг), фруктозу (14–42 г/кг) и сорбит (44–76 г/кг). Сахароза обнаружена в ягодах в количестве до 0.34% [12].

Органические кислоты. Содержание органических кислот в аронии черноплодной низкое (1.1–1.4%) [11, 12]. Лидирующее место среди кислот занимают L-яблочная (13.1 г/кг), лимонная (2.1 г/кг) и хинная (5.9 г/кг) кислоты. Также, помимо перечисленных кислот, в плодах аронии содержатся шикимовая, щавелевая и янтарная кислоты, однако их количество минимально [3, 11]. Исследование химического состава жмыха плодов аронии черноплодной показало, что в этом продукте содержится галактуроновая кислота [13].

Белки и аминокислоты. Общее содержание белка в плодах аронии черноплодной низкое (0.7 г/100 г сырой массы), белки в основном содержат в своем составе следующие аминокислоты: глутаминовую, аспарагиновую и аргинин [3, 14].

Минералы, микро- и макроэлементы и витамины. Минеральное содержание (зольность) свежих плодов аронии составляет 4–6 г/кг [3], сока — 5 г/кг [15]. Суммарное содержание золы в жмыхах находится на уровне 1.4–3.9% в сухом веществе, причем наиболее зольными являются семена [13].

Среди макроэлементов, входящих в состав аронии черноплодной, основными являются калий и кальций, которые играют ключевую роль в окислительно-восстановительных процессах, переносе металлов, а также в ряде важных биохимических реакций [16, 17]. Основными микроэлементами являются Fe, Zn, Cu, Mn и Sn [13, 17].

В соке, полученном из плодов аронии, обнаружены следующие витамины: B₁ (25–90 мкг/100 мл), B₂ (25–110 мкг/100 мл), B₆ (30–85 мкг/100 мл), аскорбиновая кислота (5–100 мг/100 мл), пантотеновая кислота (50–380 мкг/100 мл) и ниацин (100–550 г/100 мл) [9].

Ароматические соединения. В настоящее время в аронии черноплодной идентифицировано более 48 ароматических соединений, из которых количественно лидируют амигдалин, циангидрин

бензальдегида, синильная кислота, бензальдегид, бензиловый спирт, 2-фенилатанол, фенилацетальдегид [3]. Химический анализ сока из плодов аронии показал, что среди ароматических соединений основными являются следующие: спирты (48.9%), кетоны (30.3%), углеводороды (0.2%), кислоты (5.8%), альдегиды (2.9%), терпены (0.6%), сложные эфиры (0.3%). Наиболее распространенные соединения — 3-пентен-2-он (23.6%), 1-гексанол (18.2%) и 2-гексен-1-ол (11.1%) [17].

Полифенолы. Арония черноплодная является одним из самых богатых источников полифенолов среди других растений [18] и отличается высоким содержанием процианидинов, антоцианидинов и фенольных кислот, в то время как флавонолы присутствуют в небольших количествах [19].

При сборе плодов и приготовлении из них экстрактов всегда нужно учитывать, что полифенольный состав аронии значительно меняется в процессе их развития и созревания. Наибольшее содержание полифенолов наблюдается в незрелых плодах [20]. Также на полифенольный состав влияют погодные условия (температура и инсоляция) [10].

Основным полифенольным классом, в составе аронии черноплодной, являются процианидины, процентное содержание которых составляет 66%. Единицами процианидинов являются катехины, связанные между собой в основном C4–C6 и C4–C8 связями [19, 21]. Вторым по количеству содержанию является еще один класс полифенолов — антоцианы. Их содержание составляет около 25% от общего количества полифенолов. В основном они представляют собой смесь четырех различных гликозидов цианидина: 3-*O*-галактозида (68.9%), 3-*O*-глюкозида (1.3%), 3-*O*-арабинозида (27.5%) и 3-*O*-оксилозида (2.3%). Кроме того, в минимальном количестве в аронии представлены следующие антоцианы: пеларгонидин 3-*O*-галактозид и пеларгонидина арабинозид [19]. Общее содержание антоцианов может колебаться от 307 до 1480 мг на 100 г сырой массы [3].

Фенольные кислоты составляют 7.5% от всех полифенолов аронии. Основные соединения этой группы — хлорогеновая, неохлорогеновая и розмариновая кислоты [19, 22].

Флавонолы — группа полифенолов, содержащихся в аронии черноплодной в минимальном количестве (около 1.3% от общего количества полифенолов). Согласно химическому анализу, по большей части это кверцетин [19]. В следовых количествах арония черноплодная содержит кверцетин-3-*O*-виканозид, а также кверцетин-3-*O*-робинобиозид [23]. Известно, что общее содержание флавонолов в листьях (180–786 мг/100 г) выше, чем в плодах (12–44 мг/100 г) [22].

Известно, что полифенолы, а также другие биологически активные вещества, содержащиеся в различных частях аронии черноплодной, обладают широким спектром биологической активности и низкой токсичностью [24].

В настоящее время, это растение представляет большой интерес для онкологов-экспериментаторов в качестве сырья для создания на его основе средств, для дополнительной терапии пациентов со злокачественными новообразованиями.

Во многих экспериментальных работах показано, что экстракты, выделенные из различных частей растения, оказывают противоопухолевое действие. Так, в экспериментах *in vitro* при использовании экстракта из плодов аронии, обогащенного антоцианами, наблюдали ингибирование пролиферации опухолевых клеток толстой кишки (HT-29) и меланомы кожи человека [25, 26]. В работе E.-S. Hwang (2018) показано, что 48-часовая инкубация клеток гепатоцеллюлярной карциномы человека SK-Hep1 совместно с экстрактом из листьев аронии приводит к торможению их роста [27]. Кроме того, добавление этого экстракта в культуру HL60 оказывало антипролиферативное действие в отношении опухолевых клеток [28]. Антоцианы из аронии способны связываться с рецепторами эстрогена ER α и β в клетках опухоли, оказывая воздействие, сходное с таковым официального препарата тамоксифена, селективного модулятора рецепторов эстрогена, применяемого для лечения эстроген-зависимых опухолей молочной железы [29]. Противоопухолевое действие экстракта из плодов аронии показано на животных с перевиваемыми опухолями. Так, на мышах с меланомой B-16 применение антоциансодержащего комплекса (АСК) из аронии приводило к торможению роста первичной опухоли (на 26%): ее масса отличалась от контрольных значений в 1.3 раза [30]. Уменьшение массы первичной опухоли также отмечено у мышей с раком легкого-67, получавших изолированно АСК аронии [31].

Одним из механизмов, лежащих в основе противоопухолевого действия растительных экстрактов, является их воздействие на протеины – регуляторы клеточного цикла (p53, p21, p27, циклин D 1, циклин A), в результате чего подавляется деление опухолевых клеток [32]. Многими авторами показано, что использование экстракта из аронии черноплодной, обогащенного антоцианами, подавляет рост опухолевых клеточных линий благодаря активации циклин-зависимых киназ и подавлению циклиновых белков, которые являются ключевыми точками в основных фазах клеточного цикла (G1-S, S, G2-M) [33, 34].

Известно, что антоцианы вызывают апоптоз опухолевых клеток посредством высвобождения митохондриального цитохрома C, активации

ферментов, высвобождающих каспазу, увеличения соотношения регуляторных белков (Bax и Bcl-2) [35]. В работе T. Sharif et al. [36] показано, что сок из аронии вызывает в клетках лейкемии человека усиление экспрессии опухолевого супрессора p73, активной каспазы 3 и подавляет экспрессию циклина B1 и эпигенетического интегратора UHRF1. Кроме того, сок значительно снижает потенциал митохондриальной мембраны и вызывает выброс цитохрома C в цитоплазму. Авторы показали, что противоопухолевая активность связана преимущественно с хлорогеновыми кислотами, некоторыми цианидиновыми гликозидами и производными кверцетина [36].

Еще одним механизмом запуска апоптоза с помощью экстрактов из аронии черноплодной, богатых антоцианами, является их влияние на активность топоизомераз. Ферменты топоизомеразы I и II играют жизненно важную роль в репликации ДНК, облегчая раскручивание суперспиральной ДНК. Следовательно, ингибирование активности топоизомеразы приводит к апоптозу [37]. В экспериментальных работах показано, что использование экстракта из плодов, приводит к снижению активности топоизомеразы I и II в опухолевых клетках HT-29 [38].

В литературе встречаются сведения об антиметастатических свойствах аронии черноплодной. Согласно экспериментальным данным, добавление экстракта из листьев аронии в опухолевую клеточную культуру человека SK-Hep1 приводит к торможению клеточной миграции, а также способствует снижению концентрации MMP-2/9, за счет подавления экспрессии мРНК MT1-MMP [27]. На животных с карциномой легких Льюис показана способность АСК из плодов аронии черноплодной ингибировать развитие метастазов: у животных, получавших растительный комплекс в изолированном режиме, достоверно меньше контрольного уровня оказались масса легких с метастазами и площадь метастатического поражения легких [30].

В механизме противометастатического действия экстрактов из аронии черноплодной имеет значение антиангиогенный эффект антоцианов, который опосредуется несколькими механизмами: угнетением экспрессии фактора роста эндотелия сосудов (VEGF), стимулирующего рост кровеносных сосудов, васкуляризацию опухолей и их метастазирование, и подавлением экспрессии рецепторов VEGF на эндотелиальных клетках через ингибирование активации сигнального пути STAT3 [39, 40]. Антиинвазивное действие, представляющее собой предотвращение деградации коллагена базальной мембраны путем протеолиза, также присуще антоцианам. Известно, что для своей инвазии опухолевые клетки секретируют протеолитические ферменты, вызываю-

щие деградацию внеклеточного матрикса. Причем деградация базальной мембраны зависит не от количества протеолитических ферментов, а от баланса активированных протеаз и их ингибиторов [41]. Матриксные металлопротеиназы и активаторы плазминогена — ферменты, регулирующие деградацию базальной мембраны. Подавление инвазии опухолевых клеток антоцианами осуществляется путем снижения ими экспрессии металлопротеиназ и урокиназного активатора плазминогена, а также стимуляции экспрессии тканевого ингибитора матриксной металлопротеиназы-2 и ингибитора активатора плазминогена [42].

Согласно литературным данным, развитие опухолей различного генеза сопровождается увеличением уровня триглицеридов и холестерина, что является одним из факторов развития процесса метастазирования [43]. Для антоцианов, выделенных из аронии черноплодной, характерен гиполипидемический эффект [44–46]. Кроме того, во многих исследованиях показано, что использование аронии черноплодной и ее экстрактов приводит к снижению общего холестерина [47, 48], модуляции инсулинового, адипогенного и воспалительного путей [49].

В процессе развития злокачественных новообразований возникают нарушения в прокоагулянтных, антикоагулянтных механизмах и системе фибринолиза, что также приводит к запуску процесса образования метастазов [50]. Выявлено нормализующее влияние плодов аронии на показатели свертываемости крови. Известно, что назначение коммерческого экстракта из аронии черноплодной пациентам со злокачественными новообразованиями приводит к нормализации гемостатических свойств плазмы крови [51–53].

Еще одним перспективным направлением в онкологии является исследование включения аронии черноплодной в схему химиотерапии злокачественных новообразований, с целью создания на ее основе препаратов для повышения эффективности и/или снижения токсического действия цитостатиков.

Опубликованы данные, полученные в результате комплексного изучения химического состава насыщенного антоцианами комплекса из *A. melanocarpa*, полученного на кафедре фармацевтического анализа ФГБОУ ВО “Сибирский государственный медицинский университет” (г. Томск) и его исследования в онкологическом эксперименте в НИИФиРМ им. Е.Д. Гольдберга (Томский НИМЦ). В составе комплекса, полученного экстракцией 95% подкисленным спиртом этиловым, определено содержание антоцианов ($5.83 \pm 0.25\%$), катехинов ($0.22 \pm 0.02\%$), дубильных веществ ($4.65 \pm 0.30\%$), фенолокислот ($0.27 \pm 0.01\%$) и других биологически активных веществ [54].

На животных с перевиваемыми карциномой легких Льюис (3LL), раком легкого-67 (РЛ-67) и меланомой В-16 (В-16) изучено влияние антоцианосодержащего комплекса *A. melanocarpa* (АСК) на эффективность цитостатического лечения. Так, на мышцах-самках линии С57BL/6 с перевивтой карциномой легких Льюис показана способность АСК плодов аронии черноплодной повышать антиметастатическое действие циклофосфана: при совместном использовании циклофосфана и АСК аронии достоверно повышался противометастатический эффект цитостатика, судя по уменьшению количества (в 2.0 раза) и площади (в 12.6 раза) метастазов в легких ($P < 0.01$), а также достижению максимальных значений индекса ингибирования метастазирования (98%).

У мышей с перевивой меланомой В-16 применение АСК аронии приводило к повышению противометастатического действия цитостатика. Так, в случае совместного использования циклофосфана и АСК аронии достоверно уменьшались количество и площадь метастазов в легочной ткани (в 2.1 раза) относительно этих показателей у животных группы монокимиотерапии [30].

Выявлено также повышение противометастатического действия циклофосфана под действием АСК (судя по уменьшению количества и площади метастазов в легких) у животных с раком легкого-67 [31].

Известно, что у онкологических больных уже активированы процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ), еще более возрастающие в процессе цитостатического лечения. Побочные эффекты химиотерапии напрямую связаны с процессами свободнорадикального окисления, наработкой активных форм кислорода (АФК) и реакциями свободнорадикального окисления (СРО), приводящими к окислительной модификации нуклеиновых кислот, белков и липидов. Так, метаболиты циклофосфана индуцируют ПОЛ, продукты которого нарушают все клеточные процессы, протекающие с потреблением энергии [55]. Нарушение баланса между свободными радикалами и антиоксидантной системой усиливает интоксикацию и приводит к повреждению здоровых органов и тканей, что оказывается лимитирующим фактором при решении вопроса о продолжении лечения [56]. Природные антиоксиданты способны связывать свободные радикалы, отдавая им электроны, препятствуя избыточной их концентрации на мембранах и, таким образом, прекращать процессы разрушения в клетках организма. Антиоксидантные свойства присущи флавоноидам, антоцианам: благодаря фенольной структуре и наличию гидроксильных групп в углеродных кольцах они напрямую связывают активные кислородные радикалы, вступая во взаимодействие с ними и приводя к стабилизации молекул [57–61],

тем самым защищая ДНК здоровых клеток от повреждающего воздействия интермедиантов и продуктов перекисного окисления липидов [62]. Также известно, что эти соединения переходят в хиноидную форму, которая сама по себе является субстратом для детоксицирующих ферментов II фазы метаболизма. Это приводит к индукции общего повышения защиты организма от токсических ксенобиотиков [63].

Сведения литературы указывают на способность экстракта аронии черноплодной снижать побочные эффекты доксорубина посредством уменьшения проявления оксидативного стресса, вызванного цитостатиком [64]. Аналогичные результаты были получены при исследовании влияния коммерческого экстракта из аронии на окислительный стресс у пациенток с метастазирующим раком молочной железы (РМЖ). Показано, что назначение растительного экстракта приводит к повышению активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутаза, глутатионпероксидаза и глутатионредуктаза) в плазме крови у пациентов с РМЖ как до, так и после операционного вмешательства, а также и на фоне использования цитостатиков [65]. Авторы предполагают, что механизм ингибции окислительного стресса с помощью экстракта заключается в снижении уровня в плазме крови гомоцистеина, который играет одну из ключевых ролей в процессе перекисного окисления липидов [65, 66]. В работе D. Rugina [66] также показано, что культивирование β -клеток поджелудочной железы совместно с экстрактом аронии черноплодной приводит к увеличению уровня таких антиоксидантных ферментов, как супероксиддисмутаза, каталаза и глутатионпероксидаза по сравнению с клетками, подвергшимися воздействию только прооксидантов [67].

Анемия встречается у половины онкологических больных, особенно при распространенном процессе, а у пациентов, получающих химиотерапию, ее частота достигает 90% [68]. Вследствие анемии в организме развивается гемическая гипоксия органов и тканей, а снижение содержания кислорода менее 1% стимулирует выработку факторов транскрипции, таких как HIF-1 α , NF-kB и AP-1 [69]. Индуцируемые ими изменения активности генома приводят к адаптации клеток к этому состоянию, стимулируют ангиогенез, блокируют апоптоз, способствуя усилению опухолевого роста, инвазии и метастазированию. Низкие концентрации кислорода также оказывают мутагенное действие, усиливают нестабильность генома и, соответственно, вариабельность опухолевых клеток, что является основой для дальнейшей клональной селекции наиболее устойчивых линий. Низкое содержание кислорода в клетке является фактором химиорезистентности опухо-

ли. Гипоксическое состояние способствует агрессивному развитию опухолей и является универсальным фактором неблагоприятного прогноза [70, 71]. В связи с этим, лечение анемии может приводить к повышению оксигенации опухоли и, таким образом, усиливать эффективность противопухолевой терапии [72].

В наших экспериментах на животных с опухолью обнаружено, что назначение АСК из аронии совместно с доксорубином приводит к стимуляции процессов восстановления костномозгового кроветворения, в особенности эритроидного роста. Так, отмечено повышение общей клеточности костного мозга, преимущественно за счет увеличения содержания эритронормобластов. Содержание клеток этой популяции в костном мозге мышей, которым вводили растительный комплекс на фоне химиотерапии, на протяжении всего срока эксперимента оказалось выше такового у животных, получавших только монохимиотерапию.

Состояние костномозгового кроветворения во многом зависит от функциональной активности пула кроветворных клеток-предшественников. Проведенные исследования позволили установить, что при введении АСК из аронии на фоне доксорубина наблюдалось достоверное увеличение (в 2.0 раза) выхода КОЕ-Э на 10-е сут после инъекции цитостатика, что превышает таковой показатель у животных, получавших референс препарат рекормон совместно с цитостатиком [73].

Антоциансодержащие растения также оказывают положительное влияние на иммунологический статус организма. Так, в работе T. Iwashima et al. [2019] показано, что экстракт плодов аронии подавляет усиленную экспрессию мРНК для IL-1 β и IL-6. Более того, под воздействием растительного экстракта наблюдалась ингибция работы сигнальной молекулы IL-6 — IL6ST (gp130) как на уровне мРНК, так и на уровне белка. Кроме того, было отмечено подавление увеличения экспрессии мРНК *CXCL8* (IL-8) и *CCL2* (MCP-1), что свидетельствует об иммуномодулирующем действии растительного экстракта [39].

Таким образом, приведенные выше данные убедительно доказывают перспективность создания на основе *A. melanocarpa* лекарственных средств для дополнительной терапии пациентов со злокачественными новообразованиями. Расширение арсенала средств для индивидуализации схем лечения и рационального выбора терапевтической тактики позволит улучшить качество и продлить жизнь пациентам с онкологической патологией. Кроме того, богатая сырьевая база и низкая стоимость растительного сырья делают такого рода препараты экономически доступными для большинства нуждающихся больных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buda V., Andor M., Antal D., Ardelean F., Pavel I.Z., Dehelean C., Soica C., Folescu R., Andrei F., Danciu C. 2021. Cardioprotective Effects of Cultivated Black Chokeberries (*Aronia* spp.): Traditional Uses, Phytochemistry and Therapeutic Effects. In: Bioactive Compounds in Nutraceutical and Functional Food for Good Human Health. IntechOpen. 23 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92238>
2. Borowska S., Brzóska M.M. 2016. Chokeberries (*Aronia melanocarpa*) and Their Products as a Possible Means for the Prevention and Treatment of Noncommunicable Diseases and Unfavorable Health Effects Due to Exposure to Xenobiotics. — Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 15(6): 982–1017. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12221>
3. Kulling S.E., Rawel H. 2008. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*). — A Review on the Characteristic Components and Potential Health Effects. — Planta Medica. 74(13): 1625–1634. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1088306>
4. Kokotkiewicz A., Jaremicz Z., Luczkiewicz M. 2010. Aronia Plants: A Review of Traditional Use, Biological Activities, and Perspectives for Modern Medicine. — J. Med. Food. 13(2): 255–269. <https://doi.org/10.1089/jmf.2009.0062>
5. Мазнев Н.И. 2006. Лекарственные растения: 15000 наименований лекарственных растений, сборов и рецептов. Описание, свойства, применение, противопоказания. М. 1056 с.
6. Виноградова Ю.К., Куклина А.Г. 2014. Арония Мичурина: от создания до натурализации. М. 137 с.
7. Государственный Реестр лекарственных средств. 2013. Т. 1. М.: Минздрав России, Фонд фармацевтической информации.
8. Государственная Фармакопея российской федерации. 2007. Ч. 1. 12-е изд. М.: Науч. Центр экспертизы средств мед. применения. 704 с.
9. Jurendic T., Scetar M. 2021. *Aronia melanocarpa* Products and By-Products for Health and Nutrition: A Review. — Antioxidants (Basel). 10(7): 1052. <https://doi.org/10.3390/antiox10071052>
10. Tolić M.-T., Krbavčić I.P., Vujević P., Milinović B., Jurčević I.L., Vahčić N. 2017. Effects of Weather Conditions on Phenolic Content and Antioxidant Capacity in Juice of Chokeberries (*Aronia melanocarpa* L.). — Pol. J. Food Nutr. Sci. 67(1): 67–74. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2016-0009>
11. Denev P., Kratchanova M., Petrova I., Klisurova D., Georgiev Y., Ognyanov M., Yanakieva I. 2018. Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot) Fruits and Functional Drinks Differ Significantly in Their Chemical Composition and Antioxidant Activity. — J. Chem. Article ID 9574587. <https://doi.org/10.1155/2018/9574587>
12. Sidor A., Gramza-Michałowska A. 2019. Black Chokeberry *Aronia melanocarpa* L. — A Qualitative Composition, Phenolic Profile and Antioxidant Potential. — Molecules. 24(20): 3710. <https://doi.org/10.3390/molecules24203710>
13. Sojka M., Kołodziejczyk K., Milala J. 2013. Polyphenolic and basic chemical composition of black chokeberry industrial by-products. — Ind. Crop. Prod. 51: 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.051>
14. Pieszka M., Gogol P., Pietras M., Pieszka M. 2015. Valuable Components of Dried Pomaces of Chokeberry, Black Currant, Strawberry, Apple and Carrot as a Source of Natural Antioxidants and Nutraceuticals in the Animal Diet. — Ann. Anim. Sci. 15(2): 475–491. <https://doi.org/10.2478/aoas-2014-0072>
15. Yamane T., Kozuka M., Wada-Yoneta M., Sakamoto T., Nakagaki T., Nakano T., Ohkubo I. 2017. Aronia juice suppresses the elevation of postprandial blood glucose levels in adult healthy Japanese. — Clin. Nutr. Exp. 12: 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.clnex.2017.01.002>
16. Pavlović A.N., Brcanović J.M., Veljković J.N., Mitić S.S., Tošić S.B., Kalicanin B.M., Kostić D.A., Đorđević M.S., Velimirović D.S. 2015. Characterization of commercially available products of aronia according to their metal content. — Fruits. 70(6): 385–393. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015038>
17. Romani A., Vignolini P., Ieri F., Heimler D. 2016. Polyphenols and Volatile Compounds in Commercial Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) Products. — Nat. Prod. Commun. 11(1): 99–102. <https://doi.org/10.1177/1934578X1601100129>
18. Jakobek L., Šeruga M., Medvidović-Kosanović M., Novak I. 2007. Antioxidant activity and polyphenols of Aronia in comparison to other berry species. — Agric. Conspec. Sci. 72(4): 301–306.
19. Oszmiański J., Wojdyło A. 2005. *Aronia melanocarpa* phenolics and their antioxidant activity. — Eur. Food Res. Technol. 221(6): 809–813. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0002-5>
20. Gralec M., Wawer I., Zawada K. 2019. *Aronia melanocarpa* berries: Phenolics composition and antioxidant properties changes during fruit development and ripening. — Emir. J. Food Agric. 31(3): 214–221. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i3.1921>

21. Ćujić N., Kardum N., Šavikin K., Zdunić G., Janković T., Menković N. 2018. Potential of Chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) as a Therapeutic Food. — In: Handbook of Food Bioengineering. Therapeutic Foods. Vol. 8. Academic Press. P. 209–237.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811517-6.00007-6>
22. Szopa A., Kokotkiewicz A., Kubica P., Piotr Banaszczak P., Wojtanowska-Krośniak A., Krośniak M., Marzec-Wróblewska U., Badura A., Zagrodzki P., Bucinski A., Luczkiewicz M., Ekiert H. 2017. Comparative analysis of different groups of phenolic compounds in fruit and leaf extracts of *Aronia* sp.: *A. melanocarpa*, *A. arbutifolia*, and *A. × prunifolia* and their antioxidant activities. — Eur. Food Res. Technol. 243(9): 1645–1657.
<https://doi.org/10.1007/s00217-017-2872-8>
23. Ochmian I.D., Grajkowski J., Smolik M. 2012. Comparison of Some Morphological Features, Quality and Chemical Content of Four Cultivars of Chokeberry Fruits (*Aronia melanocarpa*). — Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca. 40(1): 253–260.
<https://doi.org/10.15835/nbha4017181>
24. Сорокопудов В.Н., Дейнека В.И., Лукина И.П., Дейнека Л.А. 2005. Антоцианы плодов некоторых видов рода *Rubus* L. Из коллекции ботанического сада БелГУ. — Химия растительного сырья. 4: 61–65. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9428606>
25. Malik M., Zhao C., Schoene N., Guisti M.M., Moyer M.P., Magnuson B.A. 2003. Anthocyanin-Rich Extract From *Aronia melanocarpa* L. Induces a Cell Cycle Block in Colon Cancer but Not Normal Colonic Cells. — Nutr. Cancer. 46(2): 186–196.
https://doi.org/10.1207/S15327914NC4602_12
26. Diaconeasa Z., Știrbu I., Xiao J., Leopold N., Ayvaz Z., Danciu C., Ayvaz H., Stănilă A., Nistor M., Socaciu C. 2020. Anthocyanins, Vibrant Color Pigments, and Their Role in Skin Cancer Prevention. — Biomedicines. 8(9): 336.
<https://doi.org/10.3390/biomedicines8090336>
27. Thi N.D., Hwang E.-S. 2018. Anti-cancer and anti-inflammatory activities of aronia (*Aronia melanocarpa*) leaves. — Asian Pac. J. Trop. Biomed. 8(12): 586–592.
<https://doi.org/10.4103/2221-1691.248095>
28. Skupień K., Kostrzewa-Nowak D., Oszmiański J., Tarasiuk J. 2008. *In vitro* antileukaemic activity of extracts from chokeberry (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott) and mulberry (*Morus alba* L.) leaves against sensitive and multidrug resistant HL60 cells. — Phytother. Res. 22(5): 689–694.
<https://doi.org/10.1002/ptr.2411>
29. Aiyer H.S., Anni M., Warri A.M., Woode D.R., Hilakivi-Clarke L., Clarke R. 2012. Influence of berry polyphenols on receptor signaling and cell-death pathways: implications for breast cancer prevention. — J. Agric. Food Chem. 60(23): 5693–5708.
<https://doi.org/10.1021/jf204084f>
30. Андреева В.Ю., Шейкин В.В., Калинин Г.И., Разина Т.Г., Разина Т.Г., Зуева Е.П., Рыбалкина О.Ю., Ульрих А.В. 2020. Разработка средства на основе плодов аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot), повышающего эффективность химиотерапии опухолей. — Химия растительного сырья. 4: 219–226.
<https://doi.org/10.14258/jcprpm.2020046339>
31. Рыбалкина О.Ю., Разина Т.Г., Сафонова Е.А., Киселева Е.А., Ульрих А.В., Андреева В.Ю., Исайкина Н.В., Калинин Г.И., Зуева Е.П. 2021. *Aronia melanocarpa* и *Sorbus aucuparia* (Rosaceae) как перспективные источники получения антоцианосодержащих комплексов для дополнительной терапии перевиваемых опухолей. — Растит. ресурсы. 2: 186–192.
<https://doi.org/10.31857/S0033994621020072>
32. Shih P.H., Yeh C.T., Yen G.C. 2005. Effects of antocyanins on the inhibition of proliferation and induction of apoptosis in human gastric adenocarcinoma cells. — Food Chem. Toxicol. 43(10): 1557–1566.
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.05.001>
33. Lazzè M.C., Savio M., Pizzala R., Cazzalini O., Perucca P., Scovassi A.I., Stivala L.A., Bianchi L. 2004. Anthocyanins induce cell cycle perturbations and apoptosis in different human cell lines. — Carcinogenesis. 25(8): 1427–1433.
<https://doi.org/10.1093/carcin/bgh138>
34. Gill N.K., Rios D., Osorio-Camacena E., Mojica B.E., Kaur B., Soderstrom M.A., Gonzalez M., Laat B., Poblete C., Kaur N., Singh H., Forester S.C. 2020. Anticancer Effects of Extracts from Three Different Chokeberry Species. — Nutrition and Cancer. 73(7): 1168–1174.
<https://doi.org/10.1080/01635581.2020.1789679>
35. Dharmawansa K.V.S., Hoskin D.W., Rupasinghe H.P.V. 2020. Chemopreventive Effect of Dietary Anthocyanins against Gastrointestinal Cancers: A Review of Recent Advances and Perspectives. — Int. J. Mol. Sci. 21(18): 6555.
<https://doi.org/10.3390/ijms21186555>
36. Sharif T., Alhosin M., Auger C., Minker C., Kim J.H., Etienne-Selloum N., Bories P., Gronemeyer H., Lobstein A., Bronner C., Fuhrmann G., Schini-Kerth V.B. 2012. *Aronia Melanocarpa* Juice Induces a Redox-Sensitive p73-Related Caspase 3-Dependent Apoptosis in Human Leukemia Cells. — PLoS One. 7(3): e32526.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032526>

37. Webb M.R., Min K., Ebeler S.E. 2008. Anthocyanin interactions with DNA: Interactions, topoisomerase I inhibition and oxidative reactions. — J. Food Biochem. 32(5): 576–596.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2008.00181.x>
38. Esselen M., Fritz J., Hutter M., Teller N., Baechler S., Boettler U., Marczylo T.H., Gescher A.J., Marko D. 2011. Anthocyanin-rich extracts suppress the DNA-damaging effects of topoisomerase poisons in human colon cancer cells. — Mol. Nutr. Food Res. 55: 143–153.
<https://doi.org/10.1002/mnfr.201000315>
39. Iwashima T., Kudome Y., Kishimoto Y., Saita E., Tanaka M., Taguchi C., Hirakawa S., Mitani N., Kondo K., Iida K. 2019. Aronia berry extract inhibits TNF- α -induced vascular endothelial inflammation through the regulation of STAT3. — Food Nutr. Res. 63: 3361.
<https://doi.org/10.29219/fnr.v63.3361>
40. Багхи Д., Сен К.К., Багхи М., Аталай М. 2004. Антиангиогенные, антиоксидантные и антиканцерогенные свойства нового, богатого антоцианином препарата из экстракта ягод. — Биохимия. 69(1): 95–102.
<https://biochemistrymoscow.com/f/2004/2004-01-0095-avtjgsek.pdf>
41. Wang L.-S., Stoner G. 2008. Antocyanins and their role in cancer prevention. — Cancer Lett. 269(2): 281–290.
<https://doi.org/10.1016/j.canlet.2008.05.020>
42. Brandstetter H., Grams F., Glitz D., Lang A., Robert Huber R., Wolfram Bode W., Hans-Willi Krell H.-W., Engh R.A. 2001. The 1.8-Å crystal structure of a matrix metalloproteinase 8-barbiturate inhibitor complex reveals a previously unobserved mechanism for collagenase structure recognition. — J. Biol. Chem. 276(20): 17405–17412.
<https://doi.org/10.1074/jbc.M007475200>
43. Pelton K., Coticchia C.M., Curatolo A.S., Schaffner C.P., Zurakowski D., Solomon K.R., Moses M.A. 2014. Hypercholesterolemia induces angiogenesis and accelerates growth of breast tumors *in vivo*. — Am. J. Pathol. 184(7): 2099–2110.
<https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2014.03.006>
44. Broncel M., Koziróg-Kołacińska M., Andrykowski G., Duchnowicz P., Koter-Michalak M., Owczarczyk A., Chojnowska-Jezierska J. 2007. Effect of anthocyanins from *Aronia melanocarpa* on blood pressure, concentration of endothelin-1 and lipids in patients with metabolic syndrome. — Pol. Merk. Lekarski. 23(134): 116–9. PMID: . (In Polish)18044341
45. Sikora J., Broncel M., Mikiciuk-Olasik E. 2014. *Aronia melanocarpa* Elliot reduces the activity of angiotensin I-converting enzyme — *in vitro* and *ex vivo* studies. — Oxid. Med. Cell Longev. 2014. Article ID 739721.
<https://doi.org/10.1155/2014/739721>
46. Broncel M., Koziróg M., Duchnowicz P., Koter-Michalak M., Sikora J., Chojnowska-Jezierska J. 2010. *Aronia melanocarpa* extract reduces blood pressure, serum endothelin, lipid, and oxidative stress marker levels in patients with metabolic syndrome. — Med. Sci. Monit. 16(1): CR28–34. PMID: .20037491
47. Kim B., Ku C.S., Pham T.X., Park Y., Martin D.A., Xie L., Taheri R., Lee J., Bolling B.W. 2013. *Aronia melanocarpa* (chokeberry) polyphenol-rich extract improves antioxidant function and reduces total plasma cholesterol in apolipoprotein E knockout mice. — Nutr. Res. 33(5): 406–413.
<https://doi.org/10.1016/j.nutres.2013.03.001>
48. Valcheva-Kuzmanova S., Kuzmanov K., Tanchev S., Belcheva A. 2007. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of *Aronia melanocarpa* fruit juice in streptozotocin-induced diabetic rats. — Methods Find. Exp. Clin. Pharmacol. 29: 101–105.
<https://doi.org/10.1358/mf.2007.29.2.1075349>
49. Qin B., Anderson R.A. 2012. An extract of chokeberry attenuates weight gain and modulates insulin, adipogenic and inflammatory signalling pathways in epididymal adipose tissue of rats fed a fructose-rich diet. — Br. J. Nutr. 108(4): 581–587.
<https://doi.org/10.1017/S000711451100599X>
50. Danckwardt S., Hentze M.W., Kulozik A.E. 2013. Pathologies at the nexus of blood coagulation and inflammation: thrombin in hemostasis, cancer, and beyond. — J. Mol. Med. (Berl). 91(11): 1257–1271.
<https://doi.org/10.1007/s00109-013-1074-5>
51. Bijak M., Bobrowski M., Borowiecka M., Podstędek A., Golański J., Nowak P. 2011. Anticoagulant effect of polyphenols-rich extracts from black chokeberry and grape seeds. — Fitoterapia. 82(6): 811–817.
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2011.04.017>
52. Malinowska J., Babicz K., Olas B., Stochmal A., Oleszek W. 2012. *Aronia melanocarpa* extract suppresses biotoxicity of homocysteine and its metabolite on hemostatic activity of fibrinogen and plasma. — Nutrition. 28(7–8): 793–798.
<https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.10.012>
53. Sikora J., Broncel M., Markowicz M., Chałubiński M., Wojdan K., Mikiciuk-Olasik E. 2012. Short-term supplementation with *Aronia melanocarpa* extract improves platelet aggregation, clotting, and fibrinolysis in patients with metabolic syndrome. — Eur. J. Nutr. 51(5): 549–556.
<https://doi.org/10.1007/s00394-011-0238-8>
54. Андреева В.Ю., Калинкина Г.И., Коломиец Н.Э., Исайкина Н.В. 2013. Методика определения антоцианов в плодах аронии черноплодной. — Фармация. 3: 19–21.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=19124904>
55. Минаева Л.В. 2007. Экспериментальная оценка роли изменений системы глутатиона в реализации побочных цитотоксических эффектов повторного введения циклофосфана. Автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб. 20 с.

56. Павлов В.Н., Рахматуллина И.Р., Фархутдинов Р.Р., Пушкарёв В.А., Данилко К.В., Галимова Э.Ф., Баймурзина Ю.Л., Петрова И.В., Мочалов К.С. 2017. Свободнорадикальное окисление и канцерогенез: дискуссионные вопросы. — Креативная хирургия и онкология. 7(2): 54–61.
<https://doi.org/10.24060/2076-3093-2017-7-2-54-61>
57. Wang S.Y., Jiao H. 2000. Scavenging capacity of berry crops on superoxide radicals, hydrogen peroxide, hydroxyl radicals and singlet oxygen. — J. Agric. Food Chem. 48(11): 5677–5684.
<https://doi.org/10.1021/jf000766i>
58. Логвинова Е.Е., Брежнева Т.А., Сливкин А.И. 2015. Исследование содержания биологически активных веществ — антиоксидантов в лекарственных формах плодов рябины. — В сб.: М-лы конф. “Современные требования к лекарственному растительному сырью и лекарственным растительным препаратам”. — Москва, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова. С. 30–31.
59. Oszmiański J., Wojdyło A. 2005. *Aronia melanocarpa* phenolics and their antioxidant activity. — Eur. Food Res. Technol. 221(6): 809–813.
<https://doi.org/10.1007/s00217-005-0002-5>
60. Heim K.E., Tagliaferro A.R., Bobilya D.J. 2002 Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. — J. Nutr. Biochem. 13(10): 572–584.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2863\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0955-2863(02)00208-5)
61. Kedzierska M., Olas B., Wachowicz B., Stochmal A., Oleszek W., Jeziorski A., Piekarski J., Glowacki R. 2009. An extract from berries of *Aronia melanocarpa* modulates the generation of superoxide anion radicals in blood platelets from breast cancer patients. — Planta Med. 75(13): 1405–9.
<https://doi.org/10.1055/s-0029-1185718>
62. Логвинова Е.Е., Брежнева Т.А., Сливкин А.И., Трубенева И.С., Тарабрина В.Н. 2015. Сравнительный анализ мембранстабилизирующего действия препаратов плодов рябины черноплодной. — Вестник ВГУ, серия: химия, биология, фармация. 4: 126–129.
<http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/chembio/2015/04/2015-04-23.pdf>
63. Зверев Я.Ф. 2019. Противоопухолевая активность флавоноидов. — Бюллетень сибирской медицины. 18(2): 181–194.
<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2019-2-181-194>
64. Pavlova V., Sainova I., Alexieva B., Valkova I., Markova Tz., Nikolova E. 2014. Antioxidant effect of *Aronia melanocarpa* extract after doxorubicin treatment. — Bulgarian J. Agricultural Science. 20 (Supplement 1): 188–192.
<https://www.agrojournal.org/20/01s-39.pdf>
65. Kędzierska M., Glowacki R., Czernek U., Szydłowska-Pazera K., Potemski P., Piekarski J., Jeziorski A., Olas B. 2013. Changes in plasma thiol levels induced by different phases of treatment in breast cancer; the role of commercial extract from black chokeberry. — Mol. Cell. Biochem. 372: 47–55.
<https://doi.org/10.1007/s11010-012-1444-2>
66. Skoczylńska A., Jędrzychowska I., Poręba R., Affelska-Jercha A., Turczyn B., Wojakowska A., Andrzejak R. 2007. Influence of chokeberry juice on arterial blood pressure and lipid parameters in men with mild hypercholesterolemia. — Pharmacol. Rep. 59(Suppl. 1): 177–180. http://if-pan.krakow.pl/pjp/pdf/2007/s1_177.pdf
67. Rugina D., Diaconeasa Z., Coman C., Bunea A., Socaciu C., Pinteau A. 2015. Chokeberry Anthocyanin Extract as Pancreatic β -Cell Protectors in Two Models of Induced Oxidative Stress. — Oxidative medicine and cellular longevity. Article ID 429075
<https://doi.org/10.1155/2015/429075>
68. Spivak J.L., Gascón P., Ludwig H. 2009. Anemia management in oncology and hematology. — The Oncologist. 14(S1): 43–56.
<https://doi.org/10.1634/theoncologist.2009-S1-43>
69. Vaupel P. 2008. Hypoxia and aggressive tumor phenotype: implications for therapy and prognosis. — The Oncologist 13(S3): 21–26.
<https://doi.org/10.1634/theoncologist.13-S3-21>
70. Caro J.J., Salas M., Ward A., Goss G. 2001. Anemia as an independent prognostic factor for survival in patients with cancer: a systemic, quantitative review. — Cancer. 91(12): 2214–2221.
[https://doi.org/10.1002/1097-0142\(20010615\)91:12<2214::AID-CNCR1251>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/1097-0142(20010615)91:12<2214::AID-CNCR1251>3.0.CO;2-P)
71. Bottaro D.P., Liotta, L.A. 2003. Cancer: out of air is not out of action. — Nature. 423(6940): 593–595.
<https://doi.org/10.1038/423593a>
72. Новик А.В. 2009. Анемия и метаболические расстройства у онкологических больных. — Практическая онкология. 10(3): 131–140. <https://practical-oncology.ru/articles/228.pdf>
73. Кириленко К.М., Рыбалкина О.Ю. 2018. Влияние экстракта плодов аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot) на эритроидный росток кроветворения в условиях цитостатического воздействия. — В сб.: Перспективы развития фундаментальных наук: сб. науч. тр. XV Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск: Издательский Дом Томского гос. ун-та, Биология и фундаментальная медицина. 4: 78–80.
https://conf-prfn.org/Arch/Proceedings_2018_vol_4.pdf

Prospects for the Use of *Aronia melanocarpa* (Rosaceae) in Cancer Therapy

O. Yu. Rybalkina^{a,*}, T. G. Razina^a, E. P. Zueva^a, V. Yu. Andreeva^b, G. N. Zyuz'kov^a,
G. I. Kalinkina^b, V. V. Zhdanov^a

^a Goldberg Research Institute of Pharmacology and Regenerative Medicine, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

^b Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

*e-mail: olgatomsk87@gmail.com

Abstract—The review presents the latest literature data and own data on some pharmacological properties of *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot. Particular attention is paid to the studies in experimental and clinical oncology.

Keywords: pharmacological activity, *Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot, anthocyanins, flavonoids

REFERENCES

1. Buda V., Andor M., Antal D., Ardelean F., Pavel I.Z., Dehelean C., Soica C., Folescu R., Andrei F., Danciu C. 2021. Cardioprotective Effects of Cultivated Black Chokeberries (*Aronia* spp.): Traditional Uses, Phytochemistry and Therapeutic Effects. In: Bioactive Compounds in Nutraceutical and Functional Food for Good Human Health. IntechOpen. 23 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92238>
2. Borowska S., Brzóska M.M. 2016. Chokeberries (*Aronia melanocarpa*) and Their Products as a Possible Means for the Prevention and Treatment of Noncommunicable Diseases and Unfavorable Health Effects Due to Exposure to Xenobiotics. — Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 15(6): 982–1017. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12221>
3. Kulling S.E., Rawel H. 2008. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*). — A Review on the Characteristic Components and Potential Health Effects. — Planta Medica. 74(13): 1625–1634. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1088306>
4. Kokotkiewicz A., Jaremicz Z., Luczkiewicz M. 2010. Aronia Plants: A Review of Traditional Use, Biological Activities, and Perspectives for Modern Medicine. — J. Med. Food. 13(2): 255–269. <https://doi.org/10.1089/jmf.2009.0062>
5. Maznev N.I. 2006. Medicinal plants: 15000 names of medicinal plants, officinal mixtures and recipes. Description, properties, application, contraindications. Moscow. 1056 p. (In Russian)
6. Vinogradova Yu.K., Kuklina A.G. 2014. *Aronia mitschurinii* from creation to naturalization. M. 137 p. (In Russian)
7. State Register of Medicinal Products. 2013. T. 1. Moscow. (In Russian).
8. State Pharmacopoeia of the Russian Federation. 2007. Part 1. 12th ed. Moscow. 704 p. (In Russian).
9. Jurendic T., Scetar M. 2021. *Aronia melanocarpa* Products and By-Products for Health and Nutrition: A Review. — Antioxidants (Basel). 10(7): 1052. <https://doi.org/10.3390/antiox10071052>
10. Tolić M.-T., Krbavčić I.P., Vujević P., Milinović B., Jurčević I.L., Vahčić N. 2017. Effects of Weather Conditions on Phenolic Content and Antioxidant Capacity in Juice of Chokeberries (*Aronia melanocarpa* L.). — Pol. J. Food Nutr. Sci. 67(1): 67–74. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2016-0009>
11. Denev P., Kratchanova M., Petrova I., Klisurova D., Georgiev Y., Ognyanov M., Yanakieva I. 2018. Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot) Fruits and Functional Drinks Differ Significantly in Their Chemical Composition and Antioxidant Activity. — J. Chem. 2018. Article ID 9574587. <https://doi.org/10.1155/2018/9574587>
12. Sidor A., Gramza-Michałowska A. 2019. Black Chokeberry *Aronia melanocarpa* L. — A Qualitative Composition, Phenolic Profile and Antioxidant Potential. — Molecules. 24(20): 3710. <https://doi.org/10.3390/molecules24203710>
13. Sojka M., Kołodziejczyk K., Milala J. 2013. Polyphenolic and basic chemical composition of black chokeberry industrial by-products. — Ind. Crop. Prod. 51: 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.051>
14. Pieszka M., Gogol P., Pietras M., Pieszka M. 2015. Valuable Components of Dried Pomaces of Chokeberry, Black Currant, Strawberry, Apple and Carrot as a Source of Natural Antioxidants and Nutraceuticals in the Animal Diet. — Ann.

- Anim. Sci. 15(2): 475–491.
<https://doi.org/10.2478/aoas-2014-0072>
15. Yamane T., Kozuka M., Wada-Yoneta M., Sakamoto T., Nakagaki T., Nakano T., Ohkubo I. 2017. Aronia juice suppresses the elevation of postprandial blood glucose levels in adult healthy Japanese. — Clin. Nutr. Exp. 12: 20–26.
<https://doi.org/10.1016/j.clnex.2017.01.002>
 16. Pavlović A.N., Brcanović J.M., Veljković J.N., Mitić S.S., Tošić S.B., Kalicanin B.M., Kostić D.A., Đorđević M.S., Velimirović D.S. 2015. Characterization of commercially available products of aronia according to their metal content. — Fruits. 70(6): 385–393.
<https://doi.org/10.1051/fruits/2015038>
 17. Romani A., Vignolini P., Ieri F., Heimler D. 2016. Polyphenols and Volatile Compounds in Commercial Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) Products. — Nat. Prod. Commun. 11(1): 99–102.
<https://doi.org/10.1177/1934578X1601100129>
 18. Jakobek L., Šeruga M., Medvidović-Kosanović M., Novak I. 2007. Antioxidant activity and polyphenols of Aronia in comparison to other berry species. — Agric. Conspec. Sci. 72(4): 301–306.
 19. Oszmiański J., Wojdyło A. 2005. *Aronia melanocarpa* phenolics and their antioxidant activity. — Eur. Food Res. Technol. 221(6): 809–813.
<https://doi.org/10.1007/s00217-005-0002-5>
 20. Gralec M., Wawer I., Zawada K. 2019. *Aronia melanocarpa* berries: Phenolics composition and antioxidant properties changes during fruit development and ripening. — Emir. J. Food Agric. 31(3): 214–221.
<https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i3.1921>
 21. Čujić N., Kardum N., Šavikin K., Zdunić G., Janković T., Menković N. 2018. Potential of Chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.) as a Therapeutic Food. In: Handbook of Food Bioengineering. Therapeutic Foods. V. 8. Academic Press. P. 209–237.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811517-6.00007-6>
 22. Szopa A., Kokotkiewicz A., Kubica P., Piotr Banaszczak P., Wojtanowska-Krośniak A., Krośniak M., Marzec-Wróblewska U., Badura A., Zagrodzki P., Bucinski A., Luczkiewicz M., Ekiert H. 2017. Comparative analysis of different groups of phenolic compounds in fruit and leaf extracts of *Aronia* sp.: *A. melanocarpa*, *A. arbutifolia*, and *A. × prunifolia* and their antioxidant activities. — Eur. Food Res. Technol. 243(9): 1645–1657.
<https://doi.org/10.1007/s00217-017-2872-8>
 23. Ochmian I.D., Grajkowski J., Smolik M. 2012. Comparison of Some Morphological Features, Quality and Chemical Content of Four Cultivars of Chokeberry Fruits (*Aronia melanocarpa*). — Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca. 40(1): 253–260. <https://doi.org/10.15835/nbha4017181>
 24. Sorokopudov V.N., Dejneka V.I., Lukina I.P., Dejneka L.A. 2005. [Anthocyanins from fruits of some *Rubus* L. species from the collection of the BelGU Botanical garden. — Khimija rastitel'nogo syr'ja. 4: 61–65.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9428606> (In Russian).
 25. Malik M., Zhao C., Schoene N., Guisti M.M., Moyer M.P., Magnuson B.A. 2003. Anthocyanin-Rich Extract From *Aronia melanocarpa* L. Induces a Cell Cycle Block in Colon Cancer but Not Normal Colonic Cells. — Nutr. Cancer. 46(2): 186–196.
https://doi.org/10.1207/S15327914NC4602_12
 26. Diaconeasa Z., Știrbu I., Xiao J., Leopold N., Ayvaz Z., Danciu C., Ayvaz H., Stănilă A., Nistor M., Socaciu C. 2020. Anthocyanins, Vibrant Color Pigments, and Their Role in Skin Cancer Prevention. — Biomedicine. 8(9): 336.
<https://doi.org/10.3390/biomedicine8090336>
 27. Thi N.D., Hwang E.-S. 2018. Anti-cancer and anti-inflammatory activities of aronia (*Aronia melanocarpa*) leaves. — Asian Pac. J. Trop. Biomed. 8(12): 586–592.
<https://doi.org/10.4103/2221-1691.248095>
 28. Skupień K., Kostrzewa-Nowak D., Oszmiański J., Tarasiuk J. 2008. *In vitro* antileukaemic activity of extracts from chokeberry (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott) and mulberry (*Morus alba* L.) leaves against sensitive and multidrug resistant HL60 cells. — Phytother Res. 22(5): 689–694.
<https://doi.org/10.1002/ptr.2411>
 29. Aiyer H.S., Anni M., Warri A.M., Woode D.R., Hilakivi-Clarke L., Clarke R. 2012. Influence of berry polyphenols on receptor signaling and cell-death pathways: implications for breast cancer prevention. — J. Agric. Food Chem. 60(23): 5693–5708.
<https://doi.org/10.1021/jf204084f>
 30. Andreyeva V.Yu., Sheykin V.V., Kalinkina G.I., Razina T.G., Zuyeva Ye.P., Rybalkina O.Yu., Ul'rikh A.V. 2020. Development of a drug based on the fruits of chokeberry (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott) improving the efficiency of tumor chemotherapy. — Khimija rastitel'nogo syr'ja. 4: 219–226.
<https://doi.org/10.14258/jcprm.2020046339> (In Russian)
 31. Rybalkina O.Yu., Razina T.G., Safonova E.A., Kiseleva E.A., Ulrikh A.V., Andreeva V.Yu., Isaykina N.V., Kalinkina G.I., Zueva E.P. 2021. *Aronia melanocarpa* and *Sorbus aucuparia* (Rosaceae) as a Promising Source of Anthocyanin Com-

- plexes as an Add-On to Cyclophosphamide Therapy. — *Rastitelnye resursy*. 2:186–192.
<https://doi.org/10.31857/S0033994621020072>
32. Shih P.H., Yeh C.T., Yen G.C. 2005. Effects of anthocyanins on the inhibition of proliferation and induction of apoptosis in human gastric adenocarcinoma cells. — *Food Chem. Toxicol.* 43(10): 1557–1566.
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.05.001>
33. Lazzè M.C., Savio M., Pizzala R., Cazzalini O., Perucca P., Scovassi A.I., Stivala L.A., Bianchi L. 2004. Anthocyanins induce cell cycle perturbations and apoptosis in different human cell lines. — *Carcinogenesis*. 25(8): 1427–1433.
<https://doi.org/10.1093/carcin/bgh138>
34. Gill N.K., Rios D., Osorio-Camaceda E., Mojica B.E., Kaur B., Soderstrom M.A., Gonzalez M., Plaat B., Poblete C., Kaur N., Singh H., Forester S.C. 2020. Anticancer Effects of Extracts from Three Different Chokeberry Species. — *Nutrition and Cancer*. 73(7): 1168–1174.
<https://doi.org/10.1080/01635581.2020.1789679>
35. Dharmawansa K.V.S., Hoskin D.W., Rupasinghe H.P.V. 2020. Chemopreventive Effect of Dietary Anthocyanins against Gastrointestinal Cancers: A Review of Recent Advances and Perspectives. — *Int. J. Mol. Sci.* 21(18): 6555.
<https://doi.org/10.3390/ijms21186555>
36. Sharif T., Alhosin M., Auger C., Minker C., Kim J.H., Etienne-Selloum N., Bories P., Gronemeyer H., Lobstein A., Bronner C., Fuhrmann G., Schini-Kerth V.B. 2012. *Aronia Melanocarpa* Juice Induces a Redox-Sensitive p73-Related Caspase 3-Dependent Apoptosis in Human Leukemia Cells. — *PLoS One*. 7(3): e32526.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032526>
37. Webb M.R., Min K., Ebeler S.E. 2008. Anthocyanin interactions with DNA: Interactions, topoisomerase I inhibition and oxidative reactions. — *J. Food Biochem.* 32(5): 576–596.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2008.00181.x>
38. Esselen M., Fritz J., Hutter M., Teller N., Baechler S., Boettler U., Marczylo T.H., Gescher A.J., Marko D. 2011. Anthocyanin-rich extracts suppress the DNA-damaging effects of topoisomerase poisons in human colon cancer cells. — *Mol. Nutr. Food Res.* 55: 143–153.
<https://doi.org/10.1002/mnfr.201000315>
39. Iwashima T., Kudome Y., Kishimoto Y., Saita E., Tanaka M., Taguchi C., Hirakawa S., Mitani N., Kondo K., Iida K. 2019. *Aronia* berry extract inhibits TNF- α -induced vascular endothelial inflammation through the regulation of STAT3. — *Food Nutr. Res.* 63: 3361.
<https://doi.org/10.29219/fnr.v63.3361>
40. Bagchi D., Sen S.K., Bagchi M., Atalay M. 2004. Anti-angiogenic, antioxidant, and anticarcinogenic properties of a novel antocyanidin-rich berry extract formula. — *Biochemistry (Moscow)*. 69(1): 75–80.
<https://doi.org/10.1023/B:BIRY.0000016355.19999.93>
41. Wang L.-S., Stoner G. 2008. Anthocyanins and their role in cancer prevention. — *Cancer Lett.* 269(2): 281–290.
<https://doi.org/10.1016/j.canlet.2008.05.020>
42. Brandstetter H., Grams F., Glitz D., Lang A., Robert Huber R., Wolfram Bode W., Hans-Willi Krell H.-W., Engh R.A. 2001. The 1.8-Å crystal structure of a matrix metalloproteinase 8-barbiturate inhibitor complex reveals a previously unobserved mechanism for collagenase structure recognition. — *J. Biol. Chem.* 276(20): 17405–17412.
<https://doi.org/10.1074/jbc.M007475200>
43. Pelton K., Coticchia C.M., Curatolo A.S., Schaffner C.P., Zurawski D., Solomon K.R., Moses M.A. 2014. Hypercholesterolemia induces angiogenesis and accelerates growth of breast tumors *in vivo*. — *Am. J. Pathol.* 184(7): 2099–2110.
<https://doi.org/10.1016/j.ajpath.2014.03.006>
44. Broncel M., Koziróg-Kołacińska M., Andrykowski G., Duchnowicz P., Koter-Michalak M., Owczarczyk A., Chojnowska-Jezierska J. 2007. Effect of anthocyanins from *Aronia melanocarpa* on blood pressure, concentration of endothelin-1 and lipids in patients with metabolic syndrome. — *Pol. Merk. Lekarski*. 23(134): 116–9. PMID: 18044341. (In Polish)
45. Sikora J., Broncel M., Mikiciuk-Olasik E. 2014. *Aronia melanocarpa* Elliot reduces the activity of angiotensin I-converting enzyme — *in vitro* and *ex vivo* studies. — *Oxid. Med. Cell Longev.* 2014. Article ID 739721.
<https://doi.org/10.1155/2014/739721>
46. Broncel M., Koziróg M., Duchnowicz P., Koter-Michalak M., Sikora J., Chojnowska-Jezierska J. 2010. *Aronia melanocarpa* extract reduces blood pressure, serum endothelin, lipid, and oxidative stress marker levels in patients with metabolic syndrome. — *Med. Sci. Monit.* 16(1): CR28–34. PMID: 20037491.
47. Kim B., Ku C.S., Pham T.X., Park Y., Martin D.A., Xie L., Taheri R., Lee J., Bolling B.W. 2013. *Aronia melanocarpa* (chokeberry) polyphenol-rich extract improves antioxidant function and reduces total plasma cholesterol in apolipoprotein E knockout mice. — *Nutr. Res.* 33(5): 406–413.
<https://doi.org/10.1016/j.nutres.2013.03.001>
48. Valcheva-Kuzmanova S., Kuzmanov K., Tanchev S., Belcheva A. 2007. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of *Aronia melanocarpa* fruit juice in streptozotocin-induced diabetic rats. — *Methods Find. Exp. Clin. Pharmacol.* 29: 101–105.
<https://doi.org/10.1358/mf.2007.29.2.1075349>

49. Qin B., Anderson R.A. 2012. An extract of chokeberry attenuates weight gain and modulates insulin, adipogenic and inflammatory signalling pathways in epididymal adipose tissue of rats fed a fructose-rich diet. — Br. J. Nutr. 108(4): 581–587. <https://doi.org/10.1017/S000711451100599X>
50. Danckwardt S., Hentze M.W., Kulozik A.E. 2013. Pathologies at the nexus of blood coagulation and inflammation: thrombin in hemostasis, cancer, and beyond. — J. Mol. Med. (Berl). 91(11): 1257–1271. <https://doi.org/10.1007/s00109-013-1074-5>
51. Bijak M., Bobrowski M., Borowiecka M., Podstędek A., Golański J., Nowak P. 2011. Anticoagulant effect of polyphenols-rich extracts from black chokeberry and grape seeds. — Fitoterapia. 82(6): 811–817. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2011.04.017>
52. Malinowska J., Babicz K., Olas B., Stochmal A., Oleszek W. 2012. *Aronia melanocarpa* extract suppresses biotoxicity of homocysteine and its metabolite on hemostatic activity of fibrinogen and plasma. — Nutrition. 28(7–8): 793–798. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.10.012>
53. Sikora J., Broncel M., Markowicz M., Chałubiński M., Wojdan K., Mikiciuk-Olasik E. 2012. Short-term supplementation with *Aronia melanocarpa* extract improves platelet aggregation, clotting, and fibrinolysis in patients with metabolic syndrome. — Eur. J. Nutr. 51(5): 549–556. <https://doi.org/10.1007/s00394-011-0238-8>
54. Andreeva V.Yu., Kalinkina G.I., Kolomiec N.E., Isaikina N.V. 2013. Procedure for determination of anthocyanins in black chokeberries (*Aronia melanocarpa*). — Farmacia. 3: 19–21. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19124904> (In Russian)
55. Minaeva L.V. 2007. [Experimental evaluation of the effect in glutathione system changes on the manifestation of side cytotoxic effects of repeated administration of cyclophosphamide: Abstr. ... Dis. Cand. (Medicine) Sci.]. Saint-Petersburg. 20 p. (In Russian)
56. Pavlov V.N., Rahmatullina I.R., Farhutdinov R.R., Pushkarev V.A., Danilko K.V., Galimova E.F., Baimurzina Ju.L., Petrova I.V., Mochalov K.S. 2017. Free radical oxidation and carcinogenesis: controversial issues. — Creative surgery and oncology. 7(2): 54–61. <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2017-7-2-54-61> (In Russian)
57. Wang S.Y., Jiao H. 2000. Scavenging capacity of berry crops on superoxide radicals, hydrogen peroxide, hydroxyl radicals and singlet oxygen. — J. Agric. Food Chem. 48(11): 5677–5684. <https://doi.org/10.1021/jf000766i>
58. Logvinova E.E., Brezhneva T.A., Slivkin A.I. 2015. [Study of the content of biologically active substances - antioxidants in the dosage forms of rowan fruits]. — In: [Proceedings of the conference “Modern requirements for medicinal herbal raw materials and medicinal herbal preparations”]. Moscow. P 30–31 (In Russian)
59. Oszmiański J., Wojdyło A. 2005. *Aronia melanocarpa* phenolics and their antioxidant activity. — Eur. Food Res. Technol. 221(6): 809–813. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0002-5>
60. Heim K.E., Tagliaferro A.R., Bobilya D.J. 2002. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. — J. Nutr. Biochem. 13(10): 572–584. [https://doi.org/10.1016/S0955-2863\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0955-2863(02)00208-5)
61. Kedzierska M., Olas B., Wachowicz B., Stochmal A., Oleszek W., Jeziorski A., Piekarski J., Glowacki R. 2009. An extract from berries of *Aronia melanocarpa* modulates the generation of superoxide anion radicals in blood platelets from breast cancer patients. — Planta Med. 75(13): 1405–9. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1185718>
62. Logvinova E.E., Brezhneva T.A., Slivkin A.I., Trubenova I. S., Tarabrina V. N. 2015. A comparative analysis of the membrane-stabilizing action liquid dosage forms from black chokeberry fruits. — Proceedings of Voronezh State University: ser. chemistry, biology, pharmacy. 4: 126–129. <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/chembio/2015/04/2015-04-23.pdf> (In Russian)
63. Zverev Ya.F. 2019. Antitumor activity of flavonoids. — Bulletin of Siberian medicine. 18(2): 181–194. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2019-2-181-194> (In Russian)
64. Pavlova V., Sainova I., Alexieva B., Valkova I., Markova Tz., Nikolova E. 2014. Antioxidant effect of *Aronia melanocarpa* extract after doxorubicin treatment. — Bulgarian J. Agricultural Science, 20 (Supplement 1): 188–192. <https://www.agrojournal.org/20/01s-39.pdf>
65. Kedzierska M., Glowacki R., Czernek U., Szydłowska-Pazera K., Potemski P., Piekarski J., Jeziorski A., Olas B. 2013. Changes in plasma thiol levels induced by different phases of treatment in breast cancer; the role of commercial extract from black chokeberry. — Mol. Cell. Biochem. 372: 47–55. <https://doi.org/10.1007/s11010-012-1444-2>
66. Skoczylńska A., Jędrzychowska I., Poręba R., Affelska-Jercha A., Turczyn B., Wojakowska A., Andrzejak R. 2007. Influence of chokeberry juice on arterial blood pressure and lipid parameters in men with mild hypercholesterolemia. — Pharmacol. Rep. 59(Suppl. 1): 177–180. http://if-pan.krakow.pl/pjp/pdf/2007/s1_177.pdf

67. *Rugina D., Diaconeasa Z., Coman C., Bunea A., Socaciu C., Pinte A.* 2015. Chokeberry Anthocyanin Extract as Pancreatic β -Cell Protectors in Two Models of Induced Oxidative Stress. — *Oxidative medicine and cellular longevity*. Article ID 429075.
<https://doi.org/10.1155/2015/429075>
68. *Spivak J.L., Gascón P., Ludwig H.* 2009. Anemia management in oncology and hematology. — *The Oncologist*. 14(S1): 43–56.
<https://doi.org/10.1634/theoncologist.2009-S1-43>
69. *Vaupel P.* 2008. Hypoxia and aggressive tumor phenotype: implications for therapy and prognosis. — *The Oncologist* 13(S3): 21–26.
<https://doi.org/10.1634/theoncologist.13-S3-21>
70. *Caro J.J., Salas M., Ward A., Goss G.* 2001. Anemia as an independent prognostic factor for survival in patients with cancer: a systemic, quantitative review. — *Cancer*. 91(12): 2214–2221.
[https://doi.org/10.1002/1097-0142\(20010615\)91:12<2214::AID-CNCR1251>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/1097-0142(20010615)91:12<2214::AID-CNCR1251>3.0.CO;2-P)
71. *Bottaro D.P., Liotta L.A.* 2003. Cancer: out of air is not out of action. — *Nature*. 423(6940): 593–595.
<https://doi.org/10.1038/423593a>
72. *Novik A.V.* 2009. [Anemia and metabolic disorders in cancer patients]. — *Practical oncology*. 10(3): 131–140.
<https://practical-oncology.ru/articles/228.pdf> (In Russian)
73. *Kirilenko K., Rybalkina O.* 2018. The effect of black chokeberry fruit extract (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliot) on the hematopoietic erythroid lineage under conditions of the cytostatic effect. — In: *Prospects of fundamental sciences development: Abstr. XV Int. conf. of students and young scientists. V. 4: Biology and Fundamental Medicine. Tomsk.* P. 78–80.
https://conf-prfn.org/Arch/Proceedings_2018_vol_4.pdf (In Russian)

СТАТЬИ И СООБЩЕНИЯ
БИОЛОГИЯ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

ФАКТОРЫ РЕГУЛЯЦИИ ВОДООБМЕНА ХВОИ
***PICEA OBOVATA* (PINACEAE) В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ПОДЗОНЫ ТАЙГИ**

© 2022 г. С. Н. Сенькина*

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

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

Поступила в редакцию 01.03.2021 г.

После доработки 21.07.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Исследованы транспирация и устьичная проводимость хвои деревьев ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. в ельнике черничном и хвои подроста ели на 4-х летней вырубке в условиях средней подзоны тайги (62°17' с.ш., 50°40' в.д.). Наиболее высокие значения интенсивности транспирации и устьичной проводимости отмечены на вырубке — 18.3 ммоль м⁻² с⁻¹ и 1.0 моль м⁻² с⁻¹ соответственно. Выявлена зависимость интенсивности транспирации от устьичной проводимости хвои. Проанализирована связь устьичной проводимости с метеофакторами. Установлено, что в дневное время суток в ельнике черничном устьичная проводимость, в большей степени, зависит от освещенности и влажности воздуха. У подроста ели на вырубке отмечается тесная корреляция устьичной проводимости с влажностью воздуха.

Ключевые слова: *Picea obovata*, древостой, подрост, транспирация, устьичная проводимость, средняя тайга

DOI: 10.31857/S0033994622030104

Транспирация представляет собой флуктуационный процесс, зависящий не только от внешних условий, которые регулируют степень открытости устьиц и непосредственно влияют на транспирацию, но и от внутренних биохимических и физиологических процессов, анатомо-морфологических особенностей растения. К внутренним факторам, регулирующим водо- и газообмен можно отнести поведение устьиц, так как скорость транспирации регулируется состоянием устьичных щелей. Открывание устьиц стимулируется низкой межклеточной регуляцией CO₂ и высокой интенсивностью света, а закрывание — низкой влажностью окружающей среды и повышением температуры листа [1]. Считается общепризнанным, что все биологические системы на всех уровнях организации функционируют в режиме самоподдерживающихся колебаний, таков один из способов приспособления организмов к внешней среде [2]. Волнообразные колебания интенсивности транспирации объясняются чередованием фито- и гидроактивных движений устьиц. Важнейшей характеристикой, объясняющей механизм регуляции переноса водяного пара от растения в атмосферу, считается устьичная проводимость (обратная величина — устьичное сопротивление), снижение которой в определенных условиях восстанавливает баланс между потреб-

лением и расходом влаги [3–5]. Вполне вероятно, что широкий диапазон значений устьичной проводимости древесных пород является отражением различной способности извлекать воду из почвы [6]. Физиологический механизм устьичной регуляции достаточно сложен, характеризуется большим числом трудноизмеримых параметров и зависит от ряда косвенных взаимообусловленных факторов. Степень воздействия отдельных факторов на изменчивость устьичной проводимости проявляется по-разному у разных видов деревьев. Обычно устьица занимают 1–3% всей поверхности листа. По данным С.В. Загировой [7], у ели сибирской на поверхности хвоинки насчитывается до 1085 устьиц. Считается, что у ели особенно выражена устьичная регуляция газообмена, что определяет повышенную чувствительность хвои к условиям влагообеспеченности ассимиляционного аппарата [8]. Исследование роли устьиц в регуляции водообмена растений необходимо для решения таких задач, как моделирование процессов энергомассообмена, выявления устойчивости экосистем к различным воздействиям, при составлении прогнозов, связанных с процессами изменения климата.

Цель данной работы — охарактеризовать связь устьичной проводимости и интенсивности транспирации хвои деревьев ели сибирской в ельнике

черничном и хвой подроста ели, произрастающего на 4-х летней сплошнолесосечной вырубке, а также зависимость устьичной проводимости от метеофакторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование водообмена хвой деревьев ели сибирской, произрастающих в ельнике черничном влажном (9Е1Б + С ед. Пх) на территории Ляльского лесозоологического стационара Института биологии Коми НЦ УрО РАН (62°17' с.ш., 50°40' в.д.), выполнены в 2013 г. Возраст деревьев ели в древостое изученного сообщества составляет 106–200 лет, средний диаметр – 20 см, высота – 16 м. [9]. В соответствии с программой и методикой биогеоценологических исследований эколого-физиологическими наблюдениями достаточно охватить три–пять деревьев в древостое [10]. В настоящем исследовании для экспериментального изучения были отобраны три дерева ели, имевшие таксационные показатели, близкие к средним для древостоя изучаемого сообщества.

Для изучения водного режима на уровне средней и верхней частей крон выбранных деревьев на специальных площадках были размещены приборы наблюдения. Запись показаний интенсивности транспирации и устьичной проводимости производилась на интактной хвое второго года жизни в средней части кроны с помощью электронного газоанализатора Li-Cor 6400 (США). В мае 2013 г. с помощью автоматической записи данных газоанализатора были проведены суточные наблюдения за интенсивностью транспирации и устьичной проводимостью. Забор воздуха для определения метеоданных (температура и влажность воздуха) производился над кронами деревьев. Все метеоданные автоматически записывались на газоанализатор.

Водный режим хвой подроста ели сибирской изучался в 2019 г. на сплошнолесосечной вырубке сосняка черничного 4-х летней давности на территории Сыктывкарского лесничества. Объектами исследования являлись пять особей подроста 20–25-летнего возраста, высотой от 1.0 до 1.3 м, удовлетворительного состояния. Как и в ельнике черничном наблюдения проводились с помощью газоанализатора Li-Cor 6400 на интактной хвое второго года жизни в средней части кроны. Информация фиксировалась на газоанализаторе автоматически через каждые пять минут. В связи с удаленностью объектов наблюдения на вырубке проводились только в течение четырех часов в сутки (в период с 10 до 13 ч). Забор воздуха для определения метеоданных также производился над кронами деревьев.

Полученные данные обрабатывали с помощью стандартных статистических методов [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Более высокие показатели устьичной проводимости были выявлены у хвой подроста ели на вырубке – в среднем $1 \text{ моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. У деревьев ели в ельнике черничном среднее значение составило $0.3 \text{ моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. (табл. 1). Исследования устьичной регуляции водообмена на примере ели европейской в южной тайге показали, что величина устьичной проводимости колеблется от 0.1 до $1.5 \text{ моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Считается, что она устойчиво снижается при недостаточном почвенно-грунтовым и атмосферном увлажнении, обеспечивая экономию расходов влаги на транспирацию. Высокая устьичная проводимость свидетельствует о максимальной открытости устьиц [12].

Степень воздействия отдельных факторов на изменчивость устьичной проводимости проявляется по-разному. Анализ данных суточной динамики интенсивности транспирации и устьичной проводимости в ельнике черничном (рис. 1) показал, что в начале вегетации (май) корреляционная зависимость между этими показателями ($r = 0.8, p < 0.001$) была выше, чем в конце вегетации в августе ($r = 0.6, p < 0.05$). В мае наиболее высокая интенсивность транспирации и высокая устьичная проводимость отмечались в период с 14 до 16 ч, в это же время наблюдалась наиболее высокая за сутки температура воздуха, освещенность и низкая относительная влажность воздуха (табл. 2). В августе в период наблюдений показатели устьичной проводимости колебались менее значительно. Таким образом, в ельнике черничном интенсивность транспирации и устьичная проводимость имеют выраженную динамику в течение суток (рис. 1) и значимую зависимость между собой.

У хвой подроста ели на вырубке интенсивность транспирации является более высокой, чем у хвой деревьев ели в лесном сообществе, а ход кривых имеет иной характер (рис. 2). Очевидно, это связано с целым комплексом факторов, влияющих на эти показатели, таких как водоснабжение хвой, ее температура, концентрация CO_2 внутри листа, повышенная освещенность, более быстрое испарение влаги с поверхности почвы. Также нельзя исключить влияние ветровых потоков, т.к. на вырубке они более выражены, чем в зрелом сформировавшемся древостое.

Судя по коэффициентам корреляции устьичной проводимости с метеофакторами в ельнике черничном (табл. 3), в мае в утренние часы она в большей степени зависит от влажности воздуха и температуры. В дневные часы достоверной зависимости проводимости устьиц от метеофакторов не отмечено, а в вечерние часы, когда освещенность начинает снижаться, устьичная проводимость наиболее зависима от этого фактора. Ночью проводимость устьиц является наиболее низ-

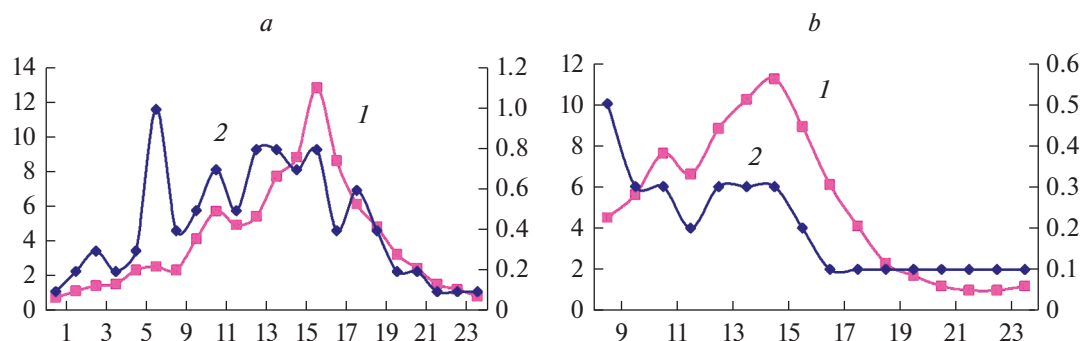


Рис. 1. Динамика интенсивности транспирации (1) и устьичной проводимости (2) хвои деревьев ели в ельнике черничном в период наблюдений. *a* – май, *b* – август 2013 г.

По горизонтали: время суток, ч; по вертикали: левая шкала – интенсивность транспирации, $\text{млмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$ с 1 г; правая шкала – устьичная проводимость, $\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Fig. 1. Dynamics of transpiration intensity (1) and stomatal conductivity (2) of spruce needles in bilberry spruce forest during the observation period. *a* – May, *b* – August, 2013.

X-axis: time of the day, hrs.; y-axis: left graph – intensity of transpiration, $\text{mlmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ from 1 g, right graph – stomatal conductivity, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Таблица 1. Показатели интенсивности транспирации и устьичной проводимости хвои ели сибирской в ельнике черничном и на вырубке

Table 1. Average daily indicators of the transpiration intensity and stomatal conductivity of Siberian spruce needles in the bilberry spruce forest and on clearcuts

Объект исследования и место его произрастания Object of study and growth site	Год, месяц и время (часы) наблюдений Year, month and time (hours) of observation	Интенсивность транспирации, $\text{млмоль м}^{-2} \text{с}^{-1}$ с 1 г Transpiration intensity, $\text{mlmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ from 1 g	Устьичная проводимость, $\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$ Stomatal conductivity, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
		$\frac{M \pm m}{n}$	
Деревья ели в ельнике черничном Spruce trees in bilberry spruce forest	2013 год, май 2013, may 01–24	$\frac{4.1 \pm 0.6}{140}$	$\frac{0.4 \pm 0.05}{140}$
	2013 год, август 2013, august 08–24	$\frac{5.9 \pm 1.0}{124}$	$\frac{0.2 \pm 0.03}{124}$
	Среднее значение mean	$\frac{5.0 \pm 0.8}{264}$	$\frac{0.3 \pm 0.04}{264}$
Подрост ели на 4-х летней сплошнолесосечной вырубке Spruce regrowth on a 4-year-old clearcut	2019 год, май 2019, may 10–13	$\frac{17.1 \pm 1.5}{264}$	$\frac{0.5 \pm 0.04}{264}$
	2019 год, август 2019, august 10–13	$\frac{19.7 \pm 1.6}{514}$	$\frac{1.3 \pm 0.05}{514}$
	Среднее значение mean	$\frac{18.3 \pm 1.7}{778}$	$\frac{1.0 \pm 0.4}{778}$

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение и ошибка среднего, n – объем выборки (количество наблюдений).

Note: $M \pm m$ – mean and error of mean, n – sample size (number of observations).

Таблица 2. Метеоданные в период наблюдений в ельнике черничном и на вырубке
Table 2. Meteorological data for the observation period in the bilberry spruce forest and on the clearcut

Время наблюдений, час Time of observation, hour	Май, May			Август, August		
	температура, °C temperature, °C	влажность воздуха, % air humidity, %	освещенность, тыс. люкс illuminance, klx	температура, °C temperature, °C	влажность воздуха, % air humidity, %	освещенность, тыс. люкс illuminance, klx
Ельник черничный, 2013 г. Bilberry spruce forest, 2013						
Утро, morning						
6	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—
8	8.0	63	2.9	—	—	—
9	10.0	53	3.6	20.3	69	1.6
10	11.1	50	4.9	24	55	4.3
День, day						
11	12.1	47	5.4	27	47	2.6
12	11.2	44	5.9	27.5	45	2.5
13	11.4	44	5.7	26.8	31	1.7
14	13.4	40	7.7	29.2	28	1.6
15	14.3	33	28.0	31.5	28	1.6
16	17.4	30	24.7	32.1	15	0.8
17	19.8	30	4.4	30.8	15	0.8
18	15.0	36	2.2	29.5	16	0.9
Вечер, evening						
19	15.7	34	1.3	26.9	17	0.2
20	15.5	35	0.9	24.7	16	0.03
21	15.2	36	0.3	23.5	16	0.006
22	14.2	39	0.04	23.1	16	0.006
Ночь, night						
23	13.2	41	0.02	22.5	15	0.006
24	12.0	44	0.02	21.9	15	0.006
1	11.4	46	0.02	21.4	15	0.006
2	11.0	46	0.02	—	—	—
3	10.7	48	0.02	—	—	—
4	11.3	44	0.2	—	—	—
5	11.2	46	0.6	—	—	—
4-летняя сплошнолесосечная вырубка, 2019 г. 4-year-old clearcut, 2019						
Утро, morning						
10	32	26	82.8	18	62	15.1
День, day						
11	31	23	69.7	19	59	15.6
12	33	20	51.4	15	56	17.5
13	29	21	59.7	21	53	19.5

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных.
 Note. Dash means no data.

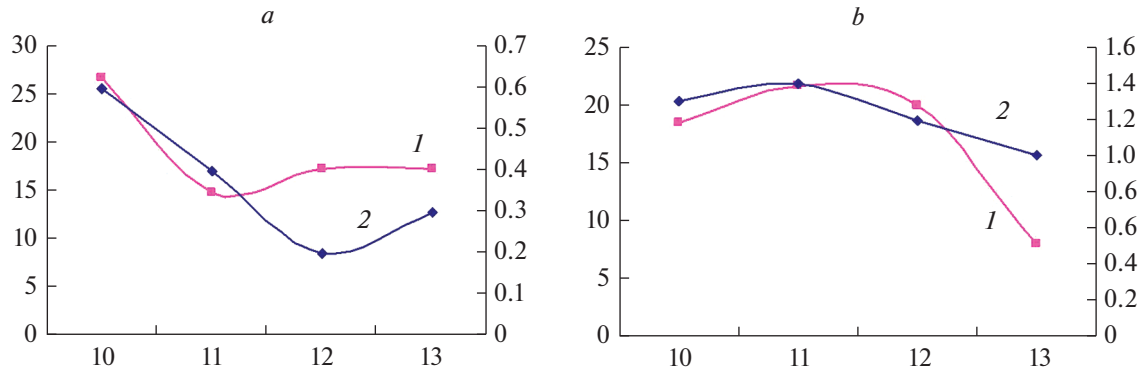


Рис. 2. Динамика интенсивности транспирации (1) и устьичной проводимости (2) хвои подроста ели на 4-летней сплошнолесосечной вырубке в период наблюдений. *a* – май, *b* – август 2019 г.
По горизонтали: время суток, ч; *по вертикали:* левая шкала – интенсивность транспирации, $\text{mlmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ с 1 г; правая шкала – устьичная проводимость, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.
Fig. 2. Dynamics of transpiration intensity (1) and stomatal conductivity (2) of spruce needles of the regrowth on 4-year clearcut during the observation period: *a* – May, *b* – August, 2019.
X-axis: time of the day, hrs; *y-axis:* left graph – intensity of transpiration, $\text{mlmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ from 1 g, right graph – stomatal conductivity, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Таблица 3. Связь устьичной проводимости хвои ели сибирской с метеофакторами
Table 3. Relationship between stomatal conductivity of Siberian spruce needles and meteorological factors

Месяц и время (часы) наблюдений Month and time (hours) of observation	Коэффициент корреляции Correlation coefficient		
	с температурой воздуха with air temperature	с влажностью воздуха with air humidity	с освещенностью with illumination
Деревья ели в ельнике черничном, 2013 г. Spruce trees in bilberry spruce forest, 2013			
<i>Май, may</i>			
Утро, morning (6–10)	–0.9*	+0.9*	–0.7*
День, day (11–18)	–0.1	+0.3	+0.3
Вечер, evening (19–22)	+0.2	–0.5	+0.8*
Ночь, night (23–05)	–0.8*	+0.9*	+0.8*
<i>Август, august</i>			
Утро, morning (6–10)	–	–	–
День, day (11–18)	–0.4	–0.4	+0.3
Вечер, evening (19–22)	<0.1	<0.1	<0.1
Ночь, night (23–05)	<0.1	<0.1	<0.1
Подрост ели на 4-летней сплошнолесосечной вырубке, 2019 г. Spruce regrowth on a 4-year-old clearcut, 2019			
<i>Май, may</i>			
Утро, morning (6–10)	–	–	–
День, day (11–18)	+0.1	+0.8*	–0.1
Вечер, evening (19–22)	–	–	–
Ночь, night (23–05)	–	–	–
<i>Август, august</i>			
Утро, morning (6–10)	–	–	–
День, day (11–18)	–0.8*	+0.8*	–0.8*
Вечер, evening (19–22)	–	–	–
Ночь, night (23–05)	–	–	–

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных, * – достоверно при уровне значимости $p \leq 0.05$.
Note. Dash means no data, * – significant at a significance level of $p \leq 0.05$.

кой, но при этом отмечается тесная зависимость этого показателя от всех учитываемых климатических факторов. В августе наблюдения были проведены только в период с 11 до 18 ч, при этом достоверной связи устьичной проводимости с метеофакторами не было отмечено.

У подростка ели на вырубке, который произрастает в существенно иных условиях по сравнению с деревьями в лесу, в мае отмечена только существенная зависимость устьичной проводимости от влажности воздуха, в августе устьичная проводимость одинаково тесно коррелирует со всеми изученными метеофакторами (табл. 3).

В литературе имеются разные мнения о характере зависимости транспирационной проводимости от температуры, влажности воздуха и интенсивности света. У некоторых деревьев повышение температуры в интервале от +20 до +30 °С и относительной влажности воздуха в пределах 40–80% проводимость почти не изменяется [13]. Другие исследователи утверждают, что степень открытости устьичной щели во многом контролируется интенсивностью света и в меньшей степени зависит от влажности воздуха. При достаточной влагообеспеченности устьичная проводимость хвой не зависит от влажности воздуха, но определяется интенсивностью света, причем проводимость повышается только при очень низкой освещенности [6, 14]. В условиях южной европейской и средней сибирской тайги ведущим фактором, определяющим величину устьичной проводимости и интенсивности транспирации ели европейской, является дефицит упругости водяного пара. При уменьшении относительной влажности воздуха проводимость уменьшается, в случае же достаточной влажности почвы проводимость с повышением температуры воздуха изменяется незначительно [12, 15]. Значения максимальной устьичной проводимости существенно варьируют в зависимости от текущих погодных условий и влажности почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование роли устьиц в водообмене и, в частности, интенсивности транспирации хвой деревьев ели сибирской в ельнике черничном и хвой подростка ели на вырубке в условиях средней

подзоны тайги Республики Коми показали, что на вырубке наблюдается примерно в 3 раза более высокая устьичная проводимость (в среднем $1 \text{ моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) по сравнению с проводимостью устьиц в ельнике черничном (в среднем $0.3 \text{ моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$).

Выявлено, что корреляционная связь между интенсивностью транспирации и устьичной проводимостью хвой деревьев ели в ельнике черничном в начале вегетации (май) выше, чем в конце вегетации (август). Наиболее тесная зависимость устьичной проводимости от метеофакторов (температуры, влажности воздуха и освещенности) отмечена в мае в утренние и ночные часы. В августе в период наблюдений достоверная связь устьичной проводимости с метеофакторами отсутствовала.

У хвой подростка ели на вырубке в период наблюдений (в дневные часы) ход кривых интенсивности транспирации и устьичной проводимости, как в мае, так и в августе отличался от хода кривых у деревьев в лесном сообществе. Очевидно, такой характер динамики этих показателей связан с особенностями произрастания подростка на вырубке — повышенными освещенностью, влагообеспеченностью и температурой листа (хвой), влиянием ветровых потоков и влажности воздуха. В мае в дневное время устьичная проводимость существенно зависит только от влажности воздуха, в августе она тесно связана со всеми изученными метеопараметрами.

Исследование роли устьичной проводимости в интенсивности транспирации и зависимости устьичной проводимости от погодных факторов показывает, насколько сложными являются эти связи. Их выявление требует дальнейших более углубленных исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН, в рамках государственного задания по теме НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России” (№ государственной регистрации 122040100031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варлагин А.В., Выгодская Н.Н. 1993. Влияние экологоморфологических факторов на устьичное сопротивление ели европейской. — Лесоведение. 3: 48–60.
2. Дадькин В.П., Давыдова Ю.А. 1963. О соотношении расхода энергии на транспирацию и теплообмен у некоторых древесных пород. — В кн.: Водный режим растений в связи с обменом веществ и продуктивностью. М. С. 103–110.
3. Абрашко В.И. 1998. Водный режим сообществ еловых лесов: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб. 46 с.

4. Доброхотов А.В., Максимова И.Л., Козырева Л.В., Шандор Р. 2017. Модельная оценка пространственного распределения устьичной проводимости у кормовых трав — С/х биология. 52(3): 446–453.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.446rus>
5. Buckley T.N. 2005. The control of stomata by water balance. — *New Phytologist*. 168(2): 275–292.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01543.x>
6. Молчанов А.Г. 1986. Соотношение фотосинтеза и транспирации у сосны обыкновенной в условиях южной тайги. — *Лесоведение*. 4: 76–82.
7. Загирова С.В. 1999. Структура ассимиляционного аппарата и CO₂-газообмена у хвойных. Екатеринбург. 108 с.
8. Факторы регуляции экосистем еловых лесов. 1983. Л. 318 с.
9. Сенькина С.Н. 2013. Водный режим сосны и ели в фитоценозах Севера. Екатеринбург. 103 с.
10. Программа и методика биогеоценологических исследований. М. 1966. 334 с.
11. Лакин Г.Ф. 1980. Биометрия. М. 293 с.
12. Варлагин А.В. 2000. Транспирация на уровне листа, дерева и сообщества в хвойных лесах: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М. 37 с.
13. Козловский Т. 1969. Водный обмен растений. М. 247 с.
14. Крамер П., Козловский Т. 1983. Физиология древесных растений. М. 458 с.
15. Jones H.G. 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. — *J. Exp. Bot. (Spec. Issue.)*. 49: 387–398.
https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special_Issue.387

Factors Regulating Water Exchange in the Needles of Siberian Spruce from the Middle Taiga Subzone

S. N. Senkina*

Institute of Biology of the Komi Science Centre, Ural Branch, RAS, Syktyvkar, Russia

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

Abstract—The data on stomatal conductivity of the Siberian spruce needles in bilberry spruce forest and spruce regrowth on a 4-year-old clearcut in the middle taiga subzone (62°17' N 50°40' E) were assessed. The highest transpiration and stomatal conductivity values of needles were recorded on the cutovers — 18.3 ml mol⁻² c⁻¹ and 1.0 mol m⁻² c⁻¹, respectively. The dependence of the needle transpiration intensity on the stomatal conductivity was found. The association between stomatal conductivity and meteorological factors is considered. It has been established that in the daytime in bilberry spruce forest, stomatal conductivity, to a greater extent depends on the illuminance and air humidity. In spruce regrowth on clearcut, there is a close correlation between stomatal conductivity and air humidity.

Keywords: *Picea obovata*, tree stand, undergrowth, transpiration, stomatal conductance, middle taiga

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out at the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Division RAS (Syktyvkar) within the framework of the state research assignment “Zonal patterns of the structure and productivity dynamics of primary and anthropogenic phytocoenosis of forest and swamp ecosystems of the European Northeast of Russia” (state registration no. 122040100031-8).

REFERENCES

1. Varlagin A.V., Vygodskaya N.N. 1993. [Effect of ecological and morphological factors on stomatal resistance of European spruce]. — *Lesovedeniye*. 3: 48–60. (In Russian)
2. Dadykin V.P., Davydova Yu.A. 1963. [On the ratio of energy consumption for transpiration and heat exchange in some tree species.] — In: [Water regime of plants relative to metabolism and productivity]. Moscow. P. 103–110.
3. Abrazhko V.I. 1998. [Water regime of spruce forest communities: Abstr. ... Diss. Doct. (Biology) Sci.] St. Petersburg. 46 p. (In Russian)
4. Dobrokhотов А.В., Максимова И.Л., Козырева Л.В., Шандор Р. 2017. Model-based assessment of spatial distribution of stomatal conductance in forage herb ecosystems. — *Agricultural biology*. 52(3): 446–453.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.446eng>
5. Buckley T.N. 2005. The control of stomata by water balance. — *New Phytologist*. 168(2): 275–292.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01543.x>

6. *Molchanov A.G.* 1986. Correlation of photosynthesis and transpiration in *Pinus sylvestris* L. in southern taiga. — *Lesovedeniye*. 4: 76–82. (In Russian)
7. *Zagirova S.V.* 1999. [The structure of the assimilation apparatus and CO₂ gas exchange in conifers]. Yekaterinburg. 108 p. (In Russian)
8. [Factors of regulation of ecosystems of spruce forests]. 1983. Leningrad. 318 p. (In Russian)
9. *Senkina S.N.* 2013. [Water economy of pine and spruce in phytocoenoses of the North]. Yekaterinburg. 103 p. (In Russian)
10. [Program and methods of biogeocoenological research]. 1966. Moscow. 334 p. (In Russian)
11. *Lakin G.F.* 1980. [Biometrics]. Moscow. 293 p. (In Russian)
12. *Varlagin A.V.* 2000. [Transpiration at the leaf, tree and community levels in coniferous forests: Abstr. ... Diss. Cand. (Biology) Sci.]. Moscow. 37 p. (In Russian)
13. *Kozlovskiy T.* 1969. [Water exchange of plants]. Moscow. 247 p. (In Russian)
14. *Kramyer P., Kozlovskiy T.* 1983. [Physiology of woody plants]. Moscow. 458 p. (In Russian)
15. *Jones H.G.* 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. — *J. Exp. Bot.* 49 (Spec. Issue, March 1998): 387–398.
https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special_Issue.387

ИНТРОДУКЦИЯ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

РЕПРОДУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ ВИДОВ
РОДА *IRIS* (IRIDACEAE) В УСЛОВИЯХ *EX SITU*© 2022 г. Л. Н. Миронова¹, В. А. Калинкина¹, *¹Ботанический сад-институт ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

*e-mail: conf-lf@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2022 г.

После доработки 21.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

В статье приводятся результаты изучения семян дальневосточных представителей рода *Iris* L. в условиях *ex situ* (Ботанический сад-институт ДВО РАН). Анализ размерно-весовых параметров семян в условиях *ex situ* показал их незначительное отличие от параметров в условиях *in situ*, что свидетельствует о достаточной степени адаптации видов в условиях интродукции. Установлено, что все изученные виды характеризуются регулярным плодоношением, а уровень семенной продуктивности зависит от вида. Самыми высокими показателями изменчивости семенной продуктивности характеризуются *Iris dichotoma* (Pall.) L.W. Lenz, *I. domestica* Goldblatt & Mabb., *I. ventricosa* Pall., *I. vorobievii* N.S. Pavlova, включенные в Красные книги как государственного, так и регионального уровня с высоким статусом редкости.

Ключевые слова: *Iris*, редкие виды, семенная продуктивность, размеры и масса семян

DOI: 10.31857/S0033994622030086

Проблема выращивания в условиях культуры растений, которым угрожает исчезновение в природных местообитаниях, заслуживает особо пристального внимания. Одним из путей их сохранения является культивирование в ботанических садах, где создаются наиболее подходящие условия для сохранения редких и исчезающих видов. В данном случае выращивание в культуре рассматривается как дополнение к наиболее надежному способу сохранения видов в их природных местообитаниях, т.к. создается резервный фонд для реинтродукции растений в природные экосистемы.

Исследование систем размножения растений является основополагающим направлением при выборе способа сохранения в культуре. Основным показателем жизнеспособности, адаптации и степени соответствия конкретных экологических условий биологическим требованиям вида — его способность к образованию семян. Среди прочих показателей репродуктивного успеха семенная продуктивность является одним из важнейших показателей адаптации растений к условиям обитания. Ряд важных вопросов, касающихся гибридизации, интродукции, рационального использования представителей флоры связан именно с семенным возобновлением [1–3, и др.].

Работы по изучению семенной продуктивности видов ириса в условиях *ex situ* проводились во многих ботанических учреждениях России [4–

17]. Дальневосточные представители рода ирис (*Iris* L.) отличаются не только высокой декоративностью, но и лекарственными свойствами, так как содержат ряд биологически активных веществ [18–21] и могут быть использованы как источники для получения медицинских препаратов, обладающих антивирусными, противовоспалительными, антимуtagenными и противораковыми свойствами [22–27].

Семена цветковых растений являются основными элементами системы адаптивных или репродуктивных стратегий. Среди параметров семян, тесно связанных с репродуктивной стратегией, важными являются их размеры и вес. Количественные характеристики семян представляют интерес и при разработке семеноведения интродуцентов [1].

Цель наших исследований — изучить морфометрические характеристики и семенную продуктивность дальневосточных представителей рода *Iris* в условиях Ботанического сада-института ДВО РАН (БСИ ДВО РАН).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно перечню видов, взятых под охрану на юге российского Дальнего Востока, наряду с эндемиками, реликтами и видами, находящимися на границе ареала, для исследования нами были взяты декоративные виды с широким ареалом,

Таблица 1. Дальневосточные ирисы в Красных книгах разного ранга**Table 1.** Far Eastern irises in the Red Data Books of various ranks

Вид Species	Красная книга (регион, год издания) Red Data Book (region, the year of publicaion)						
	РФ, 2008 RF, 2008	ПК, 2008 PK, 2008	ХК, 2010, 2019 KK, 2010, 2019	АО, 2020 AR, 2020	СО, 2019 SR, 2019	С, 2017 S, 2017	ИО, 2010 IR, 2010
<i>I. dichotoma</i> Pall.	—	—	—	+	—	—	—
<i>I. domestica</i> Goldblatt & Mabb.	+	+	—	—	—	—	—
<i>I. ensata</i> Thunb.	+	+	+	+	+	+	—
<i>I. laevigata</i> Fisch. et Mey.	—	+	+	+	+	+	+
<i>I. mandshurica</i> Maxim.	+	+	—	—	—	—	—
<i>I. oxypetala</i> Bunge	—	+	—	—	—	—	—
<i>I. sanguinea</i> Hornem.	—	—	—	—	+	+	+
<i>I. setosa</i> Pall. ex Link.	—	—	—	—	—	—	+
<i>I. uniflora</i> Pall. ex Link.	—	—	—	—	—	—	—
<i>I. ventricosa</i> Pall.	+	+	—	—	—	—	—
<i>I. vorobievii</i> N.S. Pavlova	+	+	—	—	—	—	—

Примечание. РФ — Российская Федерация; ПК — Приморский край; ХК — Хабаровский край; АО — Амурская область; СО — Сахалинская область; С — республика Саха (Якутия); ИО — Иркутская область.

Note. RF — Russian Federation; PK — Primorye Territory; XK — Khabarovsk Territory; AR — Amur Region; SR — Sakhalin Region; S — Republic of Sakha (Yakutia); IR — Irkutsk Region.

но сокращающие его вследствие возросшего антропогенного влияния [26], при этом ряд видов включены в Красные книги разного ранга [27–33] (табл. 1).

Изучены семена 11 дальневосточных видов рода *Iris* L.: *I. dichotoma*, *I. domestica*, *I. ensata*, *I. laevigata*, *I. mandshurica*, *I. oxypetala*, *I. sanguinea*, *I. setosa*, *I. uniflora*, *I. ventricosa*, *I. vorobievii*. Для каждого таксона ежегодно проводили измерение длины и ширины 25 шт. семян в четырехкратной повторности [34]. Массу семян определяли по методике С.С. Лишук [35]. В работе использовали оборудование ЦКП “Микротехническая лаборатория Ботанического сада-института ДВО РАН”: микроскоп Stemi 2000-C с увеличением $\times 0.65$, лабораторные весы Kern 44 21N.

Семенную продуктивность изучали по общепринятой методике [1]. Определяли потенциальную (ПСП) и реальную (РСП) семенную продуктивность. Процент семенификации (ПС) рассчитывали по формуле:

$$\text{ПС} = (\text{РСП}/\text{ПСП}) \times 100\%.$$

Исследование проводилось в БСИ ДВО РАН с 2008 по 2017 гг. с использованием Уникальной научной установки “Коллекция живых растений открытого грунта Ботанического сада-института ДВО РАН” (реестровый номер регистрации на сайте <http://ckp-rf.ru> — 347286). За столь длительный период исследований наблюдался весь

спектр погодных условий, как по увлажненности вегетационного периода, так и по температурному режиму.

По агроклиматическому районированию территория БСИ ДВО РАН входит во вторую термическую зону, в которой сумма температур выше 10°C равна 2200–2400 $^\circ\text{C}$ [36]. Территория отличается высокой влагообеспеченностью: годовое количество осадков составляет около 1200 мм. Пик их выпадения приходится на конец вегетационного периода. Неравномерный характер выпадения осадков негативно влияет на развитие растений. Их отсутствие в начале вегетационного периода вызывает засуху, а проходящие тайфуны наряду с сильными ливнями во второй половине лета приводят к чрезмерному переувлажнению почвы.

Основным лимитирующим фактором, отрицательно влияющим на перезимовку растений, можно назвать малоснежную зиму с интенсивной инсоляцией, глубоким промерзанием почвы, морозным выжиманием корневых систем. В зимний период имеет место редкое сочетание довольно низких ночных температур, высоких суточных амплитуд температуры, бесснежья и интенсивного солнечного сияния при наличии сильных северных и северо-западных ветров. Исходя из всего вышеизложенного, климатические условия зимнего и весеннего периодов района исследова-

Таблица 2. Размерно-весовые параметры семян исследованных видов рода *Iris* L.
Table 2. Seed size and weight parameters of the studied of the species in the genus *Iris* L.

Вид Species	Форма семени ¹ Seed shape ¹	Размеры Sizes				Масса 100 шт, г 100-seed weight, g
		длина, мм length, mm $M \pm m$	CV, %	ширина, мм width, mm $M \pm m$	CV, %	
<i>I. dichotoma</i>	Э/Е	5.1 ± 0.2	9.2	2.3 ± 0.1	11.2	0.6 ± 0.1
<i>I. domestica</i>	Ш/Sp	5.1 ± 0.1	9.7	5.0 ± 0.2	12.7	3.1 ± 0.1
<i>I. ensata</i>	ПП/Se	7.5 ± 0.1	8.4	6.8 ± 0.2	17.2	1.3 ± 0.1
<i>I. laevigata</i>	ПП/Se	6.4 ± 0.1	8.4	5.1 ± 0.1	14.1	2.5 ± 0.1
<i>I. mandshurica</i>	ЭА/ЕА	4.0 ± 0.2	9.7	2.3 ± 0.2	12.4	1.1 ± 0.2
<i>I. oxypetala</i>	ОТ/RT	3.7 ± 0.1	12.2	3.2 ± 0.1	14.6	1.8 ± 0.1
<i>I. sanguinea</i>	ПП/Se	6.0 ± 0.1	7.4	5.1 ± 0.2	17.4	1.3 ± 0.2
<i>I. setosa</i>	НК/IW	5.7 ± 0.1	11.5	3.3 ± 0.1	7.4	1.2 ± 0.1
<i>I. uniflora</i>	ЭА/ЕА	3.1 ± 0.1	17.3	2.7 ± 0.2	18.2	1.3 ± 0.2
<i>I. ventricosa</i>	НШ/IS	3.1 ± 0.2	6.8	2.3 ± 0.2	16.6	1.6 ± 0.2
<i>I. vorobievii</i>	ЭА/ЕА	4.7 ± 0.2	8.7	2.3 ± 0.2	12.3	1.1 ± 0.1

Примечание. ¹ ПП – полукруглые, плоскосжатые; Ш – шаровидные; НШ – неправильно-шаровидные; ОТ – округло-треугольные; НК – неправильно-клиновидные; Э – эллиптические или ромбовидные с небольшим вогнутым крылом у одного из концов; ЭА – эллиптические или ромбовидные, снабженные ариллусом. M – среднее значение, m – ошибка среднего значения; CV, % – коэффициент вариации.

Note. ¹ Se – semicircular, flat compressed; Sp – spherical; IS – irregular spherical; TR – triangular-rounded; IW – irregularly wedge-shaped; E – elliptical or diamond-shaped with a small concave wing at one end; EA – elliptical or rhomboid, with arillus. M – mean, m – error of the mean; CV, % – coefficient of variation.

ния неблагоприятны для большинства интродуцированных культур [36].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ морфометрических особенностей семян изучаемой группы видов показал их значительные различия по форме (рис. 1) и размерам (табл. 2). Средняя длина семян лежит в пределах от 3.1 до 7.5 мм. Коэффициент вариации у большинства видов имеет низкие значения (6.8–11.5%), у *I. oxypetala* и *I. uniflora* – средние (12.2 и 17.3%). Ширина семени составляет от 2.3 до 6.8 мм и является более вариабельной, чем длина: низкий уровень изменчивости отмечен лишь у *I. setosa* и *I. dichotoma* (CV = 7.4 и 11.2%), у остальных видов он находится в пределах средних значений (CV = 12.3–18.2%).

Показатели массы семян значительно различаются в зависимости от вида. Наименьшую массу 100 семян имеет *I. dichotoma* (0.6 г), большинство видов имеет среднюю массу семян (1.1–1.8 г), наиболее высокой массой отличаются *I. laevigata* и *I. domestica* (2.5 и 3.1 г). Линейные параметры семян и их масса в условиях культуры незначительно отличаются от таковых из природных популяций [37], что является свидетельством достаточной степени адаптации видов в условиях интродукции.

Изучаемые виды в условиях *ex situ* характеризуются регулярным плодоношением, но разным уровнем семенной продуктивности (табл. 3). Более высокой потенциальной семенной продуктивностью (105–154 семян) отличаются *I. oxypetala*, *I. ensata*, *I. laevigata*, *I. sanguinea*, *I. setosa*, наиболее низкая продуктивность (21–38 семян) выявлена у *I. domestica*, *I. mandshurica* и *I. uniflora*. У большинства видов (*I. ensata*, *I. laevigata*, *I. mandshurica*, *I. sanguinea*, *I. setosa*, *I. uniflora*) ПСП имела средний уровень изменчивости (CV = 14.2–20.6%); у *I. domestica*, *I. oxypetala*, *I. ventricosa*, *I. vorobievii*, *I. dichotoma* – высокий (CV = 21.2–26.6%).

Величина РСП у разных видов составляла от 9 до 85 семян (табл. 3). Наиболее высокими значениями РСП (64–85 семян) отличались *I. ensata*, *I. laevigata*, *I. setosa* и *I. oxypetala*, наиболее низкими (9–14 семян) – *I. domestica*, *I. uniflora*, *I. ventricosa*. Изменчивость (CV) РСП у большинства видов – высокая (21.0–36.0%), средние ее величины (17.5%) отмечены у *I. ensata*. Очень высоким уровнем изменчивости (40.9–48.5%) отличались: *I. dichotoma*, *I. domestica*, *I. ventricosa*, *I. vorobievii*.

Процент семинификации изменялся в пределах от 27.1 до 68.8% (табл. 3). Примерно у половины видов он составил от 54 до 68.8%, у остальных находился в пределах от 27.1 до 44.7%. Большинство видов характеризуется высоким уровнем из-



Рис. 1. Семена видов рода *Iris*: а – *I. ensata*, б – *I. laevigata*, в – *I. sanguinea*, д – *I. domestica*, е – *I. ventricosa*, ф – *I. oxypetala*, г – *I. setosa*, h – *I. dichotoma*, и – *I. mandshurica*, j – *I. uniflora*, k – *I. vorobievii*.

Fig. 1. Seeds of the species in the genus *Iris*: а – *I. ensata*, б – *I. laevigata*, в – *I. sanguinea*, д – *I. domestica*, е – *I. ventricosa*, ф – *I. oxypetala*, г – *I. setosa*, h – *I. dichotoma*, и – *I. mandshurica*, j – *I. uniflora*, k – *I. vorobievii*.

менчивости ПС ($CV = 22.7\text{--}35.7\%$). Средний уровень изменчивости ПС (17.7%) отмечен лишь у *I. ensata*. Самые высокие показатели ($40.6\text{--}42.7\%$) выявлены у *I. dichotoma*, *I. domestica*, *I. vorobievii*, *I. ventricosa*.

Сопоставление данных о морфометрических параметрах семян и семенной продуктивности

разных видов не позволило выявить какую-либо строгую зависимость. Однако наблюдается определенная связь экологических особенностей вида и его семенной продуктивности. Известно, что размеры и масса семян тесно связаны с репродуктивной стратегией вида, которая, в свою очередь, влияет на его численность в пределах ареала.

Таблица 3. Семенная продуктивность видов рода *Iris*
Table 3. Seed productivity of of the species in the genus *Iris*

Вид Species	Экологическая группа Ecological group	ПСП ¹ , число семян PSP ¹ , number of seeds		РСП ² , число семян RSP ² , number of seeds		ПС ³ , % PS ³ , %	
		$\frac{M \pm m}{\text{lim}}$	CV, %	$\frac{M \pm m}{\text{lim}}$	CV, %	$\frac{M \pm m}{\text{lim}}$	CV, %
<i>I. dichotoma</i>	ксерофит/ xerophyte	$\frac{65.3 \pm 3.1}{49-86}$	26.6	$\frac{36.4 \pm 4.7}{15-70}$	44.9	$\frac{54.4 \pm 5.2}{21-81}$	41.8
<i>I. domestica</i>	ксеромезофит/ xeromesophyte	$\frac{20.8 \pm 1.2}{11-41}$	21.9	$\frac{9.3 \pm 0.8}{2-20}$	48.5	$\frac{44.7 \pm 3.0}{12-69}$	47.1
<i>I. ensata</i>	мезофит/ mesophytes	$\frac{154.3 \pm 2.4}{133-163}$	14.2	$\frac{84.6 \pm 5.6}{64-106}$	17.5	$\frac{54.8 \pm 3.7}{41-67}$	17.7
<i>I. laevigata</i>	гигрофит/ hygrophyte	$\frac{141.5 \pm 4.2}{92-199}$	16.3	$\frac{77.5 \pm 3.9}{24-115}$	27.6	$\frac{54.7 \pm 2.4}{23-85}$	23.9
<i>I. mandshurica</i>	ксерофит/ xerophyte	$\frac{37.7 \pm 2.8}{27-59}$	20.6	$\frac{25.2 \pm 1.9}{13-44}$	34.8	$\frac{68.8 \pm 3.4}{36-90}$	22.7
<i>I. oxypetala</i>	ксерофит/ xerophyte	$\frac{104.6 \pm 5.9}{73-146}$	21.2	$\frac{64.3 \pm 6.2}{24-114}$	36.0	$\frac{61.7 \pm 4.3}{23-87}$	25.8
<i>I. sanguinea</i>	мезофит / mesophyte	$\frac{140.2 \pm 4.9}{116-178}$	14.7	$\frac{41.7 \pm 3.2}{24-86}$	32.8	$\frac{29.7 \pm 2.5}{19-64}$	35.7
<i>I. setosa</i>	мезогигрофит/ mesohygrophyte	$\frac{123.8 \pm 3.8}{84-162}$	16.8	$\frac{70.2 \pm 2.7}{32-101}$	21.0	$\frac{57.8 \pm 2.3}{24-79}$	21.8
<i>I. uniflora</i>	ксеромезофит/ xeromesophyte	$\frac{32.5 \pm 4.5}{41-67}$	20.0	$\frac{14.5 \pm 3.1}{10-34}$	32.3	$\frac{44.7 \pm 3.1}{16-71}$	34.2
<i>I. ventricosa</i>	ксерофит/ xerophyte	$\frac{52.2 \pm 2.8}{31-84}$	26.3	$\frac{12.8 \pm 4.2}{14-46}$	41.3	$\frac{27.1 \pm 2.6}{8-39}$	40.6
<i>I. vorobievii</i>	ксерофит/ xerophyte	$\frac{61.3 \pm 3.5}{36-86}$	25.5	$\frac{21.5 \pm 1.9}{12-45}$	40.9	$\frac{36.6 \pm 3.5}{18-73}$	42.7

Примечание. ¹ПСП – потенциальная семенная продуктивность; ²РСП – реальная семенная продуктивность; ³ПС – процент семенификации. M – среднее значение; m – ошибка среднего значения; lim – минимальное и максимальное значение, CV, % – коэффициент вариации.

Note. ¹PSP – the potential seed productivity; ²RSP – real seed productivity; ³PC – productivity coefficient. M – mean value; m – error of the mean; lim – the minimum and maximum value, CV, % – coefficient of variation.

Сравнительный анализ данных, касающихся репродуктивной деятельности и экологической приуроченности видов может помочь выявить косвенные причины снижения их семя- и плодобразования.

Виды ирисов с широким ареалом, приспособившиеся к обитанию в условиях более или менее стабильного среднего уровня увлажнения (мезофиты), а также те, которые предпочитают более влажные местообитания (гигрофиты) (табл. 3) имеют наиболее крупные размеры. В условиях интродукции они характеризуются высокими и слабо варьирующими показателями ПСП, что свидетельствует о довольно высокой степени адаптации

к экологическим условиям и стабильности вида в целом. РПС у этих видов в среднем в два раза ниже ПСП, вариабельность последнего показателя заметно выше. Процент семенификации, как один из надежных показателей “благополучия” семенного размножения вида, в среднем примерно в 3 раза ниже ПСП, однако в целом для этих видов он находится в пределах средних величин, что подтверждает стабильность семенного размножения. Несколько ниже все анализируемые показатели репродукции у ксерофита *I. oxypetala*.

Показатели семенной продуктивности ксерофита *I. mandshurica* и ксеромезофита *I. uniflora* в 2–3 раза ниже, чем у *I. oxypetala*, что свидетель-

ствуется об их нестабильности в условиях Ботанического сада, и, вероятно, связано с неблагоприятными условиями среды (высокая влажность и температура) в период закладки репродуктивных органов и плодообразования.

У дальневосточных представителей рода *Iris* — ксерофитов (*I. dichotoma*, *I. ventricosa* и *I. vorobievii*), имеющих ограниченный ареал распространения на территории Российской Федерации и предпочитающих сухие остепненные участки, а также ксеромезофита *I. domestica*, отмечены самые низкие показатели семенной продуктивности. Основная причина этого — низкий уровень адаптации видов к условиям муссонного климата, реже — естественные вредители.

I. dichotoma в природе произрастает по сухим, обычно южным, хорошо прогреваемым солнечным склонам, по щебнистым осыпям, известковым откосам, на заброшенных пашнях, среди разнотравья остепненных лугов в Забайкалье и Приамурье. По нашим наблюдениям, в условиях муссонного климата Южного Приморья этот вид страдает от избытка влаги в вегетационный период, а в зимний период — от морозного выжимания корневой системы, характерного для бесснежных зим.

У *I. domestica* корневая система расположена близко к поверхности почвы, в зимний период растения страдают не только от морозов, но и от выпревания, и мерзлотного выжимания. Поэтому в годы с неблагоприятными зимними условиями *I. dichotoma* и *I. domestica* выходят из зимы ослабленными, что сказывается на их дальнейшем развитии и плодоношении. Наши данные сопоставимы с данными для *I. dichotoma* и *I. domestica*, которые были получены на коллекционных участках в Амурском филиале БСИ ДВО РАН [26].

Согласно нашим наблюдениям и литературным сведениям [30], *I. vorobievii* является малолетником. Его цветение приходится на конец мая — начало июня. В это время в регионе отмечается дождливая и туманная погода, что препятствует нормальному опылению и приводит к низкой семенной продуктивности.

Семенная репродуктивность *I. ventricosa* как *ex situ*, так и *in situ*, крайне низкая, что связано с

естественными вредителями — насекомыми-долгоносиками из рода Однокоготки (*Mononychus vitatus* Fald.), сем. Curculionidae [38], поедающими семязачатки *I. ventricosa*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенный анализ линейных и весовых параметров семян 11 видов рода *Iris* в условиях Ботанического сада-института ДВО РАН, показал, что размеры и масса семян большинства видов в условиях *ex situ* в незначительной степени отличаются от таковых в условиях *in situ*, что свидетельствует о достаточно высокой степени адаптации видов в культуре. Все изученные виды характеризуются в условиях *ex situ* регулярным плодоношением, но различаются величиной и уровнем изменчивости показателей семенной продуктивности. Значения последнего варьируют в основном от средних до высоких.

В условиях культуры наблюдается определенная связь экологической формы вида и его семенной продуктивности. Снижение всех показателей репродуктивной деятельности у изученных видов рода *Iris* прослеживается от мезофитов к ксерофитам, от видов с широким ареалом к редким, занесенным в Красные книги различного ранга. Основные вероятные причины этого явления — неблагоприятные условия внешней среды в период вегетации и зимовки, недостаточное количество опылителей, повреждение завязавшихся семян насекомыми.

В целях сохранения изученных видов в природе в дальнейшем необходима разработка комплекса мер, направленных на минимизацию причин, приводящих к снижению семенной продуктивности и разработку протоколов сохранения видов *in vitro*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы “Введение в культуру, изучение и сохранение генетических ресурсов хозяйственно ценных растений Восточной Азии” (интернет номер ЕГИСУ НИОКТР: 1021060207393-6).

Выражаем благодарность студентке ДВФУ Е.А. Крашенининой за помощь в работе по определению массы семян ирисов и их морфометрических показателей, П. Петровой — за дизайн рисунка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнагий И.В. 1974. О методике изучения семенной продуктивности растений. — Бот. журн. 59(6): 826–833. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=3906&rid=pdf_0003897
2. Маслова Н.В., Елизарьева О.А., Асадуллина С.Ф. 2008. Семенная продуктивность *Oxytropis gmelinii* Fisch. ex Boriss. (Fabaceae) в популяции на территории памятника природы “Гора Маяк-тау”. — В сб.: Труды Южно-Уральского государственного природного заповедника. Вып. I. Природный комплекс Южно-Уральского государственного природного заповедника и сопредельных территорий. Уфа. С. 278–287.
3. Шибанова Н.Л., Долгих Я.В. 2010. Морфометрическая характеристика семян и реальная семенная продуктивность редких видов орхидных Предуралья. — Вестник Пермского Университета. Серия Биология. 2: 4–6. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17024557>

4. Доронькин В.М., Лагманова Т.Г. 1987. Семенная продуктивность некоторых сибирских видов *Iris* L. — Растит. ресурсы. 23(4): 561–566.
5. Холина А.Б., Болтенков Е.В., Илюшко М.В., Воронков А.А. 1997. Внутривидовая изменчивость плодов и семян трех видов *Iris* L. на Дальнем Востоке России. — Растит. ресурсы. 33(1): 56–68.
6. Чугаева В.Н. 2006. Особенности репродуктивной биологии представителей рода *Iris* L. — Вестник Тверского государственного университета. Серия “Биология и экология”. 2: 138–143.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15219683>
7. Миронова Л.Н. Японские ирисы. 2008. Эколого-биологические особенности интродукции *Iris ensata* Thunb. и его сортов на юге Приморского края. Владивосток. 110 с.
8. Шайбаков А.Ф., Миронова Л.Н. 2008. Опыт интродукции редких видов ириса флоры Башкортостана. — Бюллетень Ботанического сада Саратовского государственного университета. 7: 175–181.
https://bbs.sgu.ru/system/files_force/2017/03/175-182.pdf
9. Абрамова Л.М., Крюкова А.В. 2013. Семенная продуктивность редкого вида *Iris pumila* L. в природе и в условиях культуры. — Вестник Оренбургского государственного университета. 10(159): 156–159.
http://vestnik.osu.ru/2013_10/41.pdf
10. Иванова Н.С., Заровняева А.Н. 2011. Биологические особенности некоторых декоративных однодольных видов в условиях интродукции центральной Якутии. — Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 14-1(98): 265–268.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21305211>
11. Карташева Л.М. 2011. Онтогенез редких и малоизученных видов семейства Iridaceae Juss. при интродукции в Центральном Черноземье. — Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Гео-экология. 1: 167–170.
<http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2011/01/2011-01-42.pdf>
12. Кайгородова Е.Н., Дорогина О.В., Елисафенко Т.В. 2012. Особенности морфологии семян некоторых видов рода *Iris* (Iridaceae) юга Западной Сибири. — Растительный мир Азиатской России. 1(9): 44–49.
https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=183757&ARTICLE_ID=183806
13. Набиева А.Ю., Елисафенко Т.В. 2012. Особенности размножения редких сибирских видов рода *Iris* L. — *I. glaucescens* Bunge и *I. bloudowii* Ledeb. в условиях культуры. — Turczaninowia. 15(1): 88–84.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17880360>
14. Павлова П.А., Данилова Н.С. 2013. Интродукция касатика щетинистого (*Iris setosa* Pall. ex Link) в Центральной Якутии. — Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 7: 94–99.
<http://www.kgau.ru/vestnik/content/2013/7.13.pdf>
15. Вяль Ю.А., Мазей Н.Г., Можеева Г.Ф., Булатова В.Р. 2014. Особенности онтоморфогенеза *Belamcanda chinensis* (L.) DC. (Iridaceae) в условиях интродукции в Пензенской области. — Бюллетень Брянского отделения РБО. 2(4): 3–8. https://bulletin-rbs.ucoz.ru/_ld/0/8_Bullein_BD_RBS_.pdf
16. Павлова М.А. 2016. Опыт интродукции *Iris graminea* L. в Донецком ботаническом саду. — Hortus Botanicus. 11: 163–173.
<https://doi.org/10.15393/j4.art.2016.3203>
17. Минжал М.Ш., Болдырев В.А. 2016 Морфометрические признаки семян некоторых видов рода *Iris* L. в Саратовской области. — Известия Саратовского университета. Серия Химия. Биология. Экология. 16(4): 404–410.
https://ichbe.sgu.ru/system/files_force/text-pdf/2022/04/4-2016_himiya.42-48.pdf
18. Huang L., Ma W., Liu Y., Peng Y., Xiao P. 2014. Two new isoflavones from *I. dichotoma*. — Chem. Nat. Compd. 50(3): 430–432.
<https://doi.org/10.1007/s10600-014-0978-9>
19. Kaššák P. 2012. Total flavonoids and phenolics content of the chosen genus *Iris* species. — Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun. 60(8): 119–126.
<https://doi.org/10.11118/actaun201260080119>
20. Qin M.J., Ji W.L., Wang Z.T., Ye W.C. 2005. A new isoflavonoid from *Belamcanda chinensis* (L.) DC. — J. Integr. Plant Biol. 47(11): 1404–1408.
<https://doi.org/10.1111/J.1744-7909.2005.00142.X>
21. Тихомирова Л.И., Базарнова Л.Г., Микушина И.В., Долганова З.В. 2015. Фармаколого-биологическое обоснование практического использования некоторых представителей рода *Iris* L. (Обзор). — Химия раст. сырья. 3: 25–34.
<https://doi.org/10.14258/jcprm.201503837>
22. Шретер А.И. 1992. Целебные растения Дальнего Востока. Владивосток. 160 с.
23. Jung S.H., Lee Y.S., Lee S., Lim S.S., Kim Y.S., Shin K.H. 2002. Isoflavonoids from the rhizomes of *Belamcanda chinensis* and their effects on aldose reductase and sorbitol accumulation in streptozotocin induced diabetic tissues. — Arch. Pharm. Res. 25(3): 306–312.
<https://doi.org/10.1007/BF02976631>

24. Wei Y., Shu P., Qin M. 2012. Qualitative and quantitative evaluation of phenolic compounds in *Iris dichotoma* Pall. — *Phytochem. Anal.* 23(3): 197–207.
<https://doi.org/10.1002/pca.1343>
25. Wozniak D., Janda B., Kapusta I., Oleszek J., Matkowski A. 2010. Antimutagenic and anti-oxidant activities of isoflavonoids from *Belamcanda chinensis* (L.) DC. — *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 696(2): 148–153.
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.01.004>
26. Ступникова Т.В. 2018. Биологические особенности семян редких и исчезающих видов растений юга Дальнего Востока России. — *Растительные ресурсы.* 54(1): 5–25.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32328488>
27. Красная книга Амурской области: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных, растений и грибов. 2020. Благовещенск. 502 с. <https://redbook28.ru>
28. Красная книга Иркутской области. 210. Иркутск. 480 с. <http://oopt.aari.ru/ref/286>
29. Красная книга Приморского края: Растения. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. 2008. Владивосток. 688 с. <http://redbookpk.ru/>
30. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). 2008. М. 855 с.
31. Красная книга Республики Саха (Якутия). Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. Том 1. 2017. Москва. 420 с.
<https://cloud.mail.ru/public/2UF5/51CtbrxWR>
32. Красная книга Хабаровского края. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений, грибов и животных. 2010. Хабаровск. 632 с. <http://oopt.aari.ru/ref/98>
33. Красная книга Хабаровского края. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений, грибов и животных. 2019. Воронеж. 604 с.
34. Методические указания по семеноведению интродуцентов. 1980. — Отв. ред. акад. Н.В. Цицин. М. 64 с.
35. Лишук С.С. 1991. Методика определения массы семян. — *Бот. журн.* 76(11): 1623–1624.
http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19911111&rid=pdf_0005139
36. Туркена В.Г. 1991. Биологические аспекты микроклимата муссонной зоны Дальнего Востока. Владивосток. 203 с.
37. Алексеева Н.Б., Болтенков Е.В., Миронова Л.Н. 2011. Некоторые особенности морфологии семян дальневосточных видов рода *Iris* (Iridaceae). — *Бот. журн.* 96(7): 851–857.
http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=20110707&rid=pdf_0004669
38. Дудкин Р.В., Миронова Л.Н. 2008. Новое местонахождение *Iris ventricosa* (Iridaceae) в Приморском крае. — *Бот. журн.* 93(5): 797–799.
http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=20080505&rid=pdf_0004907

Reproductive Features of the *ex situ* *Iris* (Iridaceae) Species from the Russian Far East

L. N. Mironova^a, V. A. Kalinkina^a, *

^a Botanical Garden-Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

*e-mail: conf-lf@yandex.ru

Abstract—The article presents the results of studying seeds of the Far Eastern *Iris* L. species under *ex situ* conditions. Analysis of size and weight parameters of the *ex situ* seeds showed their insignificant difference from the *in situ* ones, which indicates a sufficient degree of the species adaptation under introduction. All the studied species are characterized by regular fruiting and their seed productivity levels depend on the species. The highest rates of variability in seed productivity are found in *Iris dichotoma* (Pall.) L.W. Lenz, *I. domestica* Goldblatt & Mabb., *I. ventricosa* Pall., *I. vorobievii* N.S. Pavlova — the species listed in national and regional Red Data Books under endangered categories.

Keywords: *Iris*, rare species, sizes, weight of seeds, seed productivity

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out within the framework of the research assignment “Introduction to the culture, study and conservation of genetic resources of economically valuable plants of East Asia” (EGISU NIOKTR Internet number: 1021060207393-6).

We express our gratitude to E.A. Krasheninina, student of FEFU, for her assistance in determining iris seed mass and their morphometric parameters, and to P. Petrova — for designing the drawing.

REFERENCES

1. Vaynagiy I.V. 1974. On the method of studying seed productivity of plants. — Botanicheskiy zhurnal. 59(6): 826–833. http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=3906&rid=pdf_0003897 (In Russian)
2. Maslova N.V., Elizariyeva O.A., Asadullina S.F. 2008. [Seed productivity of *Oxytropis gmelinii* Fisch. ex Boriss. (Fabaceae) in a population at the 'Mayak-tau Mountain' natural monumet]. — In: [Proceedings of the South Urals State Nature Reserve. 1. Natural complex of the South Urals State Nature Reserve and adjacent territories]. Ufa. P. 278–287. (In Russian)
3. Shibanova N.L., Dolgych Ya.V. 2010. [The morfometric characteristics of seeds and real seed production of rare Orchidaceae species from Cis-Urals]. — Bulletin of the Perm University. Biology. 2: 4–6. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17024557> (In Russian)
4. Doronkin V.M., Lagmanova T.G. 1987. [Seed productivity of some Siberian *Iris* L. species] — Rastitelnye Resursy. 23(4): 561–566. (In Russian)
5. Holina A.B., Boltenkov E.V., Ilushko M.V., Voronkov A.A. 1997. [Intraspecific variability of fruits and seeds of three species of *Iris* L. in the Russian Far East]. — Rastitelnye Resursy. 33(1): 56–68. (In Russian)
6. Chugaeva V.N. 2006. [Peculiarities of the reproductive biology of some representatives of the genus *Iris* L.] — Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology. 2: 138–143. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15219683> (In Russian)
7. Mironova L.N. 2008. [Japanese irises. Ecological and biological characteristics of cultivation of the *Iris ensata* Thunb. and its varieties in the south of Primorskii Territory]. Vladivostok. 110 p. (In Russian)
8. Shaybakov A.F., Mironova L.N. 2008. [Experience in the introduction of rare *Iris* species from the flora of Bashkortostan]. — Bulletin of Botanic Garden of Saratov State University. 7: 175–181. https://bbs.sgu.ru/system/files_force/2017/03/175-182.pdf (In Russian)
9. Abramova L.M., Kryukova A.V. 2013. [Rare *Iris pumila* L. species seed productivity in nature and in introduction]. — Vestnik of the Orenburg State University. 10(159): 156–159. http://vestnik.osu.ru/2013_10/41.pdf (In Russian)
10. Ivanova N.S., Zarovnyaeva A.N. 2011. [Biological features of some decorative monocotyledones species under introduction in central Yakutia] — Nauchny vestnik of the Belgorod State University. Estestvennye nauki. 14–1(98): 265–268. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21305211> (In Russian)
11. Kartashova L.M. 2011. [Ontogenesis of rare and understudies species of *Iridaceae* Juss. family under introduction in the Central Black Earth area] — Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geocology. 1: 167–170. <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2011/01/2011-01-42.pdf> (In Russian)
12. Kaygorodova E.N., Dorogina O.V., Elisafenko T.V. 2012. [Morphology features of seeds in some species *Iris* (*Iridaceae*) in the south of Western Siberia] — Flora and vegetation of Asian Russia. 1(9): 44–49. https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=183757&ARTICLE_ID=183806 (In Russian)
13. Nabieva A. Yu., Elisafenko T.V. 2012. Peculiarities of reproduction of rare Siberian species of the genus *Iris* L. — *I. glaucescens* Bunge and *I. bloudowii* Ledeb. in culture. — Turczaninowia. 15(1): 80–84. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17880360> (In Russian)
14. Pavlova P.A., Danilova V.S. 2013. Introduction of the iris (*Iris setosa* Pall. ex Link) in the Central Yakutia. — The Bulletin of KrasGAU. 7: 94–99. <http://www.kgau.ru/vestnik/content/2013/7.13.pdf> (In Russian)
15. Vyal Y.A., Mazei N.G., Mojaeva G.F., Bulatova V.R. 2014. [Features of ontomorphogenesis of *Belamcanda chinensis* (L.) DC. (*Iridaceae*) in the conditions of introduction in the Penza region. — Bulletin of Bryansk Department of RBS. 2(4): 3–8. https://bulletin-rbs.ucoz.ru/_ld/0/8_Bullein_BD_RBS_.pdf (In Russian)
16. Pavlova M.A. 2016. [*Iris graminea* L. introduction at the Donetsk Botanical Garden]. — Hortus Botanicus. 11: 163–173. (In Russian) <https://doi.org/10.15393/j4.art.2016.3203>
17. Minzhal M. Sh., Boldyrev V.A. 2016. Morphological characteristics of seeds of some *Iris* L. in Saratov region. — Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology. — 16(4): 404–410. (In Russian) https://ichbe.sgu.ru/system/files_force/text-pdf/2022/04/4-2016_himiya.42-48.pdf
18. Huang L., Ma W., Liu Y., Peng Y., Xiao P. 2014. Two new isoflavones from *Iris dichotoma*. — Chem. Nat. Compd. 50(3): 430–432. <https://doi.org/10.1007/s10600-014-0978-9>
19. Kaššák P. 2012. Total flavonoids and phenolics content of the chosen genus *Iris* species. — Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun. 60(8): 119–126. <https://doi.org/10.11118/actaun201260080119>
20. Qin M.J., Ji W.L., Wang Z.T., Ye W.C. 2005. A new isoflavonoid from *Belamcanda chinensis* (L.) DC. — J. Integr. Plant Biol. 47(11): 1404–1408. <https://doi.org/10.1111/J.1744-7909.2005.00142.X>
21. Tikhomirova L.I., Bazarnova L.G., Mikushina I.V., Dolganova Z.V. 2015 [Pharmaco-biochemical study of practical use of some members of the genus *Iris* L. (Overview)] — Khimija Rastitel'nogo Syr'ya. 3: 25–34. (In Russian) <https://doi.org/10.14258/jcprm.201503837>
22. Shreter A.I. 1992. [Medicinal plants of the Far East]. Vladivostok. 160. (In Russian)
23. Jung S.H., Lee Y.S., Lee S., Lim S.S., Kim Y.S., Shin K.H. 2002. Isoflavonoids from the rhizomes of *Belamcanda chinensis* and their effects on aldose reductase and sorbitol accumulation in streptozotocin induced diabetic tissues. — Arch. Pharm. Res. 25(3): 306–312. <https://doi.org/10.1007/BF02976631>

24. Wei Y., Shu P., Qin M. 2012. Qualitative and quantitative evaluation of phenolic compounds in *Iris dichotoma* Pall. — *Phytochem. Anal.* 23(3): 197–207.
<https://doi.org/10.1002/pca.1343>
25. Wozniak D., Janda B., Kapusta I., Oleszek J., Matkowski A. 2010. Antimutagenic and anti-oxidant activities of isoflavonoids from *Belamcanda chinensis* (L.) DC. — *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 696(2): 148–153.
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.01.004>
26. Stupnikova T.V. 2018. Biological characteristics of the seeds of rare and endangered plant species of the southern Russian Far East. — *Rastitelnye Resursy.* 54(1): 5–25.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32328488> (In Russian)
27. [Red Data Book of the Amur Region: Rare and endangered species of animals, plants and fungi]. 2020. Blagoveshchensk. 446 p. <https://redbook28.ru> (In Russian)
28. [Red Data Book of the Irkutsk region]. 2010. Irkutsk. 480 p. <http://oopt.aari.ru/ref/286> (In Russian)
29. [Red Data Book of Primorye Territory: Rare and endangered species of plants and fungi]. 2008. Vladivostok. 688 p. <http://redbookpk.ru/> (In Russian)
30. [Red Data Book of the Russian Federation (plants and fungi)]. 2008. Moscow. 855 p. <http://oopt.aari.ru/ref/38> (In Russian)
31. [Red Data Book of the Republic of Sakha (Yakutia). V. 1. Rare and endangered species of plants and fungi]. 2017. Moscow. 412 p. <https://cloud.mail.ru/public/2UF5/51CtbrxWR> (In Russian)
32. Red Book of the Khabarovsk Krai. Rare and endangered plant and animal species. 2008. Khabarovsk. 632 p. <http://oopt.aari.ru/ref/98> (In Russian)
33. [Red Data Book of the Khabarovsk Krai. Rare and endangered species of plants, fungi and animals]. 2019. Voronezh. 604 p. (In Russian)
34. [Methodical instructions on a study of seeds of introduced species]. Moskva. 1980. 64 p. (In Russian)
35. Lishchuk S.S. 1991. Method of seed mass determination. — *Botanicheskii zhurnal.* 76(11): 1623–1624.
http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19911111&rid=pdf_0005139 (In Russian)
36. Turkenya V.G. 1991. [Biological aspects of the microclimate of the Far East monsoon zone]. Vladivostok: FEB Academy of Sciences of the USSR. 203 p. (in Russian)
37. Alekseeva N.B., Boltenkov E.V., Mironova L.N. 2011. Some peculiarities of seed morphology of the *Iris* (Iridaceae) species from the Russian Far East. — *Botanicheskii zhurnal.* 96(7): 851–857.
http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=20110707&rid=pdf_0004669 (In Russian)
38. Doudkin R.V., Mironova L.N. 2008. [A new locality of *Iris ventricosa* (Iridaceae) in Primorie Territory]. — *Botanicheskii zhurnal.* 93(5): 797–799.
http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=20080505&rid=pdf_0004907 (In Russian)

**КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ**

**СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ПОЛИСАХАРИДОВ
В НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ *FERULA KUHISTANICA* (APIACEAE)**© 2022 г. Д. З. Азизов¹, *, Р. К. Рахманбердыева¹, М. Х. Маликова¹, М. А. Маматханова¹¹Институт химии растительных веществ им. акад. С.Ю. Юнусова АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан

*e-mail: d.azizov88@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2022 г.

После доработки 12.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Изучена сезонная динамика содержания и состава водорастворимых полисахаридов и пектиновых веществ, установлен оптимальный срок заготовки надземной части *Ferula kuhistanica*. Определен количественный моносахаридный и макро- и микроэлементный составы полисахаридов.

Ключевые слова: *Ferula kuhistanica*, сезонная динамика, водорастворимые полисахариды, пектиновые вещества, экстракция, гидролиз, урсоловые кислоты

DOI: 10.31857/S0033994622030037

Ferula L. — один из наиболее распространенных родов многолетних растений, относящихся к семейству Apiaceae. Виды рода *Ferula* встречаются повсеместно в Азии и Европе, особенно распространены в зоне пустынь Средней Азии, в Афганистане и Иране. К роду *Ferula* L. в настоящее время относят более 150 видов [1–3]. Центральная Азия является одним из типичных районов произрастания представителей рода, здесь встречается максимальное разнообразие видов. Многие виды *Ferula* являются хорошими кормовыми растениями, относятся к эфирноносным и медоносным растениям [4]. Растения этого рода широко используются в пищевой промышленности в качестве пряноароматического, а также консервирующего материала [3]. В настоящее время этот род представляет большой интерес также как сырьевая база для получения различных групп биологически активных соединений, обладающих широким спектром фармакологической активности. Компонентный состав *Ferula* представлен кумаринами, органическими сульфидами, сесквитерпеновыми лактонами, фурукумаринами, флавоноидами, сложными эфирами ароматических спиртов.

Одним из широко распространенных видов рода *Ferula* является *F. kuhistanica* Eug. Kog. Смола этого лекарственного растения в народной медицине применяется для лечения опухолей, ран и язв [5]. В ветеринарии смолу используют как ранозаживляющее при опухолях, а также в качестве слабительного. Его плоды обладают трихомоностатическими свойствами [6]. Как уже указано выше, в химическом отношении изучены низко-

молекулярные соединения. На основе сложных эфиров *F. kuhistanica* в Институте химии растительных веществ АН РУз создан препарат “куф-эстрол” для увеличения яйценоскости птиц [7–9]. Следует отметить, что в литературе мало информации об углеводном составе растений данного рода.

Ранее из надземной части (листья, стебли) *F. kuhistanica* и *F. tenuisecta* нами были выделены и изучены различные группы полисахаридов: водорастворимые полисахариды (ВРПС), пектиновые вещества (ПВ) и гемицеллюлозы (ГМЦ). Показано, что распределение этих полисахаридов в растении неравномерно, наибольшее их накопление наблюдается в листьях [10]. Доминирующими являются водорастворимые полисахариды. Из надземной части *F. kuhistanica* выделен водорастворимый полисахарид — арабиногалактан. Химическими и спектральными методами выявили основную цепь полимера, состоящую, в основном из остатков 1 → 6-β-галактопиранозы, перемежающихся с редкими остатками 1 → 2-β-галактопиранозы. В положении С-3 1,6-замещенных остатков галактопиранозы имеются боковые ответвления, представленные α-арабинофуранозой или ее 1,5-связанными олигомерами, а также дисахаридными фрагментами β-GlcpA-4-O-Me-(1 → 6)-β-Galp-(1 → небольшая часть 1,6-замещенных остатков основной цепи несет моносахаридные остатки β-Galp-(1 → в положении С-2, т.е. арабиногалактан относится к арабино-3,6-галактанам. При изучении фармакологической активности было выявлено, что водорастворимый полисахарид и пектиновые вещества *F. kuhistanica* нормализуют функции желудочно-кишечного тракта,

т.е. являются пребиотиками. Поэтому необходимой задачей является заготовка сырья с максимальным содержанием полисахаридов.

Цель данной работы состоит в исследовании сезонной динамики содержания и состава различных полисахаридов надземной части *F. kuhistanica*, определении их физико-химических параметров и установлении оптимального срока заготовки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Инаktivация сырья. Каждый образец растения (по 50 г) в соответствии с периодом вегетации обрабатывали кипящей смесью хлороформ–метанол (1 : 1) в течение 1 ч в соотношении 1 : 5. Затем остаток растения при нагревании обрабатывали 82%-ным этанолом для выделения спирторастворимых сахаров (СРС). Спиртовые экстракты отделяли фильтрованием, объединяли и упаривали до небольшого объема и анализировали бумажной хроматографией (БХ) на бумаге Filtrak FN-16, в системе *n*-бутанол–пиридин–вода 6 : 4 : 3. Для индикации гексоз применяли кислый фталат анилина (1), кетоз – 5%-ный спиртовой раствор мочевины – соляная кислота (2).

Выделение водорастворимых полисахаридов (ВРПС-х). Остаток сырья экстрагировали дважды водой при комнатной температуре в течение 2–3 ч, при гидромодуле 1 : 10 и 1 : 8 соответственно. Экстракты объединяли, центрифугировали, сгущали и осаждали 2-х кратным объемом этилового спирта. Выпавший осадок отделяли, промывали спиртом, обезвоживали ацетоном, сушили в вакууме над P_2O_5 . Выход ВРПС-х: 2.3 (начало вегетации), 2.55 (период цветения), 2.4 (период бутонизации) и 2.8 г (период плодоношения).

Выделение водорастворимых полисахаридов (ВРПС-г). Остаток сырья, после экстракции холодной водой, дважды экстрагировали водой (гидромодуль 1 : 8) при температуре 70 °С в течение 3 ч. Экстракты объединяли, сгущали и осаждали двукратным объемом спирта. Выпавший осадок обрабатывали, как описано выше. Выход ВРПС-г: 0.5 (начало вегетации), 0.8 (период цветения), 0.75 (период бутонизации) и 0.6 г (период плодоношения).

Выделение пектиновых веществ (ПВ). После выделения ВРПС мезгу дважды обрабатывали смесью равных объемов 0.5%-ных растворов щавелевой кислоты и оксалата аммония (1 : 10) при температуре 70 °С в течение 3 ч. Экстракты диализовали против проточной воды до нейтральной среды, упаривали и осаждали спиртом (1 : 2). Осадок отделяли, промывали этанолом, высушивали ацетоном. Сушили в вакууме над P_2O_5 . Выходы ПВ: 1.0 (начало вегетации), 3.0 (период цветения),

3.35 (период бутонизации) и 3.7 г (период плодоношения).

Полный кислотный гидролиз ВРПС, ПВ. Образцы ВРПС гидролизовали 1 н H_2SO_4 при 100 °С в течение 8 ч, ПВ – 2 н H_2SO_4 24 часа соответственно. Гидролизаты нейтрализовали $BaCO_3$, фильтраты деионизировали катионитом КУ-2 (H^+), упаривали до сиропа. Качественный и количественный моносахаридный состав изучали посредством БХ и ГХ.

Газохроматографический анализ (ГХ) анализ образцов проводили в виде ацетатов альдононитрилов моносахаридов [11] на хроматографе Shimadzu GC-2010 с пламенно-ионизационным детектором, кварцевая капиллярная колонка Shimadzu Rxi-624SilMS (30 м × 25 мм × 1.40 мкм), скорость подвижной фазы (N_2) 1.5 мл/мин, температура инжектора 260 °С, детектора – 280 °С и колонки – 230 °С.

Элементный анализ проводили на ICP-атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICP Nex ION 2000 (фирма Perkin Elmer EVOMA) СЕМ.

ИК-спектры образцов регистрировали на ИК-Фурье спектрометре фирмы Perkin-Elmer, модель 2000, в пластинках, прессованных с KBr.

Вязкость растворов полисахаридов измеряли с использованием вискозиметра Оствальда с диаметром капилляра 0.75 мм при температуре 22 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выделение водорастворимых полисахаридов (ВРПС), пектиновых веществ (ПВ) из надземной части *F. kuhistanica* проводили по ранее описанному способу [10]. Из литературы известно, что водорастворимые полисахариды проявляют широкий спектр биологической активности. Ранее при изучении биологической активности полисахаридов нами было выявлено, что ВРПС и ПВ надземной части *F. kuhistanica* проявляют пребиотическую активность и могут быть потенциальным источником для получения лекарственных препаратов и БАДов [10, 12]. Поэтому для выявления максимального содержания ВРПС и ПВ изучена динамика их накопления по периодам вегетации. Растения заготавливали в 2021 г. в Самаркандской обл. (Республика Узбекистан) в следующие фазы развития: I – начало вегетации (5.04.2021), II – цветение (1.05.2021), III – бутонизация (15.05.2021), IV – плодоношение (1.06.2021). Выходы полисахаридов и их моносахаридный состав представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, полисахариды в растении распределены неодинаково. Во всех периодах наблюдается преобладание ВРПС-х, но их наибольшее накопление происходит в период плодоношения (5.6%), количественное содержа-

Таблица 1. Сезонная динамика содержания и моносахаридный состав полисахаридов надземной части *F. kuhistanica*
Table 1. Seasonal dynamics of polysaccharide content and their monosaccharide composition in the aerial parts of *F. kuhistanica*

Период вегетации Growing stage	Тип ПС PS type	Выход Output, %	Моносахаридный состав, %; Monosaccharide composition, %						Содержание UA, % UA content, %	Соотношение Ara/Gal Ara/Gal Ratio
			Rha	Ara	Xyl	Man	Glu	Gal		
Начало вегетации Beginning of the growing season	ВРПС-х WSPS-c	4.6	9.3	17.6	3.8	11.2	17.0	41.2	9.0	1 : 2.3
	ВРПС-г WSPS-h	1.0	9.1	15.0	7.0	14.6	27.7	26.5	16.0	1 : 1.8
	ПВ PS	2.0	16.5	26.0	4.5	—	3.0	50.0	19.0	1 : 1.9
Цветение Blooming	ВРПС-х WSPS-c	5.6	5.0	25.0	1.5	6.0	9.5	53.0	14.0	1 : 2.1
	ВРПС-г WSPS-h	1.6	18.7	14.5	4.0	11.7	26.3	25.0	20.0	1 : 1.7
	ПВ PS	6.0	22.8	28.5	2.2	—	—	45.5	27.0	1 : 1.6
Бутонизация Budding	ВРПС-х WSPS-c	4.8	5.2	18.6	3.6	6.6	29.3	36.7	10.0	1 : 1.9
	ВРПС-г WSPS-h	1.5	13.4	21.2	4.0	12.3	9.0	4.1	3.0	5.2 : 1
	ПВ PS	6.7	20.2	31.0	2.7	—	4.3	41.3	75.0	1 : 1.3
Плодоношение Fruiting	ВРПС-х WSPS-c	5.1	3.7	37.0	2.6	4.1	24.8	28.0	5.4	1.3 : 1
	ВРПС-г WSPS-h	1.2	10.5	24.2	3.1	17.0	1.9	43.4	18.0	1 : 1.8
	ПВ PS	7.4	2.5	50.0	23.8	—	2.7	19.1	87.0	2.6 : 1

Примечание: ПС – полисахариды, ВРПС-х – растворимые в холодной воде полисахариды, ВРПС-г – растворимые в горячей воде полисахариды, ПВ – пектиновые вещества, Rha – рамноза, Ara – арабиноза, Xyl – ксилоза, Man – манноза, Glu – глюкоза, Gal – галактоза, UA – уроновая кислота.
Note: PS – polysaccharides, WSPS-c – cold water-soluble polysaccharides, WSPS-h – hot water-soluble polysaccharides, PW – pectic substances, Rha – rhamnose, Ara – arabinose, Xyl – xylose, Man – mannose, Glu – glucose, Gal – galactose, UA – uronic acid.

ние ВРПС-г различается незначительно. Содержание ПВ постепенно увеличивается от 2.0 до 7.4%.

ВРПС представляют собой аморфные порошки светло коричневого цвета; растворяются в воде с образованием невязких растворов и имеют молекулярную массу 36–40 кДа. В ИК-спектрах были обнаружены полосы поглощения, характерные для кислых полисахаридов [13]. При установлении моносахаридного состава ВРПС обнаружено влияние периода развития растения на количественное содержание моносахаридов (табл. 1). Как видно из табл. 1, в период начала вегетации в ВРПС-х наблюдается присутствие арабинозы (17.6%) и галактозы (41.2%). Содержание урсонной кислоты в ВРПС-х варьирует от 5.4 и достигает 14% в период цветения. В случае ВРПС-г максимальное содержание урсонной кислоты наблюдается также в период цветения. Моносахаридный состав ВРПС-г в различные периоды отличается от состава ВРПС-х только количественно. В период цветения наблюдается высокое содержание рамнозы (18.7%), глюкозы (26.3%), галактозы (25%) и урсонной кислоты (20%), в период бутонизации наблюдается наличие рамнозы (13.4%), арабинозы (21.2%), маннозы (12.3%) и уменьшение урсонной кислоты (3%). Период плодоношения характеризуется увеличением содержания галактозы (43.4%), арабинозы (24.2%) и урсонной кислоты (18%). Вероятно, в эти периоды начинается синтез пектиновых веществ, и их наибольшее накопление отмечается в период плодоношения (7.4%).

Результаты показали, что в составе ВРПС-х представлены 29 макро- и микроэлементов, из них 6 – эссенциальные (табл. 2). Показано наличие среди макроэлементов калия – 6.6×10^1 мг/л, кальция (3.8×10^4 мг/л) и магния (6.1×10^3 мг/л), а среди эссенциально важных элементов – меди (2.3×10^1 мг/л). Наблюдается высокое содержание марганца – 1.4×10^1 мг/л, остальные элементы находятся в малых количествах, в пределах от 1.3 до 0.11 мг/л (табл. 2). Следовательно, в составе ВРПС-х содержатся соли макро- и микроэлементов.

Пектиновые вещества выделенных образцов представляют собой аморфные порошки, которые растворяясь в воде, образуют вязкие растворы с относительной вязкостью в пределах 9.6–11.7 г/дл. Молекулярная масса пектиновых веществ составляет 50–54 кДа. В ИК-спектре пектиновых веществ, выделенных в период плодоношения, имеется ряд полос поглощения, характерных для карбоксиполисахаридов. Полоса поглощения в области 832 см^{-1} характерна для пектинов, имеющих α -конфигурацию гликозидной связи, а полоса поглощения 889 см^{-1} характеризует $1 \rightarrow 4$ тип этой связи. Полоса поглощения в области 950 см^{-1} отражает деформационные колебания метильных и метиленовых групп. К числу характерных полос

поглощения относятся 1740 см^{-1} – валентные колебания карбонильной группы ($\text{C}=\text{O}$) карбоксила. Полосы поглощения 1620 и 1423 см^{-1} отражают ионизированный карбоксил, связанный с металлами. На основании данных ИК-спектроскопии установлено, что выделенный пектин имеет основную полигалактуроновую цепь с $1 \rightarrow 4$ гликозидными связями. Присутствие полосы поглощения в области 1370 см^{-1} показывает наличие метоксильных групп. Эти данные соотносятся с результатами титриметрического анализа, согласно которым степень этерификации (СЭ) находится в пределах 71.4–74.27%. Следовательно, выделенные ПВ относятся к высокоэтерифицированным пектинам [14].

Исследование моносахаридного состава ПВ показало, что период вегетации влияет на количественный моносахаридный состав. В начале вегетации в составе ПВ преобладают рамноза (5.5%), арабиноза (8.7%), галактоза (16.7%); в период цветения – рамноза (22.8%), арабиноза (28.5%), галактоза (45.5%); в период бутонизации – рамноза (20.2%), арабиноза (31%), галактоза (41.3%); во время плодоношения – арабиноза (50%) и ксилоза (23.8%). Содержание урсонной кислоты в процессе развития растения увеличивается от 19 до 87%. Из литературы известно, что в пектинах боковую цепь составляют арабинан, галактан, арабиногалактан и другие фрагменты [14]. По мере развития растения соотношение арабинозы и галактозы меняется; наблюдается постепенное увеличение содержания арабинозы, урсонной кислоты и уменьшение галактозы. В периоде плодоношения содержание арабинозы достигает 50%, в этот момент содержание галактозы составляет 19.1% и урсонной кислоты – 87%. Следовательно, на этом этапе синтезируются пектиновые вещества. Высокое содержание арабинозы, ксилозы и галактозы в ПВ в период плодоношения позволяет предполагать, что боковую цепь пектина, возможно, составляют арабинаны и ксилоураны. Из табл. 1 видно, что в ВРПС наблюдается постепенное снижение соотношения Ara/Gal и количества урсонной кислоты до периода цветения (рис. 1). С начала периода бутонизации увеличивается содержание арабинозы, и вышеуказанное соотношение составляет 5.2 : 1. Вероятно, в это время начинают синтезироваться фрагменты арабаны или арабиногалактаны, которые входят в состав растворимых пектиновых веществ.

Как уже было отмечено выше, ВРПС и ПВ обладают пребиотической активностью. На основе полученных фармакологических данных разработано и зарегистрировано техническое условие (ТУ) на способ получения водорастворимого полисахарида под названием “Арбифилан” [15].

Таблица 2. Некоторые микро- и макроэлементы в составе ВСПС надземной части *F. kuhistanica*
Table 2. Some trace and major elements of the water-soluble polysaccharides in the aerial parts of *F. kuhistanica*

Элемент Element	Количественное содержание, мг/кг Quantitative content, mg/kg	Элемент Element	Количественное содержание, мг/кг Quantitative content, mg/kg
Серебро, Ag Silver, Ag	4×10^{-3}	Литий, Li Lithium, Li	1×10^{-1}
Алюминий, Al Aluminium, Al	8.7×10^1	Магний, Mg Magnesium Mg	6.1×10^3
Мышьяк, As Arsenic, As	1×10^{-1}	Натрий, Na Sodium, Na	4.53×10^2
Барий, Ba Barium, Ba	1.3	Марганец, Mn Manganese, Mn	1.4×10^{-1}
Бериллий, Be Beryllium, Be	7×10^{-2}	Кремний, Si Silicon, Si	3.8×10^2
Висмут, Bi Bismuth, Bi	1×10^{-3}	Рубидий, Rb Rubidium, Rb	1.5
Кальций, Ca Calcium Ca	3.8×10^4	Селен, Se Selenium, Se	8.2×10^{-2}
Кадмий, Cd Cadmium, Cd	1.2×10^{-1}	Стронций, Sr Strontium, Sr	4.5
Кобальт, Co Cobalt, co	1.2×10^{-1}	Бор, B Bor, B	1.7×10^{-1}
Хром, Cr Chrome, Cr	1.1	Галлий, Ga Gallium, Ga	2×10^{-1}
Мед, Cu Copper, Cu	2.3×10^1	Индий, In Indium, In	н/о n/d
Железо, Fe Iron, Fe	8.2×10^2	Таллий, Tl Thallium, Tl	1×10^{-3}
Калий, K Potassium, K	6.6×10^4	Никель, Ni Nickel, Ni	1.3
Фосфор, P Phosphorus, R	1×10^3	Ванадий, V Vanadium, V	3×10^{-1}
Цинк, Zn Zinc, Zn	4.2		

Примечание: н/о — не обнаружено.
 Note: n/d — not detected.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что наибольшее накопление водорастворимых полисахаридов в надземной части *F. kuhistanica* наблюдается в период цветения, а пектиновых веществ — в период плодоношения. Следовательно, для биологических испытаний сырье следует собирать в эти периоды. Определены физико-химические параметры водорастворимых полисахаридов и пектиновых веществ, также их моносахаридные составы. Установлен

макро-и микроэлементный состав водорастворимых полисахаридов. Показано наличие в составе ВРПС среди макроэлементов калия и магния, а среди эссенциально важных элементов — меди.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Х. Рахматова, м. н. с. лаборатории лекарственных и технических растений Института химии растительных веществ АНРУз за своевременный сбор растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jalali H.T., Ebrahimian Z.J., Evtuguin D.V., Neto C.P. 2011. Chemical composition of oleo-gum-resin from *Ferula gummosa*. — *Industrial Crops and Products*. 33(2): 549–553. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.032>
2. Флора Узбекистана. 1962. Т.4. С. 399–439.
3. *Определитель растений Средней Азии*. Ташкент. 1983. Т. 7. С. 276–313.
4. Барнаулов С.Д., Кирьялов Н.П., Букреева Т.А. 1974. Фармакологические свойства некоторых кумаринов видов рода *Ferula* L. — *Раст. ресурсы*. 10(2): 259–262.
5. Рахмонкулов У., Мелибоев С. Биологические особенности и распространение перспективных лекарственных растений. 1981. Ташкент. С. 31–61.
6. *Растительные ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование*. 1988. Т. 4. Л. 357 с.
7. Халилов Р.М., Маматханов А.У., Котенко Л.Д., Ахмедходжаева Х. 2011. Способ получения средства, обладающего эстрогенной активностью: Пат. № Uz IAP 04422. Оpubл. Расмий ахборотнома. № 10. С. 41.
8. Маматханова М.А., Халилов Р.М., Котенко Л.Д., Маматханов А.У. 2017. Технология получения куфэстрола из надземной части *Ferula kuhistanica*. — *Kimyo va kimyo texnologiyasi* (Химия и химическая технология). 3: 66–69 <https://elibrary.ru/item.asp?id=30042315>
9. Маматханова М.А., Котенко Л.Д., Халилов Р.М., Маматханов А.У. 2018. Разработка методов стандартизации и постадийного контроля производства субстанции куфэстрола. — *Kimyo va kimyo texnologiyasi* (Химия и химическая технология). 4(62): 49–52. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36745232>
10. Erkulov Z.E., Malikova M.Kh., Rakhmanberdyeva R.K. 2011. Carbohydrates from the aerial part of *Ferula kuhistanica* and *F. tenuisecta*. — *Chem. Nat. Compd.* 47(2): 182–184. <https://doi.org/10.1007/s10600-011-9876-6>
11. Lance D.G., Jones J.K.N. 1967. Gas chromatography of derivatives on the methyl ethers of D-xylose. — *Can. J. Chem.* 45(17): 1995–1998. <https://doi.org/10.1139/v67-319>
12. Rakhmanberdyeva R.K., Shashkov A.S., Bobakulov Kh.M., Azizov D.Z., Malikova M.Kh., Ogay D.K. 2021. The structure and prebiotic activity of arabinogalactan from *Ferula kuhistanica*. — *Carbohydr. Res.* 505: 108342. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2021.108342>
13. Маликова М.Х., Ахмедова Х.Х., Рахманбердыева Р.К., Жауынбаева К.С. 2018. Пектиновые вещества *Ferula kuhistanica* и *Ferula tenuisecta*. — *Химия природ. соедин.* 1: 13–15.
14. Аймухамедова Г.Б., Алиева Д.З., Шелухина Н.П. 1984. Свойства и применение пектиновых сорбентов. С. 61–63.
15. *Водорастворимые полисахариды ферулы кухистанской “Арбифилан”*. ТУ Ts 03535440-031:2020.

Seasonal Dynamics of Polysaccharides in the Aerial Parts of *Ferula kuhistanica* (Apiaceae)

D. Z. Azizov^{a,*}, R. K. Rakhmanberdyeva^a, M. Kh. Malikova^a, M. A. Mamatkhanova^a

^a Yunusov Institute of the Chemistry of Plant Substance, AS RUz, Tashkent, Uzbekistan

*e-mail: d.azizov88@mail.ru

Abstract—The seasonal effect and dynamics of the content and composition of water-soluble polysaccharides and pectin substances has been studied, and the optimal harvesting time of *Ferula kuhistanica* aerial parts has been determined. The quantitative monosaccharide and trace and major element composition of polysaccharides were determined.

Keywords: *Ferula kuhistanica*, seasonal dynamics, water-soluble polysaccharides, pectin substances, extraction, hydrolysis, uronic acids

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Kh. Rakhmatov, the junior researcher of the laboratory of medicinal and industrial plants of the Institute of Chemistry of Plant Substances of the Academy of Sciences of Uzbekistan for the proper and timely collection of plants.

REFERENCES

1. Jalali H.T., Ebrahimian Z.J., Evtuguin D.V., Neto C.P. 2011. Chemical composition of oleo-gum-resin from *Ferula gum-mosa*. — *Industrial Crops and Products*. 33(2): 549–553.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.032>
2. [Flora of Uzbekistan]. 1962. V.4. P. 399–439. (In Russian)
3. [Key to plants of Central Asia]. Tashkent. 1983. V.7. P. 276–313.
4. Barnaulov S.D., Kiryalov N.P., Bukreeva T.A. 1974. [Pharmacological properties of some coumarins of species of the genus *Ferula* L.] — *Rastitelnye resursy*. 10(2): 259–262. (In Russian)
5. Rakhmonkulov U., Meliboev S. 1981. [Biological features and distribution of promising medicinal plants]. Tashkent. P. 31–61.
6. [Plant resources of the USSR: Flowering plants, their chemical composition, use]. 1988. V.4. Leningrad. 357 p.
7. Khalilov R.M., Mamatkhanov A.U., Kotenko L.D., Akhmedkhodzhaeva H. 2011. [Method for obtaining an agent with estrogenic activity: Pat. No. Uz IAP 04422]. Official newsletter. 2011. No. 10. P. 41.
8. Mamatkhanova M.A., Khalilov R.M., Kotenko L.D., Mamatkhanov A.U. 2017. [Technology for obtaining kufestrol from the aerial part of *Ferula kuhistanica*]. — *Kimyo va kimyo texnologiyasi (Chemistry and Chemical Engineering)*. 3(57): 66–69.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=30042315> (In Russian)
9. Mamatkhanova M.A., Kotenko L.D., Khalilov R.M., Mamatkhanov A.U. 2018. Development of methods for standardization and step-by-step control of the production of kufestrol substance. — *Kimyo va kimyo texnologiyasi (Chemistry and Chemical Engineering)*. 4(62): 49–52.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=36745232> (In Russian)
10. Erkulov Z.E., Malikova M.Kh., Rakhmanberdyeva R.K. 2011. Carbohydrates from the aerial part of *Ferula kuhistanica* and *F. tenuisecta*. — *Chem. Nat. Compd.* 47(2): 182–184.
<https://doi.org/10.1007/s10600-011-9876-6>
11. Lance D.G., Jones J.K.N. 1967. Gas chromatography of derivatives on the methyl ethers of D-xylose. — *Can. J. Chem.* 45(17): 1995–1998.
<https://doi.org/10.1139/v67-319>
12. Rakhmanberdyeva R.K., Shashkov A.S., Bobakulov Kh.M., Azizov D.Z., Malikova M.Kh., Ogay D.K. 2021. The structure and prebiotic activity of arabinogalactan from *Ferula kuhistanica*. — *Carbohydr. Res.* 505: 108342.
<https://doi.org/10.1016/j.carres.2021.108342>
13. Malikova M.Kh., Akhmedova Kh.Kh., Rakhmanberdyeva R.K., Zhaunynbaeva K.S. 2018. Pectinic substances from *Ferula kuhistanica* and *F. tenuisecta*. — *Chem. Nat. Compd.* 54(1): 10–12.
<https://doi.org/10.1007/s10600-018-2247-9>
14. Aymukhamedova G.B., Alieva D.Z., Sheluhina N.P. 1984. [Properties and application of pectin sorbents]. P. 61–63.
15. Water-soluble polysaccharides of *Ferula kuhistanica* “Arbifilan”. TU Ts 03535440-031:2020.

**КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ**

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛИФЕНОЛЬНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ В РАСТЕНИЯХ ВИДОВ *CIRSIIUM ESCULENTUM*, *CIRSIIUM
SERRATULOIDES* И *ANCATHIA IGNIARIA* (ASTERACEAE)**© 2022 г. Е. А. Кастерова¹ *, Е. С. Прокопьева¹, А. Е. Мудрикова¹, С. С. Кравцова¹¹Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет, г. Томск, Россия

*e-mail: evgenia.kasterova@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2022 г.

После доработки 26.04.2022 г.

Принята к публикации 15.06.2022 г.

В связи с выделением *Ancathia igniaria* (Spreng.) DC. (*Cirsium igniarium* Spreng.) на основании фило-генетических данных из рода *Cirsium* в монотипный род, интерес представляло выявить хемотаксо-номические различия компонентного состава полифенольного комплекса. Поскольку фенольные соединения имеют хемотаксономическое значение в ряде родов и семейств, предпринят сравни-тельный анализ компонентного состава полифенольного комплекса трех видов, два из которых *Cir- sium serratuloides* (L.) Hill и *Ancathia igniaria* изучены впервые. Идентификацию соединений проводи-ли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) в сравнении со стандартны-ми образцами. Сравнительный анализ компонентного состава фенольных соединений показал, что растения рода *Cirsium* близки по составу простых фенолов, но содержат различные наборы флаво-ноидов. Установлено, что надземные части изученных видов содержат по 6–8 соединений феноль-ной природы, из которых три простых полифенола общие: сирингин, хлорогеновая кислота и эти-лгаллат. Флавоноидный профиль надземной части растений видов *Cirsium* включает рутин и видо-специфичные для *C. serratuloides* цинарозид, кверцетин-3-*O*-β-*D*-диглюкозид-*O*-α-*L*-рамнозид, для *C. esculentum* (Siev.) C.A. Mey. — салипурпозид, гиперозид. В экстракте надземной части *A. igniaria* выявлены цинарозид, как в *C. serratuloides*, хризин 7-*O*-глюкозид и эриодиктиол. Еще большее раз-личие флавоноидного профиля выявлено между родами *Cirsium* и *Ancathia*. Данные по составу фе-нольных соединений важны как в целях хемосистематики, так и для использования растений в ка-честве лекарственного сырья. Спектрофотометрическим методом определено суммарное содержание кумаринов, агликонов и гликозидов флавоноидов в изученных видах. Содержание флавоноидов и ку-маринов в надземной части *C. esculentum* и *C. serratuloides* сопоставимо и превышает их содержание в надземной части *A. igniaria*. Показано, что *A. igniaria* отличается от представителей рода *Cirsium* по составу и содержанию фенольных соединений.

Ключевые слова: *Cirsium serratuloides*, *Cirsium esculentum*, *Ancathia igniaria*, флавоноиды, кумарины, фе-нолкарбоновые кислоты, спектрофотометрия, ВЭЖХ

DOI: 10.31857/S0033994622030062

В настоящее время в качестве лекарственного сырья широко используют растения. Значительный интерес представляют природные полифенольные соединения (флавоноиды и их гликозиды, фенол-карбоновые кислоты, кумарины, дубильные ве-щества и др.), обуславливающие биологическую активность лекарственного сырья. Их состав и количественное содержание определяет ареал рас-тения и, согласно теории хемотаксономии, может иметь общие черты у растений одного рода [1]. Флавоноиды широко известны благодаря своей антиоксидантной активности. В соответствии с общепринятой точкой зрения, антиоксидантные свойства флавоноидов основаны на их способно-сти служить ловушками для свободных радика-

лов, а также хелатировать ионы металлов, участ-вующих в перекисном окислении [2, 3]. Феноль-ные соединения способны взаимодействовать с гидроксильными и пероксильными радикалами липидов (алкоксилами) благодаря их способно-сти отдавать электрон (или атом) водорода. В ре-зультате образуются радикалы фенолов — фе-ноксилы, которые не участвуют в распростра-нении окислительного процесса. Это связано с уникальной структурой их молекул, в которой происходит делокализация неспаренного элек-трона, что приводит к стабилизации свободных радикалов.

Во всем мире активно исследуют действие бо-гатых флавоноидами растительных экстрактов и

отдельных флавоноидов. На основе флавоноидов возможно создание новых высокоактивных лекарственных препаратов, обладающих противовоспалительной, противовирусной, антиканцерогенной, антипаразитарной или бактерицидной активностью [3]. Благодаря способности флавоноидов подавлять работу механизмов множественной лекарственной устойчивости, ученые создают и испытывают новые антибиотики, а также агенты, способствующие усилению действия других лекарств [3]. В связи с перспективами использования флавоноидов в медицине, в настоящее время наблюдается значительный рост интереса к изучению флавоноидов, за последние три десятилетия число исследований в этой области составляет от 8000 до 10000 публикаций в год (по данным PubMed) [4].

Растения рода *Cirsium* нашли широкое применение в традиционной медицине в качестве лекарственного сырья, обладающего антибактериальной, ноотропной, противовоспалительной и рядом других активностей, кроме того, виды активно используют в народной медицине в качестве противоязвенных, противовоспалительных, ранозаживляющих и др. средств [5]. Для растений вида бодяк съедобный *C. esculentum* (Siev.) С.А. Мей. указано наличие противовоспалительных и ранозаживляющих свойств, возможность стимуляции эритропоэза [5]. Растения вида *C. vulgare* (Savi) Тен. проявляют большой спектр биологических свойств (обезболивающее, противовоспалительное, спазмолитическое и т.д.) и их активно используют в народной медицине.

Согласно базе данных The Plant List, род *Cirsium* представлен 481 видом, 14 из которых произрастает на территории Сибири [6, 7]. Анализ литературных данных показал, что сибирские представители рода изучены фрагментарно, имеются данные о содержании флавоноидов только в 7 видах, для представителей рода *Cirsium* в целом характерно наличие лютеолина, апигенина, рутина, кверцетина, гиперозида, линарина (табл. 1). Также для видов рода характерно присутствие ряда кислот — хлорогеновой, галловой и кофейной.

Данные по содержанию фенольных соединений видами рода *Cirsium* носят единичный характер, польскими учеными установлено содержание для *C. arvense* — 3.10% и *C. vulgare* — 2.1% [8, 9]. Данных по содержанию кумаринов в изучаемых растениях в литературе не обнаружено.

Вид анкафия огненная *A. igniaria* (Spreng.) DC. [6] ранее принадлежал к роду *Cirsium*, сейчас этот вид вынесен в отдельный род, представленный единственным видом. Компонентный состав растений *A. igniaria* практически не изучен. Имеются литературные данные о наличии у вида только стероидов и тритерпеновых гликозидов [5, 10]. В единственном исследовании найдены данные

по содержанию фенольных соединений в *A. igniaria* — 0.17 мг/г экстракта (в пересчете на рутин) [11]. Компонентный состав *C. esculentum* мало изучен, фенольные соединения бодяка серпуховидного *C. serratuloides* (L.) Hill и *A. igniaria* изучены впервые. Интерес представляло сравнение состава и содержания фенольных соединений *A. igniaria*, *C. serratuloides* и *C. esculentum*.

Цель данной работы — определение состава полифенольных соединений в растениях видов *C. esculentum*, *C. serratuloides*, *A. igniaria*, сравнение компонентного состава данных видов, анализ правомерности выделения *A. igniaria* в монотипный род.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалами для исследования послужили растения видов *Cirsium esculentum* (Хакасия, Ширинский р-н, с. Соленозерное, сырой луг по берегу озера); *Cirsium serratuloides* (Шебалинский р-н, нижнее течение р. Сорлык, остепненный луг); *A. igniaria* (Республика Алтай, Кош-Агачский р-н, окр. с. Чеган-Узун, каменистый южный склон, опустыненная степь) (рис. 1). Исследуемые виды собраны в фазу плодоношения, в связи с тем, что данная фаза развития выпала на время сбора растительного сырья из природных популяций (середина и конец июля). На фазу сбора растения повлияло раннее начало весны. Для анализа собирали надземную часть 15–20 образцов каждого вида. Образцы растений высушивали в затененных местах во время экспедиции до воздушно-сухого состояния. Измельчение сухого сырья проводили с помощью универсальной роторной ножевой лабораторной мельницы ЛМ 201 с размольной камерой, охлаждаемой водой (ООО “Плаун”, Россия). Размер частиц размолотого образца составлял не более 1 мм.

Выделение флавоноидов. Для выделения флавоноидов использовали трехкратную экстракцию 70% этиловым спиртом воздушно-сухого сырья в течение 30 мин на водяной бане при $T = 50–60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные экстракты объединяли, трехкратно промывали гексаном для удаления липофильных веществ и далее определяли оптическую плотность.

Выделение свободных агликонов. Для выделения суммарного содержания свободных агликонов полученные экстракты после определения суммарного содержания флавоноидов упаривали до сухого остатка на ротационном испарителе IKA RV 10 (Германия). Сухой остаток экстрагировали диэтиловым эфиром, раствор количественно переносили в колбу с притертой пробкой (50 мл) и доводили до метки эфиром, после чего определяли оптическую плотность.

Таблица 1. Фенольные соединения сибирских видов рода *Cirsium*
Table 1. Phenolic compounds of Siberian species of the genus *Cirsium*

№	Вид Species	Фенольные соединения Phenolic compounds	Источник References
1	<i>C. canum</i>	Кофейная, хлорогеновая, кумаровая, протокатехиновая, <i>n</i> -гидроксibenзойная, ванилиновая, <i>транс</i> -коричная кислоты, лютеолин, лютеолин-7-глюкозид, апигенин, апигенин-7-глюкозид, кемпферол, кемпферол-3-глюкозид, линарин, рутозид; Caffeic, chlorogenic, <i>p</i> -coumaric, protocatechic, <i>p</i> -hydroxybenzoic, vanillic, <i>trans</i> -cinnamic acids, luteolin, luteolin-7-glucoside, apigenin, apigenin-7-glucoside, kaempferol, kaempferol-3-glucoside, linarin, rutoside	12, 13
2	<i>C. esculentum</i>	Хлорогеновая кислота, рутин, линарин, пектолинарин, апигенин, цирсимаритрин, кемпферол, линарин, лютеолин, пектолинарин, кверцетин; Chlorogenic acid, rutin, linarin, pectolinarin, apigenin, cirsimaritrin, kaempferol, linarin, luteolin, pectolinarin, quercetin	5, 14
3	<i>C. heterophyllum</i>	7- <i>O</i> -β- <i>D</i> -глюкуронопиранозид, 4'- <i>O</i> -глюкозид лютеолина; 7- <i>O</i> -β- <i>D</i> -glucuronopyranoside, 4'- <i>O</i> -luteolin glucoside	5
4	<i>C. palustre</i>	Эриодиктиол 7- <i>O</i> -глюкозид, 6-гидроксилитеолин 7- <i>O</i> -глюкозид, лютеолин 7- <i>O</i> -глюкозид, нарингенин 7- <i>O</i> -β-глюкозид, 7- <i>O</i> -β- <i>D</i> -глюкуронопиранозид лютеолина, лютеолин, лютеолин 7- <i>O</i> -β-глюкозид, апигенин 7- <i>O</i> -β-глюкозид, 6-гидроксилитеолин 7- <i>O</i> -β-глюкозид, скутеллярин 7- <i>O</i> -β-глюкозид, сорбифолин, педалитин, изокемпферид, трицин, лютеолин, 7- <i>O</i> -(6"-метилглюкуронид), 7- <i>O</i> -глюкозид и 7- <i>O</i> -глюкуронид апигенина, 7- <i>O</i> -глюкозид кемпфериды, 7- <i>O</i> -глюкозид гиспидулина, 3- <i>O</i> -глюкозид кемпферола, галловая, протокатеховая, хлорогеновая, <i>n</i> -гидроксibenзойная кислоты; Eriodictyol 7- <i>O</i> -glucoside, 6-hydroxyluteolin 7- <i>O</i> -glucoside, luteolin 7- <i>O</i> -glucoside, naringenin 7- <i>O</i> -β-glucoside, 7- <i>O</i> -β- <i>D</i> -glucuronopyranoside luteolin, luteolin, luteolin 7- <i>O</i> -β-glucoside, apigenin 7- <i>O</i> -β-glucoside, 6-hydroxyluteolin 7- <i>O</i> -β-glucoside, scutellarin 7- <i>O</i> -β-glucoside, sorbifolin, pedalitin, isokempferide, triclin, luteolin, 7- <i>O</i> -(6"-methylglucuronide), 7- <i>O</i> -glucoside and 7- <i>O</i> -glucuronide apigenin, 7- <i>O</i> -glucoside kempferide, 7- <i>O</i> -glucoside hispidulin, 3- <i>O</i> -glucoside kaempferol, gallic, protocatechuic, chlorogenic, <i>p</i> -hydroxybenzoic acids	5, 15–18
5	<i>C. pendulum</i>	5- <i>O</i> -глюкозид лютеолина, 7- <i>O</i> -глюкозид лютеолина, 7- <i>O</i> -нооспеперидозид лютеолина, лютеолин, пектолинарин, апигенин, хлорогеновая кислота, метилхлорогенат, цирсимарин, линарин; 5- <i>O</i> -luteolin glucoside, 7- <i>O</i> -luteolin glucoside, 7- <i>O</i> -noospeperidoside luteolin, luteolin, pectolinarin, apigenin, chlorogenic acid, methylchlorogenate, cirsimarlin, linarin	19

Таблица 1. Окончание / Table 1. Ending

№	Вид Species	Фенольные соединения Phenolic compounds	Источник References
6	<i>C. setosum</i>	Линарин, рутин, гиперин, акацетин, акациин, астрагалин, диосметин, хиспидулин, апигенин, нарингенин, хесперидин, лютеолин, кверцетин, рамнозид, мирицетин, кемпферол, сиригин, изокемпферид, трицинпротокатехиновая, кофейная, хлорогеновая, кумаровая кислоты, 4',5,6-тригидрокси-7-метоксифлавоны, 4',5-дигидрокси-7,8-диметоксифлавоны, сорбифолин-6-<i>O</i>-β-глюкопиранозид, каемпферол-7-<i>O</i>-α-<i>L</i>-рамнозид, кверцетин-3-<i>O</i>-β-<i>D</i>-глюкозил-7-<i>O</i>-α-<i>L</i>-мирицетин-3-<i>O</i>-β-<i>D</i>-глюкозид, 5,7-дигидрокси-3',4'-диметоксифлавоны, 3',4',5-тригидрокси-3,7-диметоксифлавоны, 3',3,4',5-тетрагидрокси-7-метоксифлавоны, 3'-гидрокси-4',5,7-триметоксифлавоны, 7-гидрокси-3',4',5-триметоксифлавоны, 4',5-дигидрокси-2',3',7,8-тетраметоксифлавоны, 5-гидрокси-2',3',7,8-тетраметоксифлавоны; Linarin, rutin, hyperin, acacetin, acacin, astragaline, diosmetin, hispidulin, apigenin, naringenin, hesperidin, luteolin, quercetin, rhamnoside, myricetin, kaempferol, syringin, isokempferide, triclinprotocatechic, caffeic, chlorogenic, coumaric acids, 4',5,6-trihydroxy-7-methoxyflavone, 4',5-dihydroxy-7,8-dimethoxyflavone, sorbifolin-6-<i>O</i>-β-glucopyranoside, kaempferol-7-<i>O</i>-α-<i>L</i>-rhamnoside, quercetin-3-<i>O</i>-β-<i>D</i>-glucosyl-7-<i>O</i>-α-<i>L</i>-myricetin-3-<i>O</i>-β-<i>D</i>-glucoside, 5,7-dihydroxy-3',4'-dimethoxyflavone, 3',4',5-trihydroxy-3,7-dimethoxyflavone, 3',3,4',5-tetrahydroxy-7-methoxyflavone, 3'-hydroxy-4',5,7-trimethoxyflavone, 7-hydroxy-3',4',5-trimethoxyflavone, 4',5-dihydroxy-2',3',7,8-tetramethoxyflavone, 5-hydroxy-2',3',7,8-tetramethoxyflavone	5, 20–22
7	<i>C. vulgare</i>	Лютеолин, лютеолин-7-гликозид, лютеолин-7-<i>O</i>-глюкозид, лютеолин-7-<i>O</i>-β-<i>D</i>-глюкопиранозид, лютеолин-5-<i>O</i>-β-<i>D</i>-глюкопиранозид, рутин, кверцетин, кверцетин-3-<i>O</i>-глюкозид, линарин, апигенин, апигенин-7-<i>O</i>-β-<i>D</i>-глюкопиранозид, апигенин-7-<i>O</i>-глюкозид, апигенин-7-<i>O</i>-глюкоронид, апигенин-7-<i>O</i>-метилглюкоронид, кемпферол-3-<i>O</i>-галактозид, кемпферол-3-<i>O</i>-рамнозид, кемпферол-3-<i>O</i>-метилэфир, кемпферол-3-<i>O</i>-β-<i>D</i>-глюкопиранозид, гиперозид, гиспидулин-7-<i>O</i>-β-<i>D</i>-глюкопиранозид, линарин, хлорогеновая, неохлорогеновая, <i>p</i>-кумаровая, кофейная, <i>p</i>-оксибензойная, ванилиновая, сиреневая, протокатеховая кислоты; Luteolin, luteolin-7-glycoside, luteolin-7-<i>O</i>-glucoside, luteolin-7-<i>O</i>-β-<i>D</i>-glucopyranoside, luteolin-5-<i>O</i>-β-<i>D</i>-glucopyranoside, rutin, quercetin, quercetin-3-<i>O</i>-glucoside, linarin, apigenin, apigenin-7-<i>O</i>-β-<i>D</i>-glucopyranoside, apigenin-7-<i>O</i>-glucoside, apigenin-7-<i>O</i>-glucuronide, apigenin-7-<i>O</i>-methylglucuronide, kaempferol-3-<i>O</i>-galactoside, kaempferol-3-<i>O</i>-rhamnoside, kaempferol-3-<i>O</i>-methyl ether, kaempferol-3-<i>O</i>-β-<i>D</i>-glucopyranoside, hyperoside, hispidulin-7-<i>O</i>-β-<i>D</i>-glucopyranoside, linarin, chlorogenic, neochlorogenic, <i>p</i>-coumaric, caffeic, <i>p</i>-hydroxybenzoic, vanillic, lilac, protocatechic acids	5, 8, 9, 23

*Cirsium esculentum**Cirsium serratuloides**Ancathia igniaria*

Рис. 1. Объекты исследования (фото А.Л. Эбеля).
 Fig. 1. Studied objects (photo by A.L. Ebel).

Гидролиз гликозидов флавоноидов. Для выделения агликонов использовали методику [24], согласно которой экстракцию этанолом проводили совместно с кислотным гидролизом концентрированной соляной кислотой. Полученные экстракты упаривали до сухого остатка на ротационном испарителе IKA RV 10 (Германия). Сухой остаток экстрагировали диэтиловым эфиром, раствор количественно переносили в колбу с притертой пробкой (50 мл) и доводили до метки эфиром, после чего определяли оптическую плотность.

Количественное определение суммарного содержания флавоноидов спектрофотометрическим методом. Для количественной оценки суммарного содержания флавоноидов использовали методику [25], согласно которой определение проводят по реакции образования окрашенного комплекса с хлористым алюминием. Количественное определение флавоноидов в спиртовых экстрактах исследуемых растений проводили на спектрофотометре UV-Vis Cary 60 v.2.0 (Agilent Technologies, USA) при длине волны 414 нм в кювете с толщиной слоя 10 мм. Измерения проводили относительно стандартов: ГСО рутина (Sigma-Aldrich, содержание основного компонента более 90%) (для экстрактов без гидролиза) и ГСО кверцетина (Sigma-Aldrich, содержание основного компонента более 95%) (для экстрактов с гидролизом).

Содержание флавоноидов рассчитывали по формуле:

$$X = 100 \times \frac{DKm_s}{D_sK_sm}, \quad (1)$$

где D — оптическая плотность исследуемого раствора; K — коэффициент разбавления исследуемого раствора; m — масса сырья, г; D_s — оптическая плотность контрольного раствора; K_s — ко-

эффициент разбавления контрольного раствора; m_s — масса стандарта, г.

Количественное определение суммарного содержания кумаринов спектрофотометрическим методом. Для количественной оценки суммарного содержания кумаринов использовали методики [26, 27], согласно которым определение проводят после спиртовой экстракции воздушно-сухого сырья с добавлением концентрированной соляной кислоты. Раствор сравнения — спирт этиловый 96%. Количественное определение кумаринов в спиртовых экстрактах исследуемых растений проводили при длине волны 270 нм в кювете с толщиной слоя 10 мм. Измерения проводили относительно стандарта ГСО кумарина (Sigma Aldrich, содержание основного компонента более 90%). Содержание кумаринов (в % от массы воздушно-сухого сырья) рассчитывали по формуле (1).

Анализ полифенольных соединений методом ВЭЖХ. Для определения флавоноидного состава и содержания использовали метод ОФ ВЭЖХ. Точную навеску анализируемого растения (около 1 г) экстрагировали трехкратно 70% этиловым спиртом (соотношение сырье—экстрагент 1 : 20, время экстракции 30 минут) на водяной бане при $T = 50\text{--}60^\circ\text{C}$. Экстракты концентрировали на ротационном испарителе (IKA RV 10, Германия) при нагреве до 50°C . Анализ проводили на хроматографе Shimadzu LC-20AD (Япония) с диодно-матричным детектором SPD-M20A и колонкой Perfect Sil Target ODS-3 (250×4.6 мм, зернение 5 мкм). Элюент А: смесь ацетонитрила, изопропилового спирта (5 : 2 v/v), элюент В: 0.1% трифторуксусная кислота. Время анализа 60 мин. Скорость элюирования 1 мл/мин. Режим элюирования: градиент низкого давления; программа градиента: 0—40 мин 15—35% элюент А, 40—60 мин 35% элюент А. Объем пробы 5 мкл.

Реконструкцию хроматограмм проводили при длинах волн 272, 330, 360 нм. Обращенно-фазо-

Таблица 2. Содержание полифенолов (мас. %) в изученных видах *Cirsium serratuloides*, *C. esculentum* и *Ancathia igniaria* (% на абс. сух. сырье)**Table 2.** Content of polyphenol compounds (wt %) in *Cirsium serratuloides*, *C. esculentum* and *Ancathia igniaria* (% on dry weight basis)

Полифенолы Polyphenol compounds	<i>C. serratuloides</i>	<i>C. esculentum</i>	<i>A. igniaria</i>
Флавоноиды Flavonoids	1.6 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.23 ± 0.02
Свободные агликоны Free aglycones	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.03 ± 0.01
Флавоноиды в форме агликонов Flavonoids in the form of aglycones	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.09 ± 0.01
Кумарины Coumarins	1.4 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.2 ± 0.1

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического и стандартной ошибки ($m \pm SEM$).

Note: Data are expressed as arithmetic mean and standard error ($m \pm SEM$).

вая хроматография позволяет проводить детектирование в широком УФ-диапазоне, полученные данные показывают присутствие соединений различного класса, в пределах одного анализа. Идентификацию соединений проводили по временам удерживания и спектральным характеристикам путем сравнения с аналогичными показателями стандартных образцов. При идентификации соединений допускали различия времен удерживания компонентов экстрактов и образцов до 5%. Концентрацию веществ определяли по методу абсолютной градуировки в пересчете на рутин. В работе использованы коммерческие образцы веществ сравнения, чистота которых составляет 91–95% (Lachema, Huike Phytopharm, Geneham Pharmaceutical, Sigma Aldrich).

Статистический анализ. Исследования проводили в трех параллельных определениях, результаты количественного анализа флавоноидов и кумаринов представлены в виде среднего результата и $\pm$ стандартного отклонения, *SD*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ данных о содержании полифенолов показал, что надземная часть вида *C. serratuloides* отличается наибольшим суммарным содержанием флавоноидов (1.6%), свободных агликонов (0.1%) и суммарным содержанием флавоноидов в форме агликонов (0.8%) (табл. 2). В этанольном экстракте надземной части *A. igniaria* установлено наименьшее содержание всех исследуемых групп веществ. Интересно отметить, что два изученных вида *Cirsium* близки по содержанию свободных агликонов (0.1–0.2%) и кумаринов (1.4–1.5%). Общее содержание флаво-

ноидов в *C. serratuloides* выше, по сравнению с *C. esculentum*. Флавоноиды представлены, главным образом, в виде гликозидов. Надземная часть вида *A. igniaria* накапливала значительно меньший уровень флавоноидов (в 6 раз меньше, чем надземная часть вида *C. esculentum*, в 10 раз меньше *C. serratuloides*).

Результаты ВЭЖХ анализа представлены на рис. 2 и в табл. 2. В растениях *C. esculentum* идентифицировано 7 соединений, в растениях *C. serratuloides* – 8 соединений (рис. 2). Сходство состава надземной части родственных видов *Cirsium* представлено присутствием синрингина, 3,4-дигидроксibenзойной и хлорогеновой кислотами, этилгаллатом, а также рутином. В надземной части *C. esculentum* дополнительно к соединениям, обнаруженным в работе [14], найдены 3 соединения: 3,4-дигидроксibenзойная кислота, салипурпозид, гиперозид. В надземной части *C. esculentum* впервые обнаружены синрингин, 4-дигидроксibenзойная кислота, этилгаллат и салипурпозид, а также идентифицированы уже ранее найденные в других работах рутин и хлорогеновая кислота [5].

Компонентный анализ надземной части *A. igniaria* выявил 6 соединений фенольной природы, из которых три компонента общие с надземной частью видов *Cirsium*: синрингин, хлорогеновая кислота и этилгаллат (рис. 2). Следует отметить, что большее отличие выявлено в составе флавоноидов. В надземной части вида *C. esculentum* обнаружен рутин, салипурпозид, гиперозид, в надземной части *C. serratuloides* – рутин, цинарозид, кверцетин-3-*O*- β -*D*-диглюкозид-*O*- α -*L*-рамнозид, кверцетин, тогда как в *A. igniaria* цинарозид, хризин-7-*O*-глюкозид, эриодиктиол. Изучение

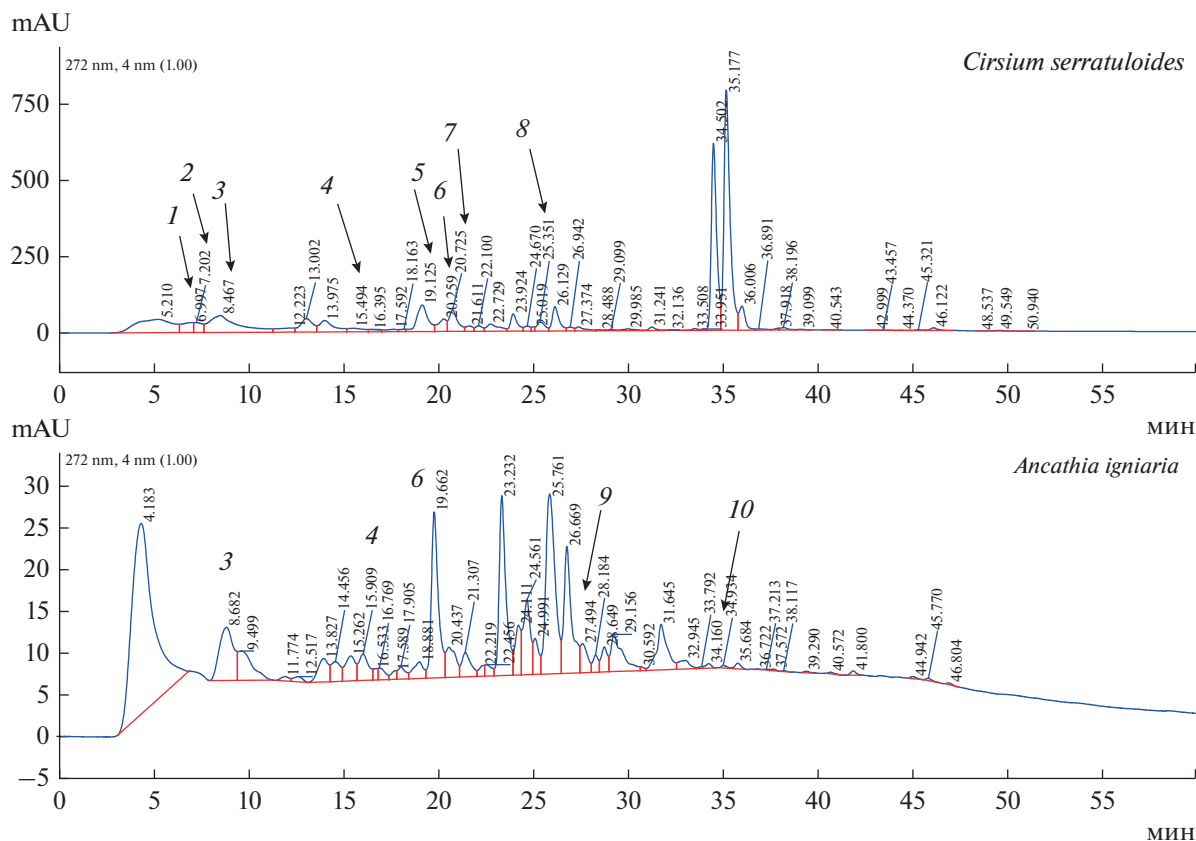


Рис. 2. Хроматограммы водно-этанольных экстрактов изученных видов *Cirsium serratuloides* и *Ancathia igniaria*.

1 – синингин, 2 – 3,4-дигидроксibenзойная кислота, 3 – хлорогеновая кислота, 4 – этилгаллат, 5 – рутин, 6 – цинарозид, 7 – кверцетин-3-*O*-β-*D*-диглюкозид-*O*-α-*L*-рамнозид, 8 – кверцетин, 9 – хризин-7-*O*-глюкозид, 10 – эриодиктиол.

Fig. 2. Chromatograms of aqueous ethanol extracts of *Cirsium serratuloides* and *Ancathia igniaria*.

1 – syringin, 2 – 3,4-dihydroxybenzoic acid, 3 – chlorogenic acid, 4 – ethyl gallate, 5 – rutin, 6 – cynaroside, 7 – quercetin-3-*O*-β-*D*-diglucoside-*O*-α-*L*-rhamnoside, 8 – quercetin, 9 – chrysin 7-*O*-glucoside, 10 – eriodictyol.

содержания индивидуальных компонентов показало, обнаруженные соединения характеризуются как минорные (0.01–0.04%), наибольшим содержанием – хлорогеновая кислота (0.2–0.4%) (табл. 3).

Содержание флавоноидов и кумаринов в надземной части *A. igniaria* (0.2, 1.2% соответственно) одно из наименьших, среди всех изученных в данном исследовании видов (табл. 2). Возможно, различия в компонентном составе фенольных соединений в надземной части растений подтверждают правомерность выделения *Ancathia igniaria* в отдельный род. Данное предположение нуждается в проведении дальнейших исследований компонентного состава надземной части вида *Ancathia igniaria* и видов рода *Cirsium*. Помимо этого, в работе, в связи с отсутствием стандартов, не удалось идентифицировать ряд мажорных компонентов, обнаруженных в этанольных экстрактах надземной части исследуемых видов, однако на основе спектров поглощения, установлена их

принадлежность группе флавоноидов (полосы поглощения 255 и 330, 270 и 332 нм).

Таким образом, изучен состав фенольных соединений надземной части растений *C. esculentum*, *C. serratuloides* и *A. igniaria*. Изучаемые растения близки по составу простых фенолов, но имеют различный набор флавоноидов и содержание кумаринов. В надземной части *C. serratuloides* отмечен более богатый состав и содержание флавоноидов по сравнению с другими изученными видами. Компонентный состав флавоноидов надземной части *A. igniaria* в основном отличается от надземной части видов рода *Cirsium*.

ВЫВОДЫ

1. Спектрофотометрическим методом установлено суммарное содержание кумаринов, флавоноидов, свободных агликонов и флавоноидов в форме агликонов в надземной части растений *Cirsium esculentum*, *Cirsium serratuloides* и *A. igniaria*.

Таблица 3. Содержание фенольных соединений в изученных видах *Cirsium serratuloides*, *C. esculentum* и *Ancathia igniaria* (% на абс. сух. сырье, средние арифметические значения)**Table 3.** Content of phenolic compounds in *Cirsium serratuloides*, *C. esculentum* and *Ancathia igniaria* (% on dry weight basis, arithmetic mean values)

№	Соединение Compounds	<i>A. igniaria</i>	<i>C. esculentum</i>	<i>C. serratuloides</i>
1	Сирингин Syringin	0.03	0.1	0.1
2	3,4-дигидроксibenзойная кислота 3,4-dihydroxybenzoic acid	—	0.003	0.1
3	Хлорогеновая кислота Chlorogenic acid	0.2	0.4	0.4
4	Этилгаллат Ethyl gallate	0.03	0.04	0.04
5	Рутин Rutin	—	0.1	0.2
6	Цинарозид Cynaroside	0.1	—	0.1
7	Кверцетин-3- <i>O</i> -β- <i>D</i> -диглюкозид- <i>O</i> -α- <i>L</i> -рамнозид Quercetin-3- <i>O</i> -β- <i>D</i> -diglucoside- <i>O</i> -α- <i>L</i> -rhamnoside	—	—	0.1
8	Кверцетин Quercetin	—	—	0.1
9	Хризин 7- <i>O</i> -глюкозид Chrysin 7- <i>O</i> -glucoside	0.04	—	—
10	Эриодиктиол Eriodictyol	0.002	—	—
11	Салипурпозид Salipurposide	—	0.02	—
12	Гиперозид Hyperoside	—	0.03	—

Фенольный профиль надземной части *C. serratuloides* и *A. igniaria* изучен впервые.

2. Методом ВЭЖХ идентифицировано 12 (общих и видоспецифичных) фенольных соединений: в растениях *C. serratuloides* — 8, *C. esculentum* — 7, и в *A. igniaria* — 6.

3. Различия в компонентном составе и содержании флавоноидов и кумаринов изученных ви-

дов позволяют предположить правомерность выделения *Ancathia igniaria* в отдельный род *Ancathia*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2020-0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин В.А. 2007. Фармакогнозия: учебник для студентов фармацевтических вузов (факультетов.). Самара. 1239 с.
2. Племенков В.В. 2001. Введение в химию природных соединений. Казань. 376 с.
3. Тараховский Ю.С., Ким Ю.А., Абдрашилов Б.С., Музафаров Е.Н. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина. 2013. Пушчино. 310 с.
4. National Center for Biotechnology Information. <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>
5. Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. 2013. Т. 5. Семейство Asteraceae (Compositae). СПб.; М. 312 с.
6. The Plant List 2013. <http://www.theplantlist.org>

7. *Флора Сибири*. 1997. Т. 13. Asteraceae (Compositae). Новосибирск. 472 с.
8. Попова Я.В., Мазулин А.В. 2015. Спектрофотометрическое определение содержания флавоноидов в траве *Cirsium vulgare* (Savi) Ten. и *Cirsium arvense* (L.) Scop. — Молодой ученый. 5: 48–50. <http://moloduycheny.in.ua/files/journal/2015/5/135.pdf> (на украинском)
9. Попова Я.В., Мазулин А.В., Мазулин Г.В., Опрошанская Т.В. 2016. Фитохимическое изучение полифенольных соединений травы *Cirsium vulgare* (Savi) Ten. флоры Украины. — Актуальные вопросы фармацевтической и медицинской науки и практики. 1(20): 52–56. (на украинском) <https://doi.org/10.14739/2409-2932.2016.1.62052>
10. Adekenov S.M., Abdykalykov M.A., Turmukhambetov A.Zh., Kadirberlina G.M. 1987. Sitosterol and triterpenoids from *Ancathia igniaria*. — Chem. Nat. Compd. 23(5): 642. <https://doi.org/10.1007/BF00598704>
11. Куатбаев О.У. 2015. Изучение антиоксидантного действия экстрактов растений рода *Silene* L. *in vitro*. — Вестник карагандинского государственного индустриального университета. 1(8): 90–94. <https://drive.google.com/file/d/1Rlm4gObgRnCDMlyRffixLWAHD2udxZu9/view>
12. Kozyra M., Biernasiuk A., Malm A., Chowanec M. 2015. Chemical compositions and antibacterial activity of extracts obtained from the inflorescences of *Cirsium canum* (L.) All. — Nat. Prod. Res. 29(21): 2059–2063. <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1030341>
13. Hawrył A., Ziobro A., Świeboda R., Hawrył M., Waksmundzka-Hajnos M. 2016. TLC Profiles of Selected *Cirsium* Species with Chemometrics in Construction of Their Fingerprints. — J. Chromatogr. Sci. 54(7): 1096–1104. <https://doi.org/10.1093/chromsci/bmw064>
14. Kasterova E., Zibareva L., Revushkin A. 2019. Secondary metabolites of some Siberian species of plants tribe *Cynareae* (Asteraceae). — S. Afr. J. Bot. 125: 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.06.022>
15. Nazaruk J., Czechowska S., Markiewicz R., Borawska M. 2008. Polyphenolic compounds and *in vitro* antimicrobial and antioxidant activity of aqueous extracts from leaves of some *Cirsium* species. — Nat. Prod. Res. 22(18): 1583–1588. <https://doi.org/10.1080/14786410701825053>
16. Nazaruk J., Galicka A. 2014. The influence of selected flavonoids from the leaves of *Cirsium palustre* (L.) Scop. on collagen expression in human skin fibroblasts. — Phytother. Res. 28(9): 1399–1405. <https://doi.org/10.1002/ptr.5143>
17. Malejko J., Nalewajko-Sieliwoniuk E., Nazaruk J., Siniłło J., Kojło A. 2014. Determination of the total polyphenolic content in *Cirsium palustre* (L.) leaves extracts with manganese (IV) chemiluminescence detection. — Food Chem. 152: 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.138>
18. Nalewajko-Sieliwoniuk E., Malejko J., Mozolewska M., Wołyniec E., Nazaruk J. 2015. Determination of polyphenolic compounds in *Cirsium palustre* (L.) extracts by high performance liquid chromatography with chemiluminescence detection. — Talanta. 133: 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.05.062>
19. Thao N.T., Cuong T., Hung T., Lee J., Na M., Son J., Jung H., Fang Z., Woo M., Choi J., Min B. 2011. Simultaneous determination of bioactive flavonoids in some selected Korean thistles by high-performance liquid chromatography. — Arch. Pharm. Res. 34(3): 455–461. <https://doi.org/10.1007/s12272-011-0314-x>
20. Loizzo M.R., Statti G., Tundis R., Conforti F., Ando' S., Menichini F. 2004. Antimicrobial activity and cytotoxicity of *Cirsium tenoreanum*. — Fitoterapia. 75(6): 577–580. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2004.03.011>
21. Sun Q., Chang L., Ren Y., Cao L., Sun Y., Du Y., Shi X., Wang Q., Zhang L. 2012. Simultaneous analysis of 11 main active components in *Cirsium setosum* based on HPLC-ESI-MS/MS and combined with statistical methods. — J. Sep. Sci. 35(21): 2897–2907. <https://doi.org/10.1002/jssc.201200359>
22. Ma Q.G., Wen R., Liu W., Sang Z., Zhang S., Wang Q., Feng Z., Li L., Li Y. 2016. Studies on flavonoids from *Cirsium setosum*. — China J. Chinese Materia Medica. 5: 868–873. https://caod.oriprobe.com/articles/48167706/Studies_on_flavonoids_from_Cirsium_setosum.htm
23. Nalewajko-Sieliwoniuk E., Malejko J., Twarowska P., Timoszek M., Nazaruk J. 2017. Postcolumn determination of polyphenolic antioxidants in *Cirsium vulgare* (Savi) Ten. extracts. — J. Sep. Sci. 40(19): 3830–3838. <https://doi.org/10.1002/jssc.201700496>
24. Ломбоева С.С., Танхаева Л.М., Оленников Д.Н. 2008. Методика количественного определения суммарного содержания флавоноидов в надземной части ортилии однобокой (*Orthilia secunda* (L.) House). — Химия растительного сырья. 2: 65–68. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11530999>
25. Кравицова С.С., Бочкарева О.В., Хасанов В.В. 2014. Оценка содержания углеводов, флавоноидов и антиоксидантной активности мыла с растительными добавками. — Химия растительного сырья. 2: 249–253. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22266412>

26. Овчинникова С.Я., Губанова Л.Б., Орловская Т.В. 2014. Количественное определение кумаринов в корневищах и корнях любистка лекарственного. — Современные проблемы науки и образования. 1: 7 с.
<https://science-education.ru/pdf/2014/1/45.pdf>
27. Федосеева Л.М., Харлампович Т.А. 2012. Разработка методики количественного определения суммы кумаринов в донника лекарственного траве (*Melilotus officinalis* L.). — Химия растительного сырья. 3: 135–141.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=18807228>

Comparative Study of the Polyphenolic Compounds Content in the Aerial Parts of *Cirsium esculentum*, *C. serratuloides*, and *Ancathia igniaria* (Asteraceae)

E. A. Kasterova^{a,*}, E. S. Prokopyeva^a, A. E. Mudrikova^a, S. S. Kravtsova^a

^a National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

*e-mail: evgenia.kasterova@yandex.ru

Abstract—As, based on phylogenetic data, *Ancathia igniaria* (Spreng.) DC. (*Cirsium igniarium* Spreng.) was segregated as monotypic genus from the genus *Cirsium*, it was of interest to identify chemotaxonomic differences in the polyphenolic component composition of the plants' aerial parts. Since phenolic compounds have chemotaxonomic significance in a number of genera and families, a comparative analysis of the polyphenolic profiles of *Cirsium esculentum* (Siev.) C.A. Mey., *Cirsium serratuloides* (L.) Hill and *A. igniaria* aerial parts was carried out, for the last two species — for the first time. The compounds were identified using high-performance liquid chromatography (HPLC) by comparison with known standards. A comparative analysis of the species' aerial parts phenolic profiles showed that genus *Cirsium* species have similar composition of simple phenols, but differ in the set of flavonoids. It was found that the studied species contain 6–8 compounds of a phenolic character, of which three simple polyphenols are common: syringin, chlorogenic acid and ethyl gallate. The flavonoid profiles of the aerial parts of both *Cirsium* species include rutin, and species-specific cymaroside and quercetin-3-*O*- β -*D*-diglucoside-*O*- α -*L*-rhamnoside for *C. serratuloides*, and salipurposide and hyperoside — for *C. esculentum*. In the aerial parts extract of *A. igniaria*, cinaroside, as in *C. serratuloides*, chrysin 7-*O*-glucoside and eriodictyol were detected. And even greater difference in flavonoid composition is observed between genera *Cirsium* and *Ancathia*. Data on phenolic compounds composition are important both for using plants as medicinal raw materials, and for chemosystematics. The total content of coumarins, aglycones and flavonoid glycosides in the studied species was determined by the spectrophotometric method. The content of flavonoids and coumarins in *C. esculentum* and *C. serratuloides* is comparable and exceeds their content in *A. igniaria*. Thus, it is shown that *Ancathia igniaria* differs from the genus *Cirsium* in the quantitative and qualitative composition of phenolic compounds.

Keywords: *Cirsium serratuloides*, *Cirsium esculentum*, *Ancathia igniaria*, flavonoids, coumarins, phenolcarboxylic acids, spectrophotometry, HPLC

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed within the framework of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0721-2020-0019).

REFERENCES

1. Kurkin V.A. 2007. [Pharmacognosy: a textbook for students of pharmaceutical universities (faculties)]. Samara. 1239 p. (In Russian)
2. Plemenkov V.V. 2001. [Introduction to the chemistry of natural compounds]. Kazan. 376 p. (In Russian)
3. Tarakhovsky Yu.S., Kim Yu.A., Abdrazylov B.S., Muzafarov Ye.N. [Flavonoids: biochemistry, biophysics, medicine]. 2013. Pushchino. 310 p. (In Russian)
4. National Center for Biotechnology Information. <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>.
5. [Plant Resources of Russia: Wild flowering plants and their component composition and biological activity. Family Asteraceae (Compositae)]. 2013. V. 5. St. Petersburg; Moscow. 312 p. (In Russian)
6. The Plant List 2013. <http://www.theplantlist.org>
7. [Flora of Siberia. Asteraceae (Compositae)]. 1997. V. 13. Novosibirsk. 472 p. (In Russian)
8. Popova Ya.V., Mazulin A.V. 2015. Spectrophotometric determination of flavonoid content in the herbs of *Cirsium vulgare* (Savi) Ten. and *Cirsium arvense* (L.) Scop. — Young scientist. 5: 48–50.
<http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2015/5/135.pdf> (In Ukrainian)

9. Popova Ya.V. 2016. Phytochemical study of polyphenolic compounds of the herb *Cirsium vulgare* (Savi) Ten. flora of Ukraine. — Current issues in pharmacy and medicine: science and practice. 1(20): 52–56.
<https://doi.org/10.14739/2409-2932.2016.1.62052> (In Ukrainian)
10. Adekenov S.M., Abdykalykov M.A., Turmukhambetov A.Zh., Kadirberlina G.M. 1987. Sitosterol and triterpenoids from *Ancathia igniaria*. — Chem. Nat. Compd. 23(5): 642.
<https://doi.org/10.1007/BF00598704>
11. Kuatbaev O.U. 2015. [Study of the antioxidant effect of extracts from plants of the genus *Silene* L. *in vitro*]. — Bulletin of Karaganda State Industrial University. 1(8): 90–93.
<https://drive.google.com/file/d/1Rlm4gObgRnCDMlyRffixLWAHD2udxZu9/view> (In Russian)
12. Kozyra M., Biernasiuk A., Malm A., Chowanec M. 2015. Chemical compositions and antibacterial activity of extracts obtained from the inflorescences of *Cirsium canum* (L.) All. — Nat. Prod. Res. 29(21): 2059–2063.
<https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1030341>
13. Hawrył A., Ziobro A., Świeboda R., Hawrył M., Waksmundzka-Hajnos M. 2016. TLC Profiles of Selected *Cirsium* Species with Chemometrics in Construction of Their Fingerprints. — J. Chromatogr. Sci. 54(7): 1096–1104.
<https://doi.org/10.1093/chromsci/bmw064>
14. Kasterova E., Zibareva L., Revushkin A. 2019. Secondary metabolites of some Siberian species of plants tribe *Cynareae* (Asteraceae). — S. Afr. J. Bot. 125: 24–29.
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.06.022>
15. Nazaruk J., Czechowska S., Markiewicz R., Borawska M. 2008. Polyphenolic compounds and *in vitro* antimicrobial and antioxidant activity of aqueous extracts from leaves of some *Cirsium* species. — Nat. Prod. Res. 22(18): 1583–1588.
<https://doi.org/10.1080/14786410701825053>
16. Nazaruk J., Galicka A. 2014. The influence of selected flavonoids from the leaves of *Cirsium palustre* (L.) Scop. on collagen expression in human skin fibroblasts. — Phytother. Res. 28(9): 1399–1405.
<https://doi.org/10.1002/ptr.5143>
17. Malejko J., Nalewajko-Sieliwoniuk E., Nazaruk J., Siniłło J., Kojło A. 2014. Determination of the total polyphenolic content in *Cirsium palustre* (L.) leaves extracts with manganese (IV) chemiluminescence detection. — Food Chem. 152: 155–161.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.138>
18. Nalewajko-Sieliwoniuk E., Malejko J., Mozolewska M., Wołyniec E., Nazaruk J. 2015. Determination of polyphenolic compounds in *Cirsium palustre* (L.) extracts by high performance liquid chromatography with chemiluminescence detection. — Talanta. 133: 38–44.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.05.062>
19. Thao N.T., Cuong T., Hung T., Lee J., Na M., Son J., Jung H., Fang Z., Woo M., Choi J., Min B. 2011. Simultaneous determination of bioactive flavonoids in some selected Korean thistles by high-performance liquid chromatography. — Arch. Pharm. Res. 34(3): 455–461.
<https://doi.org/10.1007/s12272-011-0314-x>
20. Loizzo M.R., Statti G., Tundis R., Conforti F., Ando' S., Menichini F. 2004. Antimicrobial activity and cytotoxicity of *Cirsium tenoreanum*. — Fitoterapia. 75(6): 577–580.
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2004.03.011>
21. Sun Q., Chang L., Ren Y., Cao L., Sun Y., Du Y., Shi X., Wang Q., Zhang L. 2012. Simultaneous analysis of 11 main active components in *Cirsium setosum* based on HPLC-ESI-MS/MS and combined with statistical methods. — J. Sep. Sci. 35(21): 2897–2907.
<https://doi.org/10.1002/jssc.201200359>
22. Ma Q.G., Wen R., Liu W., Sang Z., Zhang S., Wang Q., Feng Z., Li L., Li Y. 2016. Studies on flavonoids from *Cirsium setosum*. — China Journal of Chinese Materia Medica. 5: 868–873.
https://caod.oriprobe.com/articles/48167706/Studies_on_flavonoids_from_Cirsium_setosum.htm
23. Nalewajko-Sieliwoniuk E., Malejko J., Twarowska P., Timoszek M., Nazaruk J. 2017. Postcolumn determination of polyphenolic antioxidants in *Cirsium vulgare* (Savi) Ten. extracts. — J. Sep. Sci. 40(19): 3830–3838.
<https://doi.org/10.1002/jssc.201700496>
24. Lomboeva S.S., Tankhaeva L.M., Olennikov D.N. 2008. [Method for the quantitative determination of the total content of flavonoids in the aerial parts of *Orthilia secunda* (L.) House]. — Khimiya rastitel'nogo syr'ja. 2: 65–68. (In Russian)
<https://elibrary.ru/item.asp?id=11530999>
25. Kravtsova S.S., Bochkaryova O.V., Hasanov V.V. 2014. Estimation of carbohydrate and flavonoid content and antioxidant activity in herbs and in soap with herbal addition. — Khimiya rastitel'nogo syr'ja. 2: 249–253.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=22266412> (In Russian)
26. Ovchinnikova S.Ya., Gubanova L.B., Orlovskaya T.V. 2014. Quantitative determination coumarin in rhizomes and roots of lovage *Levisticum officinale*. — Modern problems of science and education. 1: 7 p.
<https://science-education.ru/pdf/2014/1/45.pdf> (In Russian)
27. Fedoseeva L.M., Harlampovich T.A. 2012. Development of the method for the quantitative determination of the amount of coumarin in *Melilotus officinalis* L. — Khimiya rastitel'nogo syr'ja. 3: 135–141.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=18807228> (In Russian)

**АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ**

**СОСТОЯНИЕ АГРОПОПУЛЯЦИЙ *ELYTRIGIA REPENS* (POACEAE)
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТВАЛАХ НА ТЕРРИТОРИИ
КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**© 2022 г. Н. В. Шеремет¹ *, Т. Г. Ламанова¹¹Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: nsheremet@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.07.2021 г.

После доработки 05.10.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2022 г.

В статье приводятся результаты исследования агропопуляций длиннокорневищного многолетника *Elytrigia repens* (L.) Nevski s.l. (Poaceae) на спланированных вскрышных отвалах Кузнецкого угольного бассейна (Кемеровская область). На основании многолетних наблюдений (1990–2014 гг.) установлены проективное покрытие, плотность, морфометрические параметры, онтогенетическая структура и фитомасса *E. repens* в 7 искусственных травяных сообществах и 2 сообществах, сформировавшихся при естественном зарастании в условиях лесостепной зоны. Установлено, что вид в новых для себя экологических условиях относится к группе длительноживущих, продолжительность его жизни на разных типах отвалов превышает 25 лет. Среднее многолетнее значение воздушно-сухой надземной фитомассы на отвалах, сложенных четвертичными отложениями, составляет 2.3 ± 1.1 ц/га, пермскими отложениями — 0.9 ± 0.6 ц/га. Показано, что онтогенетические спектры агропопуляций *E. repens* нормальные, дефинитивные, неполноценные, левосторонние с максимумом на особях виргинильного и молодого генеративного состояний. Анализ эколого-фитоценологических стратегий показал, что вид выступает в качестве пациента или стресс-толеранта экотопического, а в оптимальные годы проявляет свойства виолента. Делается вывод о целесообразности использования *E. repens* при восстановлении земель, нарушенных при открытом способе добычи угля.

Ключевые слова: *Elytrigia repens*, агропопуляции, проективное покрытие, плотность, онтогенетическая структура, фитомасса, вскрышные отвалы, Кузнецкая котловина

DOI: 10.31857/S0033994622030116

Свыше половины объема добываемого и экспортируемого угля в России производится в Кузнецком бассейне, одном из крупнейших угольных бассейнов мира. Добыча полезных ископаемых открытым способом сопровождается уничтожением природных ландшафтов и возникновением огромных площадей нарушенных земель. В связи с этим весьма актуальны работы, связанные с нейтрализацией загрязнения окружающей среды и восстановлением биологической продуктивности техногенных ландшафтов, а также выявлением и внедрением новых перспективных видов растений для восстановления растительного покрова на нарушенных землях. Изучение искусственно созданных растительных сообществ на отвалах представляет значительный научный интерес в связи с процессами адаптации растений к новым экологическим факторам техногенного происхождения и имеет прикладное значение, связанное с рекультивацией нарушенных территорий.

Группой сотрудников Центрального сибирского ботанического сада (ЦСБС СО РАН, г. Новосибирск) была разработана и внедрена в производство методика, позволяющая создавать непосредственно на спланированной поверхности отвалов без нанесения водоупорного и плодородного слоев почвы, без внесения минеральных и органических удобрений, как это рекомендуется ГОСТом [1], высокопродуктивные и устойчивые искусственные сообщества.

Настоящая статья продолжает серию работ, посвященных изучению структурных особенностей агрофитоценозов и жизненного состояния агропопуляций на вскрышных породных отвалах в лесостепной зоне Кузнецкой котловины [2, 3]. В данной работе рассматриваются особенности агропопуляций пырея ползучего *Elytrigia repens* (L.) Nevski s.l. (Poaceae).

E. repens — многолетнее травянистое поликарпическое растение с невлагалищным типом воз-

обновления побегов, образующее длинные плагиотропные гипогеогенные корневища. Вегетативные побеги удлинённые корневищно-безрозеточные, реже полурозеточные со слабо выраженной розеточной частью. Генеративные побеги безрозеточные и корневищно-безрозеточные, озимые. Корневая система представлена придаточными корнями, формирующимися как в узлах корневища, так и у основания ортотропных надземных побегов [4]. Высота стеблей 60–170 см [5]. Ареал обычно относят к голарктическому типу, однако Н.Н. Цвелев [6] указывает на нахождение этого вида в качестве заносного или интродукта во внетропических странах южного полушария. В связи с этим ареал пырея ползучего можно считать семиглобальным.

Пырей ползучий морозоустойчив, легко переносит суровые зимы. Хорошо растет на сухих почвах и в то же время переносит длительное затопление и значительное засоление почв. Требователен к богатству почв азотом и достаточной их аэрации. В хороших условиях на рыхлых, плодородных почвах пырей размножается только корневищами. Семена образуются в сухие годы при уплотнении и иссушении почвы, при наличии затруднений развития корневищ [7]. Злостный сорняк полей и огородов, истощает почву и содействует массовому появлению ряда вредителей. В то же время это ценное, высокоурожайное кормовое растение, отлично поедаемое всеми видами скота. Злак сенокосного пользования, но удовлетворительно переносит и умеренный выпас. Интенсивный выпас, уплотняя почву, способствует его вырождению. Считается молокогонным и нажировочным кормом [8, 9]. Широко распространен в поймах рек и на умеренно влажных лугах, встречается на солонцеватых, солончаковых степных лиманах, на черноземах лесостепи и степи, а также на темно-каштановых почвах степной зоны [10]. На орошаемых лугах и залежах часто образует чистые заросли, или же является одним из доминирующих видов. На территории Южной Сибири входит в видовой состав пойменных, суходольных лугов и их галофитных вариантов.

Для восстановления растительного покрова на землях, нарушенных в результате открытого способа добычи угля в Кузбассе, пырей ползучий испытывается впервые. Особенности его развития в растительных сообществах на вскрышных отвалах в лесостепи Кузнецкой котловины ранее не изучались. Имеются многочисленные работы, демонстрирующие важность изучения особенностей развития популяций *E. repens* в процессе восстановления антропогенно нарушенных территорий [11–14]. Однако информация о поведении пырея ползучего в искусственно созданных растительных сообществах на отвалах горнодобывающей промышленности за рубежом практически

отсутствует, в нашей стране представлена ограниченно [15, 16].

Цель данной работы — установить особенности развития и эколого-фитоценотической стратегии *E. repens* в искусственных сообществах, созданных на вскрышных породных отвалах разреза “Листвянский” (Кемеровская обл.). В задачи исследования входило определение продолжительности жизни и доминирования, проективного покрытия, обилия, морфометрических характеристик, онтогенетической структуры и фитомассы пырея ползучего на разных этапах развития агрофитоценозов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 1990–2014 гг. на отвалах разреза “Листвянский”, расположенного в лесостепной части на юге Кузнецкой котловины в 15 км к юго-западу от г. Новокузнецка.

Климат территории континентальный. Сумма среднесуточных температур более 10 °С составляет 1800–1900 °С. Годовое количество осадков — 450–600 мм. Зональными почвами района исследования являлись выщелоченные и оподзоленные черноземы [17]. В результате проведения вскрышных работ образовались отвалы, которые по относительному возрасту почвогрунтов можно разделить на две группы. При неглубоком залегании угольных пластов отвалы сложены четвертичными отложениями, которые представлены лессовидными суглинками; при глубоком залегании — пермскими отложениями, образованными аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Характеристики гранулометрического и химического состава четвертичных и пермских отложений приведены в ранее опубликованных работах [2].

Агрофитоценозы на отвалах разреза “Листвянский” создавались нами в начале июля 1989 и 1990 гг. на производственных площадях качественно спланированных отвалов. Планировка поверхности отвалов была проведена бульдозерами, а затем обработана дисковым культиватором.

При создании злаковых травосмесей использовались семена злаков *Festuca pratensis* Huds., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, *Dactylis glomerata* L. s.l., *Phleum pratense* L., *Arrhenatherum elatius* (L.) J. et C. Presl, *Agrostis gigantea* Roth и *Agropyron cristatum* (L.) Beauv., полученные на производственных площадях ЦСБС. В состав злаковой травосмеси с *Onobrychis arenaria* наряду с другими злаками, входила *Festuca arundinacea* Shreb. Пырей ползучий на отвалах семенами не высевался, присутствие вида в составе агрофитоценозов могло быть связано с попаданием частей его корневищ из ранее снятых с поверхности отвалов верхних почвенных горизонтов. На четвертичных отложениях *E. repens* внедрился в состав злаковой

травосмеси, в посевах *Medicago sativa*, в посевах *Festuca arundinacea* и на участок естественного зарастания этих отвалов. На пермских отложениях *E. repens* вошел в состав злаковой травосмеси, клеверо-злаковой травосмеси с повышенной нормой высева семян, злаковой травосмеси с *Melilotus officinalis*, злаковой травосмеси с *Trifolium pratense* и злаковой травосмеси с *Onobrychis arenaria*. Последние три агрофитоценоза к 1999 г. образовали единый агрофитоценоз с доминированием злаков и *Onobrychis arenaria*, некоторые виды которого, в том числе и *E. repens*, позднее начали внедряться в соседние с ним посева *Trifolium pratense*.

Ежегодно, начиная со второго года жизни сообществ, с целью определения общей величины надземной фитомассы и доли участия отдельных видов в июле–начале августа в 1990–2004, 2013, 2014 гг. на площадках размером 0.5 м² в четырехкратной повторности проводили повидовой отбор надземной фитомассы. Кроме того, для выявления структурных особенностей агрофитоценозов и жизненного состояния ценопопуляций в каждом агрофитоценозе закладывалось по 10 учетных площадок размером 1 м², на которых определяли проективное покрытие, плотность, онтогенетический состав, число генеративных побегов всех видов, размеры дерновин у злаков, в том числе и у *E. repens*. В 1990–1993 и 1998 гг. сбор материала на учетных площадках проводился на участках посевов злаковых травосмесей, посевов *Medicago sativa*, посевов *Festuca arundinacea* и на участках естественного зарастания; в 1991–1993 и 1999 гг. — на участках посевов клеверо-злаковой травосмеси с повышенной нормой высева семян; в 1991–1993 гг. — на участках посевов *Trifolium pratense*, злаковой травосмеси с *Trifolium pratense*, злаковой травосмеси с *Melilotus officinalis*, злаковой травосмеси с *Onobrychis arenaria*; в 2000, 2013 гг. — на участках посевов *Trifolium pratense*, злаковой травосмеси с *Onobrychis arenaria*; в 2013 г. — на участках посевов *Festuca arundinacea*, злаковой травосмеси на четвертичных отложениях. Ценность и оригинальность проводимых исследований заключается в регулярном долговременном проведении наблюдений за структурой сообществ и всеми ценопопуляциями растений, слагающих созданные фитоценозы.

Возрастное состояние особей *E. repens* устанавливали в соответствии с имеющимися рекомендациями [18]. Индекс возрастности популяции определяли по формуле [19]:

$$\Delta = \frac{\sum k_i m_i}{\sum k_i},$$

где — k_i численность каждой возрастной группы, m_i — “вес” возрастности одной особи i -й группы, $k_j = 0.018$, $k_{im} = 0.0474$, $k_v = 0.1192$, $k_{g1} = 0.06889$,

$k_{g2} = 0.5$, $k_{g3} = 0.7311$, $k_{ss} = 0.8808$, $k_s = 0.9526$, $k_j = 0.03$, $k_{im} = 0.08$, $k_v = 0.18$, $k_{g1} = 0.38$, $k_{g2} = 0.62$, $k_{g3} = 0.83$, $k_{ss} = 0.93$, $k_s = 0.97$. Количественные данные обработаны с использованием методов описательной статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ежегодных наблюдений за агропопуляциями *E. repens* выявил отличия в поведении вида в искусственных сообществах, созданных на отвалах, и на зональных типах почв. На спланированных вскрышных отвалах в лесостепной зоне Кузнецкой котловины пырей ползучий присутствует в посевах более 25–26 лет. Вид не только не выпадает из состава травостоя, но в 2013 г. в злаковой травосмеси на четвертичных отложениях становится одним из основных доминантов (долевое участие в сложении травостоя 44.7%) (рис. 1а).

Продолжительность полного онтогенетического цикла *E. repens* неизвестна. Л.А. Жукова [20] относит его к группе видов со средней продолжительностью онтогенеза, у которых этот период в составе посевов многолетних трав, предположительно, составляет 10–15 лет. На лугах с регулярным отложением рыхлых наносов пырей может существовать неопределенно долгое время. На черноземных залежах и в посевах на плотных почвах он вырождается после четырех–семи лет использования. Причинами вырождения являются уплотнение почвы, связанное с ухудшением аэрации, и самозагущение чрезмерно разрастающихся корневищ. Доля участия пырея в видовом составе травостоя на залежах изменяется от 10 до 50% [8]. Изучая динамику самозарастания вскрышных отвалов, созданных при угледобыче в Назаровской котловине Красноярского края, Н.П. Миронычева-Токарева [15] отмечала, что *E. repens* — это единственный вид, появившийся в первые месяцы самозарастания отвала, сохранившийся и зарегистрированный на 8–10, а также на 26–28 годы зарастания. На гидроотвале Шуралино-Ягодного россыпного месторождения золота в таежной зоне Среднего Урала Т.С. Чибрик и др. [16] отметили постоянство присутствие пырея ползучего в экспериментальных посевах *Dactylis glomerata* на протяжении 15 лет мониторинга.

Одним из существенных показателей жизненного состояния ценопопуляции является численность. На спланированных вскрышных отвалах в лесостепи Кузнецкой котловины в разные годы в разных агрофитоценозах средняя плотность *E. repens* изменялась от 0.1 до 32.7 экз./м² (табл. 1, 2). Самые высокие показатели плотности и проективного покрытия за весь период наблюдений отмечены в 1993 г. в злаковой травосмеси на четвертичных отложениях. Прирост плотности агропопуляций пырея происходит за счет большого

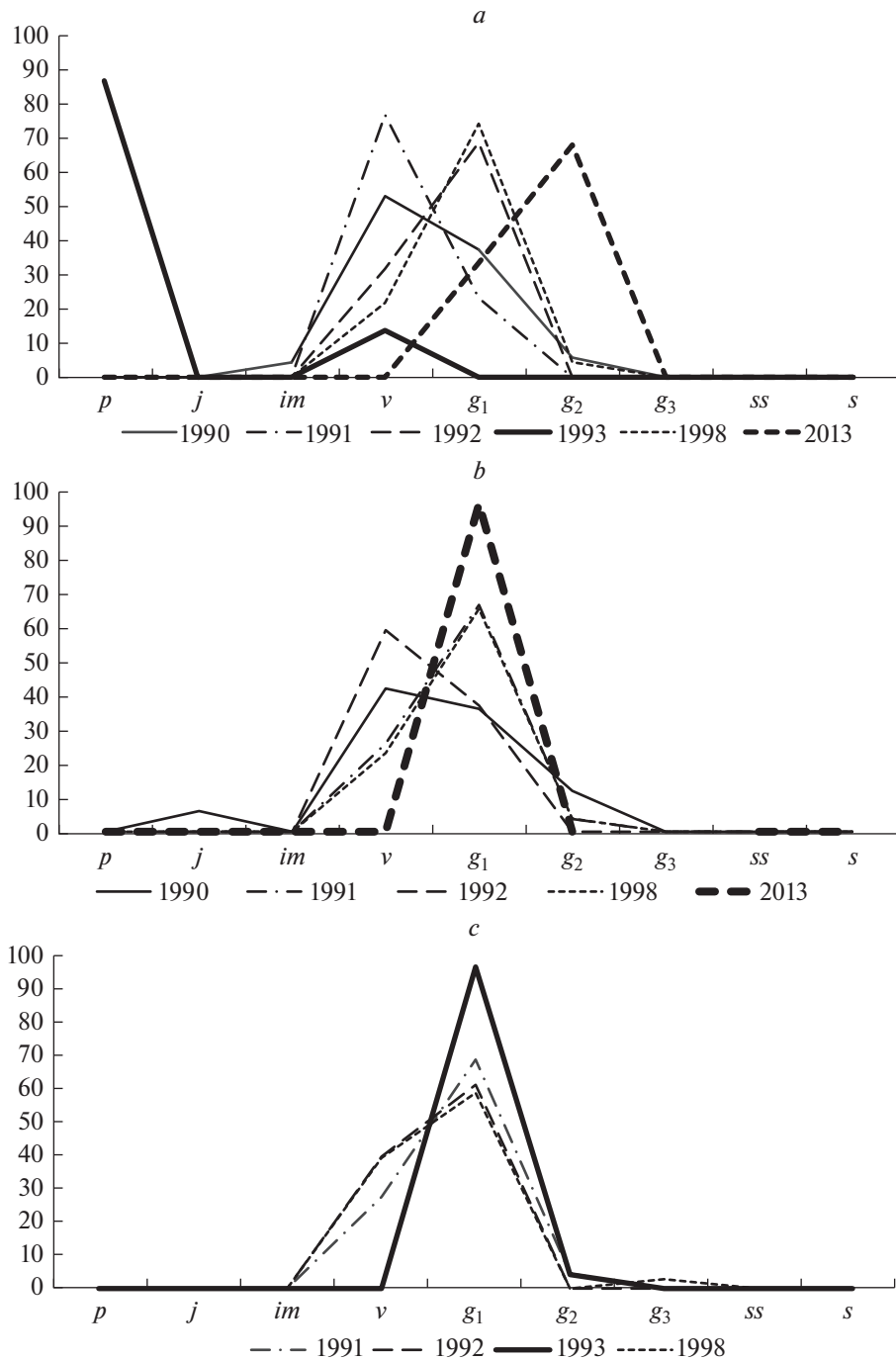


Рис. 1. Онтогенетические спектры агропопуляции *Elytrigia repens* в агрофитоценозах на вскрышных отвалах разреза “Листвянский”.

a – злаковая травосмесь на четвертичных отложениях, *b* – посев *Festuca arundinacea*, *c* – злаковая травосмесь на пермских отложениях, *d* – клеверо-злаковая травосмесь с повышенной нормой высева семян. По горизонтали – возрастные состояния особей: *j* – ювенильное, *im* – имматурное, *v* – виргинильное, *g*₁ – молодое генеративное, *g*₂ – средневозрастное генеративное, *g*₃ – стареющее генеративное, *ss* – субсенильное, *s* – сенильное; по вертикали – число особей данного возрастного состояния, % от общего числа.

Fig. 1. Ontogenetic spectra of *Agropyron cristatum* agronomic populations on open-cut spoil banks in the forest–steppe zone of Kuznetsk basin.

Agronomic phytocoenoses: *a* – cereal grass mixture on Quaternary deposits, *b* – *Festuca arundinacea* plantings; *c* – cereal grass mixture on Permian deposits; *d* – clover–grass mixture with increased seeding rate. X-axis – ontogenetic groups of individuals: *j* – juvenile, *im* – immature, *v* – virginal, *g*₁ – young generative, *g*₂ – mature generative, *g*₃ – old generative, *ss* – sub-senile, *s* – senile; Y-axis – number of plants in the age group, % of entire number.

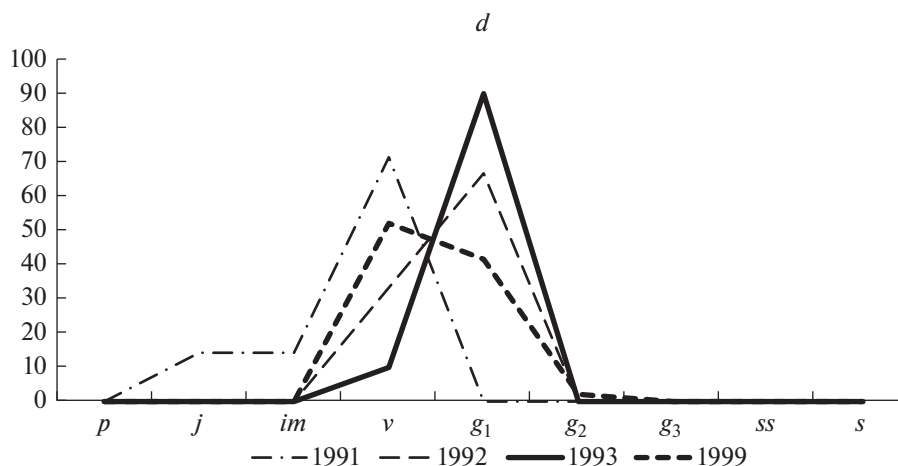


Рис. 1. Окончание. / Fig. 1. Ending.

числа проростков, на долю которых приходится почти 90% всех особей.

На пермских отложениях в клеверо-злаковой травосмеси с повышенной нормой высева семян показатель плотности постепенно растет с 0.7 ± 0.5 экз./м² (второй год жизни) до 4.8 ± 1.6 экз./м² (десятилетний год жизни). Проективное покрытие *E. repens* к десятому году жизни в этом же агрофитоценозе увеличилось с 0.02 ± 0.01 до $5.3 \pm 3.4\%$. В посевах злаков самые высокие показатели плотности пырея ползучего на четвертичных отложениях отмечены на второй год жизни этого сообщества — 7.0 ± 4.9 экз./м², на пермских отложениях — на четвертый год — 6.1 ± 2.3 экз./м². В посевах злаков с разными видами бобовых на четвертичных и пермских отложениях показатели плотности пырея невелики (не более 2.7 ± 2.1 экз./м²). Связи между плотностью особей и надземной фитомассой по годам наблюдений у пырея ползучего не наблюдается, что свидетельствует о его способности в зависимости от условий года ограничивать рост надземных частей, прочно сохраняя в тоже время свое участие в составе травостоя — свойство очень ценное в травосмесях длительного пользования.

По имеющимся данным [15], плотность особей *E. repens* в первые годы самозаращения спланированных отвалов Назаровского угольного разреза возрастала из года в год и на третьем году жизни сообщества в среднем составила 263 экз./м² при проективном покрытии 20–60%.

Число генеративных побегов на единицу площади (генеративное обилие) можно рассматривать как индикатор жизненного состояния, а также возрастного состава популяции. На спланированных вскрышных отвалах Кузбасса генеративные побеги *E. repens* присутствуют на второй, третий годы жизни во всех посевах (табл. 1, 2).

Самые высокие числа генеративных побегов на единицу площади отмечены в злаковой травосмеси на четвертичных отложениях на втором (14.2 ± 8.7) и пятом (17.4 ± 7.9 шт./м²) годах жизни агрофитоценоза. Резкое увеличение числа генеративных побегов требует значительных энергетических затрат, растения уходят в зиму ослабленными и ранней весной отмирают, из-за чего проективное покрытие вида на следующий год снижается. На отвалах, сложенных пермскими отложениями, максимальные числа генеративных побегов являются более низкими, чем на четвертичных породах и отмечены на четвертом году жизни посевов в злаковой травосмеси (4.7 ± 1.8) и в злаковой травосмеси с *Trifolium pratense* (4.8 ± 3.9 шт./м²).

На зональных рыхлых плодородных почвах в год посева пырей ползучий дает небольшое количество неплодущих стеблей, и всю силу роста направляет на развитие корневищ, которые, разрастаясь и ветвясь, дают многочисленные побеги к поверхности почвы. На втором году жизни пырей образует сплошной сомкнутый травостой [8]. На спланированных вскрышных отвалах Назаровского угольного разреза на начальных этапах зарастания отмечали постепенное увеличение численности как вегетативных, так и генеративных побегов пырея ползучего. При этом скорость процессов не одинакова, со временем доля вегетативных особей уменьшается, а доля генеративных возрастает. На третий год жизни из 263 побегов на одном квадратном метре 66 приходилось на генеративные особи и 197 на вегетативные [15].

Высота побегов отражает благоприятность почвенных условий в пределах размещения активной части корневой системы. В агрофитоценозах, созданных на отвалах разреза “Листвянский”, высота генеративных побегов изменялась от 17 до 155 см. Средние значения колебались от 29.7 см (естественное зарастание на четвертичных

Таблица 1. Характеристики агропопуляций *Elytrigia repens* в агрофитоценозах на спланированных вскрышных отвалах, сложенных четвертичными отложениями, в лесостепи Кузнецкой котловины**Table 1.** Characteristics of *Elytrigia repens* agronomic populations on the levelled open-cut spoil banks composed of Quaternary deposits in the forest-steppe zone of the Kuznetsk Basin

Год наблюдений (год после посева) Year of observation (year after seeding)	Проективное покрытие, % Projective cover, %	Плотность особей, экз./м ² Density, ind./m ²	Число генеративных побегов на м ² Number of generative shoots per m ²	Индекс возрастности ценопопуляции (Δ) Age index of coenopopulation (Δ)
Злаковая травосмесь Grass mixture				
1990 (2)	6.1 ± 4.6 ¹	7.0 ± 4.9	14.2 ± 8.7	0.275
1991 (3)	0.3 ± 0.3	3.9 ± 1.7	1.5 ± 1.5	0.226
1992 (4)	0.2 ± 0.1	1.9 ± 0.7	1.3 ± 0.6	0.247
1993 (5)	12.0 ± 4.9	32.7 ± 32.4	8.7 ± 4.7	0.300
1998 (10)	0.5 ± 0.1	2.3 ± 1.6	1.9 ± 1.3	0.346
2013 (25)	0.05 ± 0.05	0.3 ± 0.3	2.3 ± 1.2	0.436
Посевы <i>Medicago sativa</i> <i>Medicago sativa</i> plantings				
1991 (3)	0.1 ± 0.1	1.4 ± 1.4	4.1 ± 4.1	0.318
1992 (4)	0.07 ± 0.07	0.9 ± 0.9	4.0 ± 4.0	0.180
1998 (10)	0.9 ± 0.5	0.1 ± 0.1	2.3 ± 1.4	0.236
Посевы <i>Festuca arundinacea</i> <i>Festuca arundinacea</i> plantings				
1990 (2)	0.4 ± 0.2	1.6 ± 0.2	4.0 ± 2.5	0.335
1991 (3)	0.5 ± 0.1	2.6 ± 1.5	2.8 ± 1.9	0.301
1992 (4)	0.2 ± 0.1	1.3 ± 0.6	0.8 ± 0.7	0.257
1998 (10)	0.4 ± 0.2	2.5 ± 1.4	2.5 ± 1.3	0.359
2013 (25)	0.01 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.380
Естественное зарастание Natural overgrowth				
1990 (2)	0.2 ± 0.2	1.4 ± 0.8	1.1 ± 0.7	0.368
1991 (3)	5.9 ± 5.5	9.8 ± 5.6	1.4 ± 1.1	0.274
1992 (4)	0.4 ± 0.4	2.3 ± 2.1	5.6 ± 4.9	0.338
1993 (5)	0.1 ± 0.02	2.6 ± 0.9	1.2 ± 0.7	0.201
1998 (10)	9.4 ± 4.6	26.2 ± 8.3	3.5 ± 0.9	0.203

Примечание: ¹ среднее значение и его ошибка.Note: ¹ The mean and error of the mean.

отложениях) до 122 см (злаковая травосмесь на четвертичных отложениях) (табл. 3, 4).

По данным К.А. Куркина [21], у видов позднелетнего цветения, к которым относится *E. repens*, рост генеративных побегов протекает в два этапа. Первый этап совпадает с периодом роста вегетативных побегов, второй с фазой выхода в трубку или колосения. Именно в эту фазу реализуется высокая энергия роста генеративных побегов, происходит усиленный рост верхних междоузлий, благодаря чему генеративные органы выносятся над травостоем. На генеративную фазу за-

трачивается большое количество влаги. Поэтому в тех случаях, когда генеративная фаза роста совпадает с сильной атмосферно-почвенной засухой, рост верхних междоузлий тормозится, и вынос генеративных побегов над травостоем в полной мере не реализуется. Такие неблагоприятные условия в районе исследования наблюдались в 1998 г., что повлияло на высоту генеративных побегов *E. repens*. Так, в злаковых травосмесях, созданных на отвалах, сложенных обоими типами отложений, а также в посевах *Festuca arundinacea* и при естественном зарастании отвалов на четвер-

Таблица 2. Характеристики агропопуляций *Elytrigia repens* в агрофитоценозах на спланированных вскрышных отвалах, сложенных пермскими отложениями, в лесостепи Кузнецкой котловины**Table 2.** Characteristics of *Elytrigia repens* agronomic populations on the levelled open-cut spoil banks composed of Permian deposits in the forest–steppe zone of the Kuznetsk Basin

Год наблюдений (год после посева) Year of observation (year after seeding)	Проективное покрытие, % Projective cover, %	Плотность особей, экз./м ² Density, ind./m ²	Число генеративных побегов на м ² Number of generative shoots per m ²	Индекс возрастности ценопопуляции (Δ) Age index of coenopopulation (Δ)
Злаковая травосмесь Grass mixture				
1991 (3)	0.4 ± 0.2 ¹	2.2 ± 0.7	1.9 ± 1.8	0.345
1992 (4)	1.6 ± 1.2	6.1 ± 2.3	4.7 ± 1.8	0.301
1993 (5)	0.6 ± 0.4	2.4 ± 1.2	3.2 ± 1.6	0.390
1998 (10)	0.5 ± 0.2	3.6 ± 1.5	2.4 ± 1.1	0.314
Клеверо-злаковая травосмесь с повышенной нормой высева семян Clover–grass mixture with increased seeding rate				
1991 (2)	0.02 ± 0.01	0.7 ± 0.5	—	0.166
1992 (3)	0.04 ± 0.03	0.3 ± 0.3	0.2 ± 0.2	0.313
1993 (4)	0.5 ± 0.2	0.9 ± 0.4	0.9 ± 0.4	0.360
1999 (10)	5.3 ± 3.4	4.8 ± 1.6	2.6 ± 1.5	0.272
Злаковая травосмесь с <i>Melilotus officinalis</i> Grass mixture with <i>Melilotus officinalis</i>				
1991 (2)	0.02 ± 0.02	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.3	0.280
1992 (3)	0.3 ± 0.2	1.9 ± 1.0	2.0 ± 1.2	0.319
1993 (4)	0.4 ± 0.2	2.7 ± 2.1	0.9 ± 0.5	0.232
Злаковая травосмесь с <i>Trifolium pratense</i> Grass mixture with <i>Trifolium pratense</i>				
1993 (4)	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.2	4.8 ± 3.9	0.380
Злаковая травосмесь с <i>Onobrychis arenaria</i> Grass mixture with <i>Onobrychis arenaria</i>				
2000 (11)	0.06 ± 0.04	0.7 ± 0.5	0.3 ± 0.2	0.266
2013 (24)	0.5 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.8 ± 0.8	0.380
Посевы <i>Trifolium pratense</i> <i>Trifolium pratense</i> plantings				
2013 (24)	0.4 ± 0.4	1.3 ± 0.4	1.4 ± 1.2	0.380
Естественное зарастание Natural overgrowth				
1998 (9)	0.05 ± 0.05	0.4 ± 0.4	2.5 ± 2.5	0.230

Примечание: ¹ среднее значение и его ошибка.Note: ¹ In the numerator – the mean and error of the mean.

тичных отложениях в 1998 г. отмечены одни из самых низких значений данного показателя за период наблюдений – 45–48 см (табл. 3, 4). Генеративные побеги *E. repens* на суходольных лугах достигают высоты 50–80 см, на пойменных лугах 100–120, иногда до 170 см [10].

Диаметр дерновин *E. repens* является одним из показателей жизненного состояния особей этого вида. На отвалах в лесостепной зоне Кузнецкой котловины вид, находясь в сложных экологических условиях, не образует мощных дерновин

(табл. 3, 4). Формируются системы из 4–6 однопобеговых молодых генеративных парциальных кустов, имеющих в большинстве случаев (70% особей) диаметр от 1 до 3 см. Увеличение средних показателей диаметра дерновин происходит при переходе *E. repens* в следующее возрастное состояние. Самое высокое значение средней величины диаметра 14.5 ± 0.5 см отмечено у средневозрастных генеративных особей в клеверо-злаковой травосмеси с повышенной нормой высева семян (1999 г.). По данным М.И. Ненарокова, в

Таблица 3. Диаметр дерновин и высота генеративных побегов *Elytrigia repens* в агрофитоценозах на спланированных вскрышных отвалах, сложенных четвертичными отложениями, в лесостепи Кузнецкой котловины
Table 3. Diameter of turfs and height of generative shoots of *Elytrigia repens* agronomic populations on the levelled open-cut spoil banks composed of Quaternary deposits in the forest–steppe zone of the Kuznetsk Basin

Год наблюдений (год после посева) Year of observation (year after seeding)	Диаметр дерновин, см Turf diameter, cm			Высота генеративных побегов, см Height of generative shoots, cm	
	виргинильные особи virginal individuals	генеративные особи generative individuals			
		молодые G1	средневозрастные G2		старые G3
Злаковая травосмесь Grass mixture					
1990 (2)	$\frac{2.0 \pm 0.2}{0.3-6.5}$	$\frac{4.3 \pm 0.6}{0.5-7.5}$	10.0	—	$\frac{69.7 \pm 2.2}{40-103}$
1991 (3)	$\frac{1.1 \pm 0.2}{0.1-2.5}$	$\frac{2.4 \pm 0.3}{1.0-3.5}$	—	—	$\frac{47.4 \pm 15.0}{25-95}$
1992 (4)	$\frac{0.5 \pm 0.2}{0.2-1.0}$	$\frac{1.1 \pm 0.4}{0.3-2.5}$	—	—	$\frac{63.5 \pm 3.3}{69-78}$
1993 (5)	$\frac{3.4 \pm 0.4}{1.0-10.0}$	$\frac{2.2 \pm 0.4}{0.7-5.0}$	$\frac{7.1 \pm 0.9}{3.0-14.0}$	—	$\frac{120.5 \pm 18.6}{100-155}$
1998 (10)	$\frac{3.5 \pm 0.6}{0.2-6.0}$	$\frac{3.1 \pm 0.8}{0.2-10.0}$	—	—	$\frac{44.7 \pm 2.0}{26-59}$
2013 (25)	—	$\frac{1.3 \pm 0.2}{1.0-2.0}$	3.0	—	$\frac{122.0 \pm 6.1}{90-140}$
Посевы <i>Medicago sativa</i> <i>Medicago sativa</i> plantings					
1991 (3)	$\frac{1.3 \pm 0.3}{1.0-2.0}$	$\frac{2.3 \pm 0.4}{0.5-4.5}$	—	—	$\frac{56.9 \pm 3.3}{40-70}$
1992 (4)	$\frac{0.8 \pm 0.1}{0.2-2.0}$	—	—	—	—
1998 (10)	$\frac{3.6 \pm 0.6}{0.2-8.0}$	$\frac{3.4 \pm 2.3}{0.2-8.0}$	—	—	$\frac{53.3 \pm 3.3}{38-64}$
Посевы <i>Festuca arundinacea</i> <i>Festuca arundinacea</i> plantings					
1990 (2)	$\frac{3.3 \pm 0.8}{0.1-7.5}$	$\frac{2.8 \pm 0.9}{1.0-6.5}$	$\frac{10.3 \pm 0.2}{10.0-10.5}$	—	$\frac{55.6 \pm 1.6}{28-87}$
1991 (3)	$\frac{3.3 \pm 0.8}{0.1-7.5}$	$\frac{1.5 \pm 0.2}{0.3-2.5}$	6.5	—	$\frac{51.7 \pm 2.7}{20-79}$
1992 (4)	$\frac{0.9 \pm 0.3}{0.2-2.0}$	$\frac{3.9 \pm 1.1}{2.0-8.0}$	—	—	$\frac{56.3 \pm 5.5}{40-65}$
1998 (10)	0.2	$\frac{0.9 \pm 0.5}{0.2-5.0}$	6.0	17.0	$\frac{51.6 \pm 2.9}{25-83}$
2013 (25)	—	1.0	—	—	75

Таблица 3. Окончание / Table 3. Ending

Год наблюдений (год после посева) Year of observation (year after seeding)	Диаметр дерновин, см Turf diameter, cm			Высота генеративных побегов, см Height of generative shoots, cm	
	виргинильные особи virginal individuals	генеративные особи generative individuals			
		молодые G1	средневозрастные G2		старые G3
Естественное зарастание Natural overgrowth					
1990 (2)	$\frac{0.3 \pm 0.05}{0.2-0.3}$	$\frac{2.1 \pm 0.7}{0.3-6.5}$	5.5	—	$\frac{29.7 \pm 1.6}{23-41}$
1991 (3)	$\frac{0.8 \pm 0.2}{0.2-2.0}$	$\frac{1.5 \pm 0.1}{0.3-3.5}$	—	—	$\frac{63.9 \pm 1.7}{33-90}$
1992 (4)	$\frac{0.5 \pm 0.1}{0.2-1.0}$	$\frac{2.1 \pm 0.3}{0.3-4.0}$	7.0	—	$\frac{61.1 \pm 2.3}{37-92}$
1993 (5)	$\frac{1.5 \pm 0.5}{1.0-3.0}$	$\frac{1.5 \pm 0.2}{1.0-2.0}$	—	—	$\frac{63.3 \pm 4.0}{52-70}$
1998 (10)	$\frac{1.3 \pm 0.2}{0.2-7.0}$	$\frac{2.0 \pm 0.5}{0.2-19.0}$	—	—	$\frac{48.3 \pm 1.9}{17-72}$

Примечание: в числителе — среднее значение и его ошибка, в знаменателе — диапазон величин, прочерк — особи данного онтогенетического состояния отсутствуют.

Note: The numerator is the mean and error of the mean, the denominator is the range of values, the dash means the absence of individuals of this ontogenetic state.

степной зоне на Павловском опытном поле в чистых посевах одиночные кусты *E. repens* к четвертому году жизни образовывали куртины до 2–3 м в диаметре [8].

Онтогенетическая структура — одна из существенных характеристик состояния ценопопуляции, от которой зависит способность популяционной системы к самоподдержанию и ее устойчивость. Онтогенетические спектры агропопуляций *E. repens* на отвалах разреза “Листвянский”, начиная с первых лет жизни агрофитоценозов, нормальные, дефинитивные, неполноценные, левосторонние с максимумом в абсолютном большинстве случаев на особях виргинильного и (или) молодого генеративного состояний (рис. 1а–д). Согласно Л.А. Жуковой [20], такой тип спектров характерен для длиннокорневищных злаков, произрастающих на зональных почвах, при этом локальные максимумы могут приходиться практически на любую группу. С увеличением возраста агрофитоценозов на отвалах разреза “Листвянский” максимумы в онтогенетических спектрах *E. repens* постепенно смещаются вправо. В спектрах на протяжении всего изучаемого периода сохранялась неполноценность: отсутствуют субсенильные и сенильные растения. Пропуск возрастных состояний может являться элементом

общей стратегии выживания растений в техногенных экотопах.

Возрастность популяции является оценкой воздействия ее на среду [19]. Если индекс возрастности близок к 0.05 (ценопопуляция представлена преимущественно молодыми особями) или к 0.95 (преобладают старые, следовательно, ослабленные особи), влияние ценопопуляции на среду будет являться низким. Индекс возрастности большинства агропопуляций *E. repens* был низким, в разные годы значения показателя на отвалах, сложенных четвертичными отложениями, изменялись от 0.180 до 0.368, на пермских отложениях — от 0.166 до 0.390 (табл. 1, 2). Значение индекса, близкое к 0.5 (преобладают наиболее жизнедеятельные особи, находящиеся в молодом и средневозрастном генеративном состоянии) отмечено только в злаковой травосмеси на четвертичных отложениях (0.436) на двадцать пятом году жизни агрофитоценоза (табл. 1).

За 25 лет наблюдений вклад в надземную фитомассу *E. repens* в агрофитоценозах разреза “Листвянский” значительно колебался по годам: 0.2–44.3% — на четвертичных отложениях, 0.5–21.9% — на пермских отложениях. Высокие показатели отмечены нами в те годы, когда генеративная фаза роста растений совпадала с обильными атмосферными осадками. В тех случаях, когда не-

Таблица 4. Диаметр дерновин и высота генеративных побегов *Elytrigia repens* в агрофитоценозах на спланированных вскрышных отвалах, сложенных пермскими отложениями, в лесостепи Кузнецкой котловины
Table 4. Some vitality indices of *Elytrigia repens* agronomic populations on the levelled open-cut spoil banks composed of Permian deposits in the forest–steppe zone of the Kuznetsk Basin

Год наблюдений (год после посева) Year of observation (year after seeding)	Диаметр дерновин, см Turf diameter, cm				Высота генеративных побегов, см Height of generative shoots, cm
	виргинильные особи virginal individuals	генеративные особи generative individuals			
		молодые G1	средневозрастные G2	старые G3	
Злаковая травосмесь Grass mixture					
1991 (3)	$\frac{2.1 \pm 0.8}{0.3-7.0}$	$\frac{1.1 \pm 0.2}{0.3-3.0}$	—	2.5	$\frac{53.9 \pm 4.1}{28-90}$
1992 (4)	$\frac{0.7 \pm 0.1}{0.2-2.0}$	$\frac{1.9 \pm 0.2}{0.3-5.0}$	—	—	$\frac{65.4 \pm 2.1}{37-84}$
1993 (5)	—	$\frac{1.4 \pm 0.1}{0.2-3.0}$	3.5	—	$\frac{57.3 \pm 2.1}{35-88}$
1998 (10)	$\frac{1.0 \pm 0.4}{0.2-6.0}$	$\frac{0.4 \pm 0.2}{0.2-5.0}$	—	—	$\frac{45.1 \pm 3.1}{23-65}$
Клеверо-злаковая травосмесь с повышенной нормой высева семян Clover—grass mixture with increased seeding rate					
1991(2)	$\frac{0.3 \pm 0.06}{0.2-0.5}$	—	—	—	—
1992 (3)	0.3	$\frac{1.3 \pm 0.2}{1.0-1.5}$	—	—	75
1993 (4)	1.0	$\frac{1.1 \pm 0.2}{0.5-2.0}$	—	—	$\frac{95.5 \pm 9.6}{55-120}$
1999 (10)	$\frac{1.1 \pm 0.3}{0.2-3.0}$	$\frac{1.5 \pm 0.3}{0.2-6.0}$	$\frac{14.5 \pm 0.5}{14.0-15.0}$	—	$\frac{50.0 \pm 2.8}{22-81}$
Злаковая травосмесь с <i>Melilotus officinalis</i> Grass mixture with <i>Melilotus officinalis</i>					
1991 (2)	$\frac{0.2 \pm 0.04}{0.1-0.5}$	—	5.0	—	$\frac{40.7 \pm 7.1}{27-51}$
1992 (3)	$\frac{1.1 \pm 0.2}{0.5-1.5}$	$\frac{1.5 \pm 0.2}{0.5-2.5}$	5.5	—	$\frac{56.0 \pm 2.6}{40-76}$
1993 (4)	$\frac{0.7 \pm 0.2}{0.5-3.5}$	$\frac{1.5 \pm 0.4}{0.2-3.5}$	—	—	$\frac{76.8 \pm 1.3}{73-85}$
Злаковая травосмесь с <i>Trifolium pratense</i> Grass mixture with <i>Trifolium pratense</i>					
1993 (4)	—	$\frac{2.8 \pm 1.2}{1.5-4.0}$	—	—	$\frac{95.7 \pm 0.4}{95-98}$

Таблица 4. Окончание / Table 4. Ending

Год наблюдений (год после посева) Year of observation (year after seeding)	Диаметр дерновин, см Turf diameter, cm				Высота генеративных побегов, см Height of generative shoots, cm
	виргинильные особи virginal individuals	генеративные особи generative individuals			
		молодые G1	средневозрастные G2	старые G3	
Злаковая травосмесь с <i>Onobrychis arenaria</i> Grass mixture with <i>Onobrychis arenaria</i>					
2000 (11)	$\frac{5.5 \pm 5.2}{0.2-16.0}$	$\frac{0.5 \pm 0.2}{1.0-5.0}$	—	—	$\frac{69.0 \pm 15.9}{43-98}$
2013 (24)	—	$\frac{1.8 \pm 0.7}{1.0-5.0}$	—	—	$\frac{79.3 \pm 6.3}{63-104}$
Посевы <i>Trifolium pratense</i> <i>Trifolium pratense</i> plantings					
2013 (24)	—	$\frac{0.3 \pm 0.1}{0.2-1.0}$	—	—	$\frac{52.1 \pm 3.9}{34-70}$
Естественное зарастание Natural overgrowth					
1998 (9)	0.2	8.0	—	—	55.0

Примечание: в числителе — среднее значение и его ошибка, в знаменателе — диапазон величин, прочерк — особи данного онтогенетического состояния отсутствуют.

Note: The numerator — is the mean and its error, the denominator — is the range of values, the dash — means the absence of individuals of this ontogenetic state.

благоприятные условия осени предшествующего года и весны данного года сменялись затем благоприятными условиями лета, у поздноцветущих трав нередко закладывается дополнительная (летняя) серия генеративных побегов, которая резко отличается повышенной мощностью генеративных органов и высотой, по сравнению с побегами основной (осенней) закладки [21].

Следуя [22], условимся называть вид содоминантом, если его вклад в надземную фитомассу составляет 10% и более. На отвалах четвертичных отложений *E. repens* становился содоминантом в злаковой травосмеси на второй и двадцать пятый годы, а среднее многолетнее значение его воздушно-сухой надземной фитомассы составило 2.3 ± 1.1 ц/га (рис. 2a). В посевах *Medicago sativa* пырей ползучий вошел в число содоминантов на восьмой и девятый годы, среднее значение сухой фитомассы за все годы исследований 2.9 ± 2.0 ц/га (рис. 2b). В посевах *Festuca arundinacea* пырей ползучий был содоминантом на двенадцатый и четырнадцатый годы, среднее многолетнее значение сухой надземной фитомассы составило 1.3 ± 0.6 ц/га (рис. 2c). При естественном зарастании четвертичных отложений *E. repens* был содоминантом на четвертый и десятый годы,

среднее многолетнее значение сухой надземной фитомассы 1.0 ± 0.4 ц/га (рис. 2d). На отвалах четвертичных отложений максимум абсолютной и относительной сухой надземной фитомассы (12.1 ц/га и 44.7%) *E. repens* наблюдался в злаковой травосмеси в 2013 г. (на двадцать пятый год жизни агрофитоценоза), когда генеративная фаза роста у пырея ползучего совпала с обильными летними осадками. Вследствие этого рост верхних междоузлий ускорился, вынос генеративных побегов над травостоем реализовался в полной мере, и высота генеративных побегов пырея ползучего за весь изучаемый период была максимальной (122.0 ± 6.1 см). В качестве содоминантов в 2013 г. отмечены *Bromopsis inermis* и *Arrhenatherum elatius*.

На отвалах пермских отложений *E. repens* становился содоминантом в злаковой травосмеси на шестом году жизни агрофитоценоза (рис. 3a). Среднее за годы исследований значение воздушно-сухой надземной фитомассы пырея в этом агрофитоценозе составляло 0.9 ± 0.6 ц/га. В клеверо-злаковой травосмеси с повышенной нормой высева семян вид являлся содоминантом на десятый и двенадцатый годы (рис. 3b). Среднее многолетнее значение сухой надземной фитомассы:

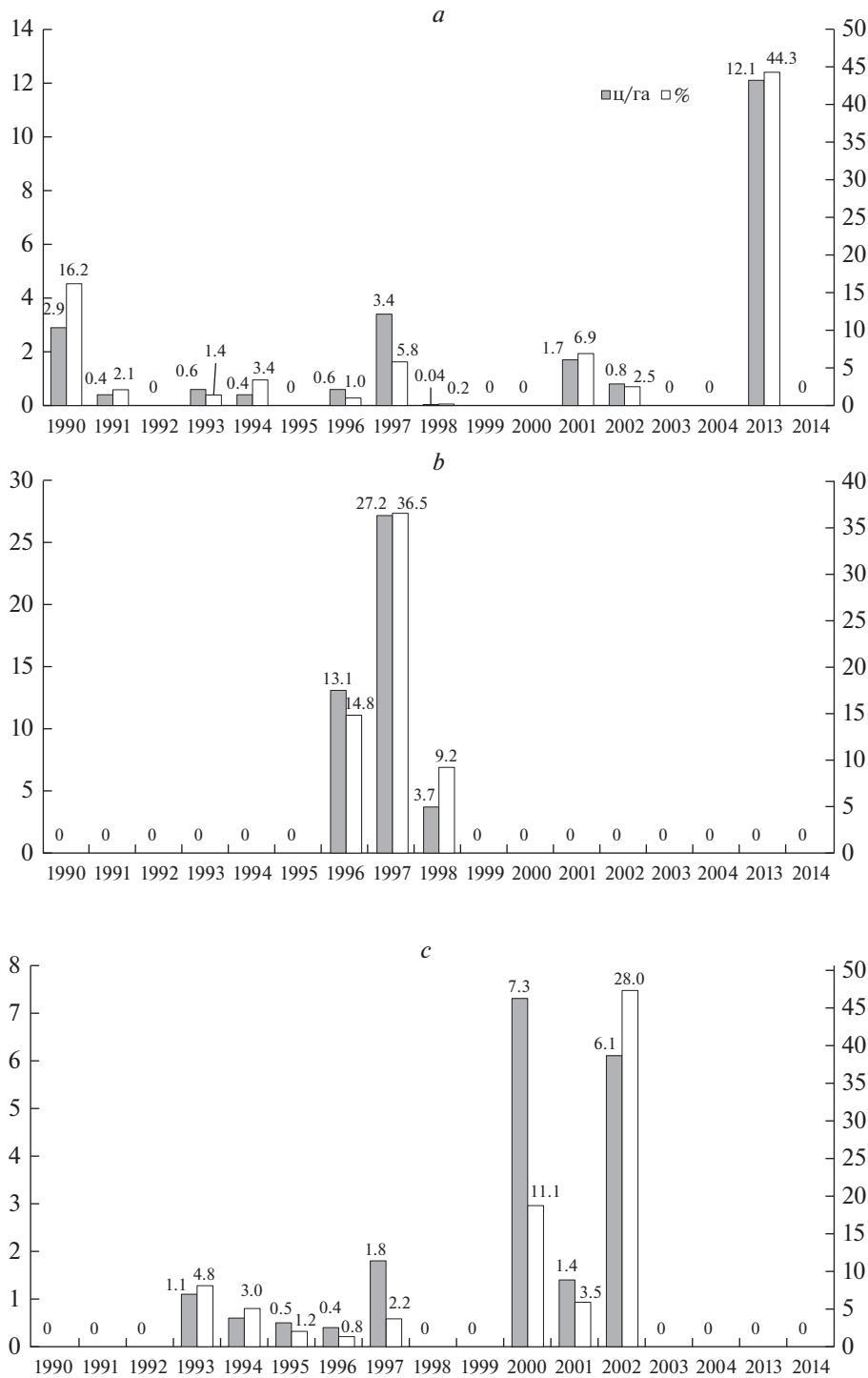


Рис. 2. Динамика воздушно-сухой надземной фитомассы *Elytrigia repens* в агрофитоценозах на четвертичных отложениях.

a — злаковая травосмесь, *b* — посевы *Medicago sativa*, *c* — посевы *Festuca arundinacea*, *d* — естественное зарастание. По горизонтали: год наблюдения; по вертикали слева — ц/га, справа — % от общей фитомассы.

Fig. 2. The dynamics of air-dry aboveground phytomass of *Elytrigia repens* in agronomic phytocoenoses on Quaternary deposits. *a* — grass mixture, *b* — *Medicago sativa* plantings, *c* — *Festuca arundinacea* plantings, *d* — natural overgrowth. X-axis — observation year; left Y-axis: kg 10²/ha, right Y-axis: % of the total phytomass.

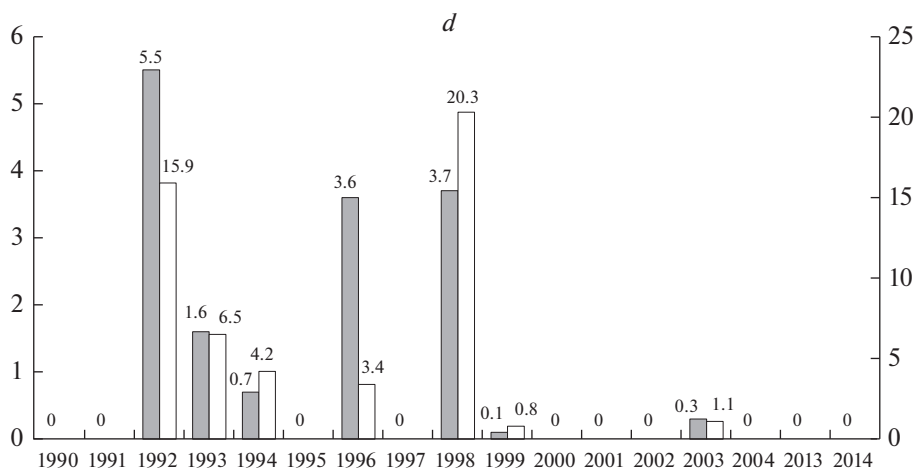


Рис. 2. Окончание. / Fig. 2. Ending.

0.6 ± 0.3 ц/га. В злаковой травосмеси с *Melilotus officinalis* пырей ползучий вошел в число содоминирующих видов на седьмой и восьмой годы (рис. 3с). Среднее многолетнее значение его сухой надземной фитомассы: 1.8 ± 0.9 ц/га. В злаковых травосмесях с *Trifolium pratense*, с *Onobrychis arenaria* и в посевах *Trifolium pratense* вид не входил в число содоминантов в годы исследований (рис. 3d, e, f). Его многолетняя средняя воздушно-сухая надземная фитомасса составляла не более 0.3 ц/га. При естественном зарастании пермских отложений *E. repens* выступал в качестве содоминанта на двенадцатый и тринадцатый годы (рис. 3g). Средняя за годы исследований величина надземной фитомассы: 0.4 ± 0.2 ц/га. Максимальную фитомассу (4.2 ц/га) и долю участия вида в общей фитомассе (21.9%) на отвалах, сложенных пермскими отложениями, отмечали в клеверо-злаковой травосмеси с повышенной нормой высева семян на одиннадцатом году жизни агрофитоценоза (2000 г.). В качестве содоминантов в этом году отмечены *Dactylis glomerata* и *Festuca arundinacea*.

Таким образом, участие *E. repens* в сложении травостоя невелико: чаще он выступает в качестве ассектатора, но в отдельные годы ведет себя как содоминант созданных искусственных сообществ. Следует отметить высокую активность вида, который внедрился в состав сообществ, что не могло не сказаться на улучшении кормовых качеств травостоя.

Биологическая продуктивность пырейных лугов в лесостепи колеблется в значительных пределах: на залежах урожай сена — 8–12 ц/га, на пойменных лугах и лиманах 20–25 ц/га, при благоприятных условиях доходит до 60 ц/га [10]. В культуре вид чаще всего используют при создании долговечных сеяных лугов на влажных и сырых местообитаниях, где пырей ползучий является одним из основных доминантов на четвер-

тый—шестой и даже на тринадцатый год [8]. Продуктивность посевов пырея ползучего на лугах поймы Дона с регулярным мощным (3–5 см) отложением наносов составила 115 ц/га, с умеренными наносами — 35 ц/га [8]. Попытки создания чистых посевов пырея ползучего на краткий срок, предпринятые в черноземной полосе России, не получили широкого развития из-за сильного засорения им последующих культур.

При самозаращении спланированных отвалов Назаровского угольного разреза в лесостепи Назаровской котловины (Красноярский край) продуктивность пырея ползучего на втором году жизни растительного сообщества составила 2.9 ц/га, при вкладе его в фитомассу 8% [15].

Тип стратегии популяции того или иного вида выступает показателем степени его стабильности в техногенной экосистеме и, в итоге, отражает устойчивость системы к воздействию антропогенного фактора [23]. Анализ стратегий *E. repens* на участках естественного зарастания отвалов и в агрофитоценозах, созданных в лесостепной зоне Кузнецкой котловины, показал следующее. Вид чаще проявляет себя как пациент или стресс-толерант экотопический, отличающийся выносливостью к неблагоприятным условиям произрастания. Стратегия вида не является константной, экотопические пациенты, приспособленные к жизни в местообитаниях с постоянным абиотическим стрессом или в условиях ограничения ресурсов, при снижении нагрузки и улучшении фитоценологических условий могут становиться виолентами. Пырей ползучий, как и многие луговые растения, обладает свойством пластичности стратегии и в оптимальные годы на отвалах, проявляет свои виолентные качества, в то время как на зональных почвах отличается эксплерентностью [24]. В условиях техногенных экотопов изменение активности вида может служить показа-

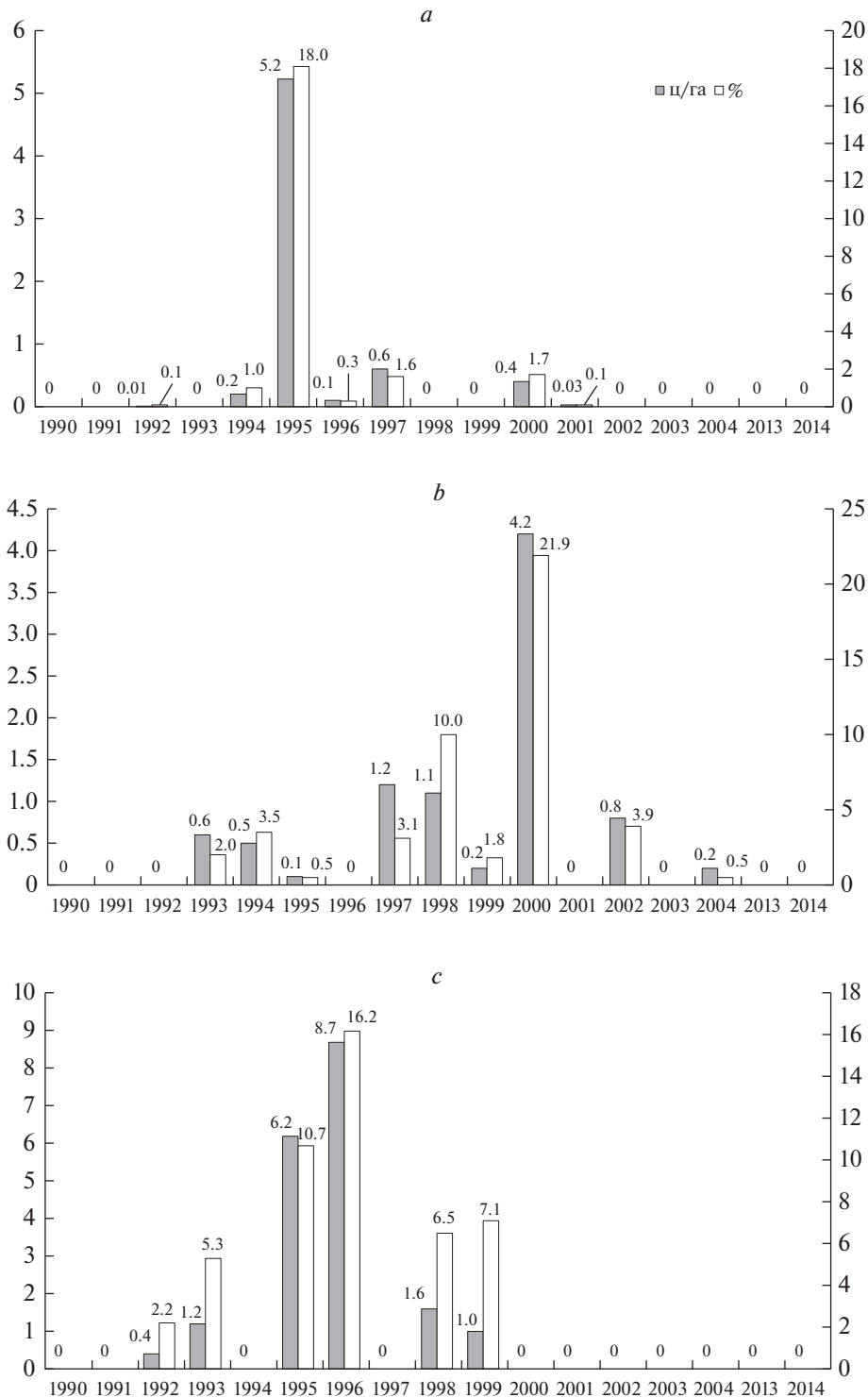


Рис. 3. Динамика воздушно-сухой надземной фитомассы *Elytrigia repens* в агрофитоценозах на пермских отложениях *a* – злаковая травосмесь, *b* – клеверо-злаковая травосмесь с повышенной нормой высева семян, *c* – злаковая травосмесь с *Melilotus officinalis*, *d* – злаковая травосмесь с *Trifolium pratense*, *e* – злаковая травосмесь с *Onobrychis arenaria*, *f* – посевы *Trifolium pratense*, *g* – естественное зарастание. По горизонтали: год наблюдения; по вертикали слева – ц/га, справа – % от общей фитомассы.

Fig. 3. The dynamic of air-dry aboveground phytomass of *Elytrigia repens* in agronomic phytocoenoses on Permian deposits. *a* – grass mixture, *b* – clover-grass mixture with increased seeding rate, *c* – grass mixture with *Melilotus officinalis*, *d* – grass mixture with *Trifolium pratense*, *e* – grass mixture with *Onobrychis arenaria*, *f* – *Trifolium pratense* sowing, *g* – natural overgrowth. X-axis – observation year; left Y-axis: kg·10²/ha, right Y-axis: % of the total phytomass.

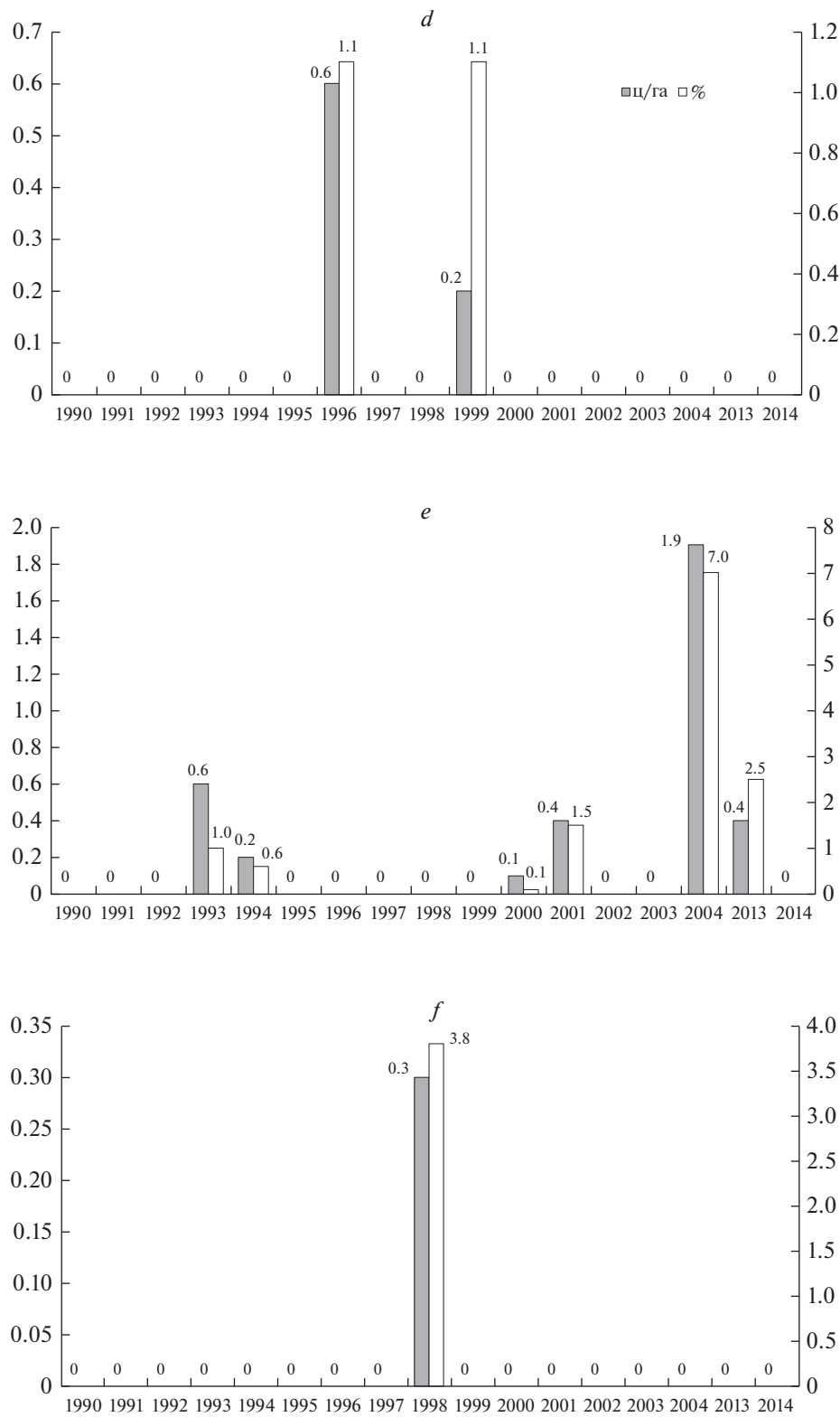


Рис. 3. Продолжение. / Fig. 3. Continuation.

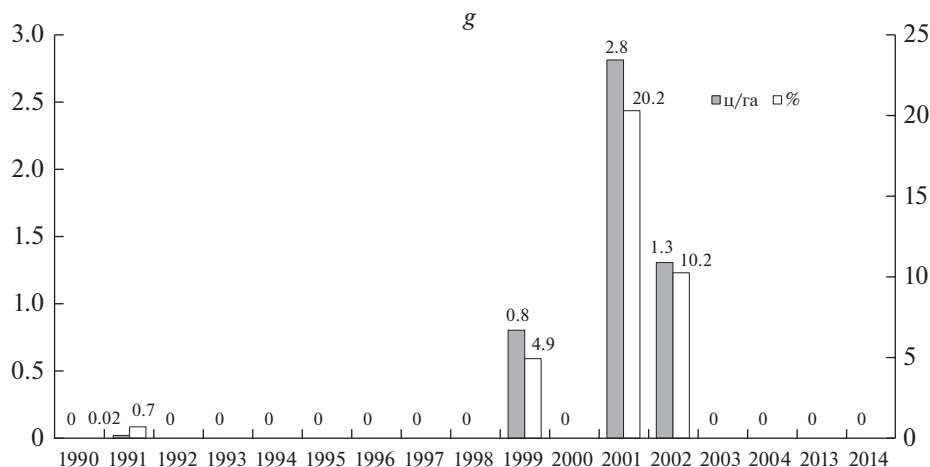


Рис. 3. Окончание. / Fig. 3. Ending.

телем его адаптивного потенциала, устойчивости к антропогенным нагрузкам.

Если учитывать оптимум экологических и фитоценологических условий произрастания *E. repens*, то виолентные качества вида, т.е. способность к энергичному захвату территории, полнота использования ресурсов, конкурентное подавление соперников, в большей степени должны проявляться на отвалах, сложенных четвертичными отложениями, что и показали результаты выполненного исследования. Пермские отложения из-за высокого процента крупнообломочной фракции в составе почвогрунтов, отсутствия гумусового слоя менее благоприятны для произрастания данного вида.

Таким образом, включение *E. repens* в качестве дополнительного компонента в состав злаковых и бобово-злаковых травосмесей на отвалах, сложенных четвертичными и пермскими отложениями, является перспективным для использования его в Кузбассе при восстановлении земель, нарушенных при открытом способе добычи угля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение особенностей поведения агропопуляций пырея ползучего *Elytrigia repens* (L.) Nevski. s.l, проведенное в течении 25 лет в сообществах, созданных на спланированных вскрышных породных отвалах разреза “Листвянский”, расположенных в лесостепной зоне Кузбасса (15 км к юго-западу от г. Новокузнецка), позволяет отметить следующее.

В новых для себя экологических условиях вид относится к группе длительноживущих. Более 25 лет встречается в составе растительных сообществ как на отвалах сложенных четвертичными, так и пермскими отложениями, которые по ГОСТу [1] относят к малопригодным для рекультивации. Участие *E. repens* в сложении травостоя невелико:

чаще является ассектатором, в отдельные годы ведет себя как содоминант. Плотность в разные годы в разных агрофитоценозах и на участках естественного зарастания изменяется от 0.1 до 32.7 экз./м², проективное покрытие соответственно от 0.01 до 12%. Генеративные побеги появляются на второй, третий годы жизни во всех изучаемых сообществах, высота их варьирует от 17 до 155 см. Не образует мощных дерновин, чаще всего формирует систему из 4–6 однобоговых молодых генеративных парциальных кустов. Онтогенетические спектры агропопуляций *E. repens*, начиная с первых лет жизни агрофитоценозов, нормальные, дефинитивные, неполночленные, левосторонние с максимумом на группах вегетативных или молодых генеративных особей. Среднее многолетнее значение воздушно-сухой надземной фитомассы *E. repens* составило на четвертичных отложениях 2.3 ± 1.1 ц/га, на пермских — 0.9 ± 0.6 ц/га. Проявляя в основном патентные качества, вид достаточно стабилен, устойчив и способен длительное время присутствовать в составе агрофитоценозов, становясь в оптимальные годы виолентом.

Включение *E. repens* в качестве дополнительного компонента в состав злаковых и бобово-злаковых травосмесей на породах разного геологического возраста является перспективным для рекультивации земель, нарушенных при открытом способе добычи угля в Кузбассе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН № AAAA-A21-121011290024-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 17.5.3.05-84. 2002. Рекультивация земель. Охрана природы, земли. М. С. 56–59.
2. Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. 2010. Агрофитоценозы на отвалах в южной части Кузнецкой котловины. Новосибирск. 224 с.
3. Шеремет Н.В., Ламанова Т.Г. 2017. Особенности структуры и жизненность агропопуляций *Agropyron cristatum* (Poaceae) на отвалах в лесостепи Кузнецкой котловины. — Раст. ресурсы. 53(1): С. 88–104. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37315148>
4. Жукова Л.А. 1980. Пырей ползучий (*Agropyron repens* (L) P. B.). — В кн.: Диагнозы и ключи возрастных состояний луговых растений. Ч. 1. Однодольные. Злаки. М. С. 99–108.
5. Справочник по кормопроизводству. 1985. М. 413 с.
6. Цвелев Н.Н., Пробатова Н.С. 2019. Злаки России. Москва. 646 с.
7. Денисов Г.В. 1983. Травосеяние в зоне вечной мерзлоты (эколого-биологические основы). Новосибирск. 240 с.
8. Многолетние травы в лугопастбищных севооборотах. 1951. М. 493 с.
9. Растения сенокосов и пастбищ. 1974. М. 195 с.
10. Андреев Н.Г. 1966. Луководство. М. 511 с.
11. Carrington L.P., Diaz A. 2011. An Investigation into the Effect of Soil and Vegetation on the Successful Creation of a Hay Meadow on a Clay-Capped Landfill. — Restoration Ecology. 19(1): 93–100. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00533.x>
12. Cavender N., Byrd S., Bechtoldt C.L., Bauman J.M. 2014. Vegetation Communities of a Coal Reclamation Site in Southeastern Ohio. — Northeastern Naturalist. 21(1): 31–46. <https://doi.org/10.1656/045.021.0104>
13. Rasmussen I. A., Melander B., Askegaard M., Kristensen K., Olesen J. 2014. *Elytrigia repens* population dynamics under different management schemes in organic cropping systems on coarse sand. — European J. Agronomy. 58: 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.04.003>
14. Winkler J., Koda E., Skutnik Z., Černý M., Adamcová D., Podlasek A., Vavřková M.D. 2021. Trends in the succession of synanthropic vegetation on a reclaimed landfill in Poland. — Anthropocene. 35: 100299. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100299>
15. Миронычева-Токарева Н.П. 1998. Динамика растительности при зарастании отвалов на примере КАТЭКа. Новосибирск. 172 с.
16. Чибрик Т.С., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. 2011. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель. Екатеринбург. 268 с.
17. Трофимов С.С. 1975. Экология почв и почвенные ресурсы Кемеровской области. Новосибирск. 299 с.
18. Ценопопуляции растений (основные понятия и структура). 1976. М. 217 с.
19. Ценопопуляции растений (развитие и взаимоотношения). 1977. М. 183 с.
20. Жукова Л.А. 1995. Популяционная жизнь луговых растений. Йошкар-Ола, 224 с.
21. Куркин К.А. 1976. Системные исследования лугов. М. 284 с.
22. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П. 1996. Подземные органы растений в травяных экосистемах. Новосибирск. 128 с.
23. Глухов А.З., Хархота А.И., Прохорова С.И., Агурова И.В. 2011. Стратегии популяций растений в техногенных экосистемах. — Промышл. ботаника. 11: 3–13. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37315148>
24. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. 2012. Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа. 488 с.

State of *Elytrigia repens* (Poaceae) Agronomic Populations on Spoil Banks in the Forest–Steppe Zone (Kemerovo Region)

N. V. Sheremet^a, *, T. G. Lamanova^a

^a Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*e-mail: nsheremet@yandex.ru

Abstract—The article presents the results of an original research on long-rhizomed perennial *Elytrigia repens* (L.) Nevski (Poaceae) agronomic populations on the levelled spoil banks of the Kuznetsk Basin. Based on long-term observations (1990–2014), *E. repens* projective cover, density and morphological parameters, ontogenetic structure, and phytomass were determined for seven artificial and two spontaneous plant communities. It was established, that under new environmental conditions, the species is a long-living one, with lifespan exceeding 25 years. The average above-ground phytomass reaches 230 ± 110 kg/ha on spoil banks with Quaternary deposits, and 90 ± 60 kg/ha on Permian deposits. Ontogenetic spectra were found to be normal, de-

finitive, incomplete, left-sided with maximum at the generative stage. The analysis of eco-phytocoenotic strategies shows that *E. repens* acts as an ecotopic patient or stress-tolerator and, in the optimal years, as a violent as well. The research demonstrates the efficiency of *E. repens* for reclamation of open-cut spoil banks.

Keywords: *Elytrigia repens*, agropopulations, projective cover, density, ontogenetic structure, phytomass, open-cut spoil banks, Kuznetsk Basin

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the State assignment to the Central Siberian Botanical Garden, SB RAS № AAAA-A21-121011290024-5.

REFERENCES

1. [GOST 17.5.3.05-84. Reclamation of land. Conservation of nature, land.] Moscow. P. 56–59. (In Russian)
2. Lamanova T.G., Sheremet N.V. 2010. [Agrophytocoenoses on the spoil banks in the southern part of the Kuznetsk Basin]. Novosibirsk. 224 p. (In Russian)
3. Sheremet N.V., Lamanova T.G. 2017. Structural specificity and vitality of agropopulations of *Agropyron cristatum* (Poaceae) on spoil dumps in the forest-steppe zone of Kuznetsk basin. — Rastitelnye resursy. 53(1): 88–104. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28949840> (In Russian)
4. Zhukova L.A. 1980. [Wheatgrass (*Agropyron repens* (L) P. B)]. — In: [Diagnoses and keys of age-related states of meadow plants. Part 1. Monocotyledons. Cereals]. Moscow. P. 99–108. (In Russian)
5. [Feeds Production Handbook]. 1985. Moscow. 413 p. (In Russian)
6. Tzvelev N.N., Probatova N.S. Grasses of Russia. Moscow. 2019. 646 p. (In Russian)
7. Denisov G.V. 1983. [Grass planting in the permafrost zone (ecological and biological basics)]. Novosibirsk. 240 p. (In Russian)
8. [Perennial grasses in grassland crop rotations]. 1951. Moscow. 493 p. (In Russian)
9. [Plants of hayfields and pastures]. 1974. Moscow. 195 p. (In Russian)
10. Andreev N.G. 1966. [Meadow farming]. Moscow. 511 p. (In Russian)
11. Carrington L.P., Diaz A. 2011. An Investigation into the Effect of Soil and Vegetation on the Successful Creation of a Hay Meadow on a Clay-Capped Landfill. — Restoration Ecology. 19(1): 93–100. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00533.x>
12. Cavender N., Byrd S., Bechtoldt C.L., Bauman J.M. 2014. Vegetation Communities of a Coal Reclamation Site in Southeastern Ohio. — Northeastern Naturalist. 21(1): 31–46. <http://dx.doi.org/10.1656/045.021.0104>
13. Rasmussen I.A., Melander B., Askegaard M., Kristensen K., Olesen J. 2014. *Elytrigia repens* population dynamics under different management schemes in organic cropping systems on coarse sand. — European J. Agronomy. 58: 18–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2014.04.003>
14. Winklera J., Koda E., Skutnik Z., Černý M., Adamcová D., Podlasek A., Vaverková M.D. 2021. Trends in the succession of synanthropic vegetation on a reclaimed landfill in Poland. — Anthropocene. 35: 100299. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100299>
15. Mironycheva-Tokareva N.P. [Dynamics of vegetation during overgrowth of dumps by the example of KATEK]. Novosibirsk. 172 p. (In Russian)
16. Chibrik T.S., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. 2011. [Ecological bases and experience of biological recultivation of industrially disturbed lands]. Ekaterinburg. 268 p. (In Russian)
17. Trofimov S.S. 1975. [Soil ecology and soil resources of the Kemerovo region]. Novosibirsk. 299 p. (In Russian)
18. [Plant coenopopulations (basic concepts and structure)]. 1976. Moscow. 217 p. (In Russian)
19. [Cenopopulations of plants (development and interrelations)]. 1977. Moscow. 133 p. (In Russian)
20. Zhukova L.A. 1995. [Population life of meadow plants] Yoshkar-Ola, 224 p. (In Russian)
21. Kurkin K.A. 1976. [Systematic studies of meadows]. Moscow. 284 p. (In Russian)
22. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P. [Underground organs of plants in herbal ecosystems]. Novosibirsk. 128 p. (In Russian)
23. Glukhov A.Z., Kharkhota A.I., Prokhorova S.I., Agurova I.V. 2011. Plant population strategies in technogenic ecosystems. — Industrial botany. 11: 3–13. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37315148> (In Russian)
24. Mirkin D.M., Naumova L.G. 2012. [Modern state of the vegetation science basic concepts]. Ufa. 488 p. (In Russian)

**АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ**

**ФОРМИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПРИ ЛЕСНОЙ
РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНОГО КАРЬЕРА
В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ**© 2022 г. Е. Э. Костина¹*, Г. В. Ахметова¹, А. Н. Пеккоев¹, **В. А. Харитонов¹**, А. М. Крышень¹¹Институт леса — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”,
г. Петрозаводск, Россия

*e-mail: kostina@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 06.05.2022 г.

После доработки 10.06.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

Проанализировано состояние биогеоценозов, созданных в ходе искусственного лесовосстановления, через 30 лет после посадки *Pinus sylvestris* в двух вариантах рекультивации — без улучшения свойств песчано-гравийного субстрата и с добавлением в него торфа (торфяной смеси). В первом варианте сообщество представлено сосняком лишайниковым 5 класса бонитета, со слабо развитым живым напочвенным покровом и доминированием лишайников *Cladonia* spp. и *Stereocaulon tomentosum*. В этих условиях формируются почвы, находящиеся к моменту исследования на начальных стадиях почвообразования — псаммоземы серогумусовые. Выявлено, что рекультивация, сводящаяся только к посадке древесных растений (сосны), не способствовала ускоренному формированию полноценного биогеоценоза. Применение для рекультивации органического вещества в виде торфяного субстрата (второй вариант) привело к развитию более высокопроизводительного биоценоза (на 3 класса бонитета). Отмечено более высокое видовое разнообразие напочвенного покрова и формирование более сложноорганизованных почв — серогумусовых реплантозем. При абсолютно равных начальных условиях восстановления почвы и растительности, добавление в субстрат торфа явилось решающим фактором, определившим дальнейший путь развития биогеоценоза. Торф повышает плодородие исходного минерального субстрата, улучшая его химические и физические свойства, и является источником диаспор многих аборигенных лесных и болотных видов растений.

Ключевые слова: песчано-гравийный карьер, рекультивация, *Pinus sylvestris* L., биоразнообразие, восстановление растительности, почвообразование

DOI: 10.31857/S0033994622030074

В результате добычи полезных ископаемых открытым способом происходит удаление почвенного покрова и растительности, изменение рельефа, что приводит к коренному преобразованию условий местопроизрастания. Восстановление биогеоценозов на подобных техногенных землях происходит по типу первичной сукцессии и на начальных стадиях зависит от множества внешних факторов [1–4]. Для полного восстановления естественной растительности на таких территориях, особенно на малопродуктивных грунтах, требуется длительное время [5]. В северных широтах при восстановлении почвенно-растительного покрова отмечают особенно затянутые первоначальные сукцессионные стадии [4, 6–10]. Значительное ускорение процессов восстановления нарушенного растительного покрова в таежной зоне возможно при использовании методов лесной рекультивации. В мире к настоящему вре-

мени накоплен значительный опыт по вопросам искусственного восстановления нарушенных земель [11–16]. Прогноз эффективности восстановления исходной растительности базируется на знаниях о закономерностях естественного формирования сообществ на минеральных субстратах [6, 17–21], роста и устойчивости искусственных насаждений [22–24] и определяется особенностями подготовки участка перед созданием лесных культур [25–27].

В настоящее время на территории Республики Карелия нарушенные земли занимают 13,4 тыс. га [28]. В данной категории земель в Карелии наиболее распространены небольшие (до 3 га) карьеры по добыче песчано-гравийного материала (ПГМ). Для рекультивации таких объектов рекомендуется создавать лесные культуры [29, 30]. Однако вопросы рекультивации карьеров в республике остаются малоизученными [29, 31–33], а сведе-

ния о региональных особенностях естественного восстановления почвенно-растительного покрова являются важным элементом успешного восстановления нарушенных территорий [34]. Успешное выращивание древостоев имеет не только экологическое, но и экономическое значение с учетом стратегий развития района.

Целью данной работы было выявление особенностей формирования почвенно-растительного покрова на минеральном субстрате и при внесении торфа при проведении лесной рекультивации песчано-гравийного карьера.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом изучения служил карьер по добыче песчано-гравийного материала (урочище “Лосинный карьер”), площадью около 6 га, расположенный в Кондопожском районе Республики Карелия (координаты: 62.101917° N, 33.969944° E). Район исследования расположен в денудационно-тектоническом грядовом типе ландшафта среднетаежной подзоны Восточной Фенноскандии. Четвертичные отложения представлены флювиогляциальными формами рельефа — узкими озовыми грядами, сложенными песками и гравием. Климат территории умеренно-континентальный. Среднегодовая температура 3.1 °C, сумма осадков — 600–650 мм [35].

Территория относится к Заонежскому флористическому району, отличающемуся богатой флорой и разнообразием растительности [36]. Наиболее распространены ельники и сосняки черничные, восстанавливающиеся через стадию доминирования лиственных пород, на возвышенных сухих местообитаниях — сосняки брусничные [37].

Ненарушенный участок леса с естественным почвенно-растительным покровом, фактически представляющий собой растительное сообщество, существовавшее на данной территории до начала разработки карьера — сосняк брусничный, расположен на оставшейся части оза (высота участка — около 10 м относительно уровня дна карьера). В древесном ярусе произрастают *Pinus sylvestris* L., значительно реже *Betula pubescens* Ehrh. (10C + B); в травяно-кустарничковом ярусе — *Vaccinium vitis-idaea* L. (40%), *V. myrtillus* L. (5%), *Avenella flexuosa* (L.) Drejer (1%), единично — *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Diphasiastrum complanatum* (L.) Hollub и *Luzula pilosa* (L.) Willd.; в мохово-лишайниковом — *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. (10%), *Dicranum polysetum* Sw. (3%), *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. (2%). Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова составляет 60%. Относительно низкие показатели проективного покрытия живого напочвенного покрова, возможно, связаны с тем, что здесь около 10 лет назад

прошел беглый низовой пожар, повредивший живой напочвенный покров, который к моменту исследований не успел полностью восстановиться.

Для достижения цели исследования проводилась оценка влияния субстрата на рост культур сосны, состав и структуру живого напочвенного покрова, характер и степень проявления почвообразовательных процессов. В мае 1991 г. на предварительно выровненном участке выработанной части карьера на площади 2 га сотрудниками Института леса КарНЦ РАН и работниками Кончезерского лесничества проведены опытно-производственные посадки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), однолетними тепличными сеянцами с открытой корневой системой с исходной густотой 5.0 тыс. шт./га. Ширина междурядий — 2.5–3 м, шаг посадки — 0.7–1.0 м. На части участка (около 0.5 га) посадки осуществлялись в песчаный техногенный субстрат, на поверхность которого дополнительно вносился торфяной субстрат¹. В 2021 г. проведено исследование состояния древостоя и напочвенного покрова на постоянных пробных площадях (ПП) Института леса КарНЦ РАН, размером 25×40 м каждая (рис. 1):

ПП 1 — культуры средней сохранности, сформированные на песчано-гравийном субстрате без внесения торфяного субстрата (рис. 2a);

ПП 2 — культуры высокой сохранности, сформированные на песчано-гравийном субстрате без внесения торфяного субстрата (рис. 2b);

ПП 3 — культуры высокой сохранности, сформированные на песчано-гравийном субстрате с поверхностным внесением торфяного субстрата (рис. 2c).

С целью исключения влияния особенностей рельефа на процессы восстановления растительности было выполнено предварительное инструментальное геодезическое исследование местности с применением стандартного геодезического оборудования (теодолит 2Т30), которое показало отсутствие значимых неровностей в рельефе опытных участков.

На постоянных пробных площадях проведен сплошной пересчет деревьев по диаметру с точностью 0.1 см, измерены высоты у 20–25 модельных деревьев различных ступеней толщины высотометром Suunto-PM5 с точностью 0.25 м. Сохранность лесных культур на пробных площадях определялась как отношение количества жизнеспособных растений на момент исследования к исходной густоте культур и выражалась в процентах.

¹ По причине того, что осуществлялись опытно-производственные посадки сосны, происхождение и точный объем торфа нам неизвестны и документально не подтверждены. Далее в тексте при обозначении данного вида субстрата мы используем термин “торфяной субстрат”.



Рис. 1. Схема расположения постоянных пробных площадей в карьере по добыче ПГМ (источник исходного фото: <https://yandex.ru/maps>).

Fig. 1. The layout of permanent sample plots on reclaimed sand and gravel pit (source of original photo: <https://yandex.ru/maps>).



Рис. 2. 30-летние культуры сосны, созданные в карьере по добыче ПГМ: *a* – ПП 1; *b* – ПП 2; *c* – ПП 3.

Fig. 2. 30-year-old pine artificial stands on reclaimed sand and gravel pit: *a* – SP 1*; *b* – SP 2; *c* – SP 3. * here and further: SP – sample plot.

Геоботаническое описание живого напочвенного покрова включало в себя выявление полного видового состава в пределах каждой ПП и оценку среднего проективного покрытия живого напочвенного покрова в целом и каждого вида по отдельности. Для оценки среднего проективного покрытия на каждой ПП закладывали по 5 площадок размером 1×1 м. Названия видов, а также их принадлежность к аборигенной или адвентивной фракции флоры приведены в соответствии с “Конспектом флоры Карелии” [38]. Для аборигенных видов приводится эколого-ценотическая характеристика по М.Л. Раменской [35]. Экологическая характеристика приводится с сайта www.plantarium.ru [39], где она дана с учетом экологических шкал Г. Элленберга [40, 41], Е. Ландольта [42] и Д.Н. Цыганова [43].

На каждой ПП были заложены почвенные разрезы в четырехкратной повторности. Проведено морфологическое описание почв и отобраны образцы по горизонтам почв в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017.

В почвенных образцах определяли физико-химические характеристики общепринятыми методами [44]. Анализы выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”. Названия почв даны в соответствии с классификацией почв России [45, 46].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Морфологические и физико-химические свойства почв

Почвы всех пробных площадей характеризуются маломощным профилем (до 30–35 см), песчаным гранулометрическим составом и отличаются сильной каменистостью: содержание скелетной части составляет более 50–60%, в отдельных случаях доходит до 90%. Проведенные исследования показали, что почвы, сформированные на участках без внесения торфа (ПП 1 и 2) и с внесением торфяного субстрата (ПП 3), значительно разли-

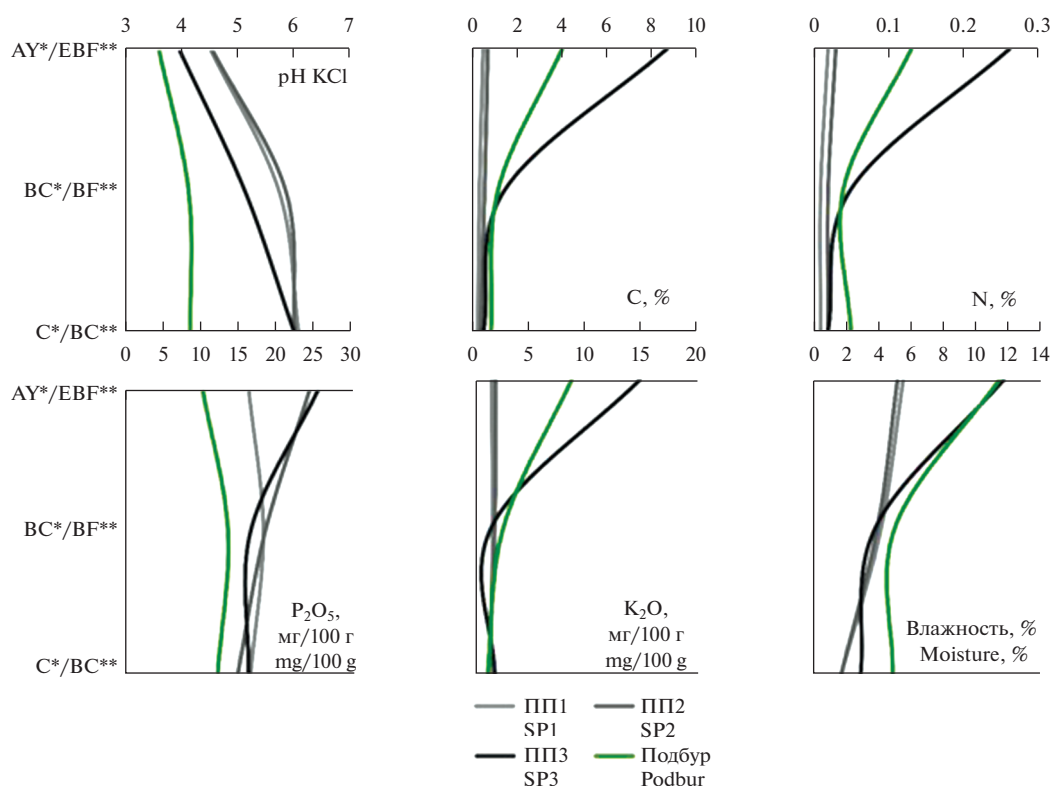


Рис. 3. Физико-химические свойства изучаемых почв. * — индекс горизонта для почв ПП1-3, ** — индекс горизонта подбур.

Fig. 3. Physical and chemical properties of the studied soils. * — horizon index for soils SP 1-3, ** — podbur horizon index

чаются, как по морфологическим, так и по физико-химическим свойствам.

Почвы ПП 1 и 2 имеют небольшую мощность (15–20 см), профиль слабо дифференцирован на горизонты, на поверхности формируется дискретный тонкий слой лесной подстилки. Верхний минеральный слой почвы пропитан гумусом. В почвах ПП 2 отмечается наличие обломков шунгитсодержащих пород. Рассматриваемые почвы можно классифицировать как псаммоземы серогумусовые.

На ПП 3 почвообразовательными процессами преобразован более мощный слой песчано-гравийных отложений — около 30–35 см, отмечено формирование задерненной лесной подстилки небольшой мощности (1–2 см). Торф, использованный в качестве дополнительного субстрата, в настоящее время морфологически не проявляется. Накопление органического вещества за счет разложившегося торфа и поступающего опада способствовало более интенсивному прокрашиванию верхнего минерального слоя и формированию водопрочной комковато-ореховатой структуры. Почва классифицирована как реплантозем серо-гумусовый на торфяно-минеральной смеси.

На ненарушенном, прилегающем к карьеру, участке леса, в условиях сосняка брусничного

формируются подбурья оподзоленные иллювиально-железистые песчаные (Entic Podzols Arenic по классификации WRB) на водно-ледниковых песчаных сильнокаменистых отложениях.

Физико-химические свойства изучаемых почв различаются в зависимости от характера субстрата, на котором они формируются (рис. 3). Показатели кислотности почв ПП 1 и 2 имеют сходные значения, верхние горизонты характеризовались слабокислой реакцией (pH_{KCl} — 4.5–5), вниз по профилю кислотность снижалась (pH_{KCl} — 6). Верхние горизонты почв ПП 3 отличались более высокими показателями кислотности (pH_{KCl} — 4), по сравнению с ПП 1 и 2, тем не менее, вниз по профилю эти значения также снижаются до pH_{KCl} равной 6. В то время как для почв ненарушенного лесного участка (подбур) характерна типичная для зональных почв [47] кислая и сильнокислая реакция (pH_{KCl} от 3.7 до 4.2). Показатели влажности всех горизонтов почв ПП 1 и 2 очень низкие — 5–6%, тогда как лесная подстилка ПП 3 способствует лучшему сохранению влаги верхнего слоя почвы и имеет значения влажности, сходные с характерными для естественных почв — 10–12%.

Содержание органического вещества в минеральных горизонтах исследуемых почв (рис. 3)

также сильно варьировало в зависимости от условий формирования. Минимальные значения содержания углерода характерны для псаммозема ПП 1 (до 0.5–1%), в почве ПП 2 доля органического вещества немного выше — 0.7–1.3%, что, вероятно, связано с шунгитсодержащими включениями. В реплантоземе ПП 3 отмечен довольно высокий уровень углерода — до 15% в серогумусовых горизонтах, распределение его по профилю почв носит регрессивно-аккумулятивный характер, то есть резко снижается с глубиной (до 1%). Отношение C/N, показывающее обогащение органического вещества азотом и темпы минерализации, довольно широкие — 20–30, то есть минерализация идет замедленными темпами и продуцируется небольшое количество азота. Особенности содержания и профильного распределения общего азота в изучаемых почвах сходно с выявленными закономерностями, описанными для органического вещества. Очень низкий уровень обеспеченности азотом отмечен в минеральных горизонтах псаммоземов ПП 1 и 2. Для реплантозема ПП 3 характерно содержание его в верхних гумусированных горизонтах до 0.2–0.4%.

Содержание подвижного фосфора (рис. 3) в верхнем горизонте изменялось в зависимости от условий формирования почвы от 15 до 25 мг/100 г почвы. В почве ненарушенного лесного участка оно было более низким — 10 мг/100 г. Пространственное и профильное распределение подвижного калия в исследуемых почвах сильно различалось, его минимальный уровень в верхнем горизонте наблюдался в псаммоземах ПП 1 и 2 — 1–3 мг/100 г почвы (рис. 3). Наиболее высокое накопление калия не только в лесной подстилке, но в серогумусовых горизонтах выявлено в реплантоземе ПП 3.

Формирование живого напочвенного покрова

В живом напочвенном покрове на всех ПП выявлено 63 вида, из них 11 видов лишайников, 6 — мхов и 46 — сосудистых растений (табл. 1). Большинство видов сосудистых растений (43–94%) являлись аборигенными.

На двух участках без внесения торфа (ПП 1 и 2) из древесных видов отмечены: в подлеске — редко — ива (*Salix caprea*, *S. myrsinifolia*) до 0.3 м высотой, по одному экземпляру ольхи серой (*Alnus incana*) и осины (*Populus tremula*). В подросте выявлены единичные всходы и сеянцы ели (*Picea abies*) и березы (*Betula pubescens*) высотой до 0.1 м. На ПП 3 в подлеске произрастали *Padus avium*, *Salix myrsinifolia*, *S. phylicifolia*, *Sorbus aucuparia*, в подросте — *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens* и *B. pendula*.

На ПП 1 общее проективное покрытие живого напочвенного покрова составляло 60%, преобладали лишайники *Stereocaulon tomentosum* (30%) и

виды рода *Cladonia* (30%). Единично произрастали 6 видов сосудистых растений (*Antennaria dioica*, *Avenella flexuosa*, *Chamaenerion angustifolium*, *Pilosella officinarum*, *Poa annua*, *Vaccinium vitis-idaea*) и 1 вид мхов (*Polytrichum juniperinum*).

На ПП 2 отмечено 12 видов лишайников, 4 вида сосудистых растений (*Calluna vulgaris*, *Chamaenerion angustifolium*, *Poa annua*, *Vaccinium vitis-idaea*) и 4 вида мхов (*Niphotrichum canescens*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum juniperinum*, *Rhytidiadelphus triquetrus*). В живом напочвенном покрове преобладали лишайники — виды рода *Cladonia* (30%) и *Stereocaulon tomentosum* (20%). Остальные виды отмечены единично.

На участке с внесением торфа (ПП 3) в живом напочвенном покрове выявлено 35 видов сосудистых растений, 7 видов мхов (*Dicranum polysetum*, *D. scoparium*, *Hylocomium splendens*, *Niphotrichum canescens*, *Pleurozium schreberi*, *Polytrichum juniperinum*, *Rhytidiadelphus triquetrus*) и 1 вид лишайников (*Cladonia cornuta*). ОПП живого напочвенного покрова достигало 90%. Наибольшим проективным покрытием отличались *Calamagrostis arundinacea*, *Deschampsia cespitosa*, *Filipendula ulmaria*, *Vaccinium myrtillus* (по 10%).

Подавляющее большинство видов сосудистых растений живого напочвенного покрова, отмеченных на всех ПП, являются аборигенными — 36 видов (92%). Доля синантропных видов составляет 51%. Среди них 17 апофитов и 3 адвентивных вида (*Alchemilla subcrenata*, *Poa annua* и *Leucanthemum ircutianum*). Два первых заносятся человеком непреднамеренно и являются натурализовавшимися видами, способными внедряться в полустественные и естественные сообщества. Последний вид распространяется самостоятельно по вторичным биотомам [38]. *Poa annua* отмечен на ПП 1 и 2, два других — только на участке с добавлением торфа (ПП 3).

Эколого-ценотический анализ аборигенной фракции видового состава травяно-кустарничкового яруса показал, что большая часть видов (30 видов — 86%), произрастающих на всех ПП, являются лесными (рис. 4). На участках без добавления торфа (ПП 1 и 2) отмечены те лесные виды, которые в естественных условиях произрастают преимущественно в сухих сосняках на малоплодородных почвах — *Antennaria dioica*, *Calluna vulgaris*, *Pilosella officinarum* и *Vaccinium vitis-idaea*, а также 2 вида (*Avenella flexuosa*, *Chamaenerion angustifolium*), характерные для более богатых сосняков. На участке с добавлением торфа (ПП 3) большинство видов (22 вида — 63%) являлись лесными, среди которых преобладали виды более богатых лесов. Это представители сосняков — 11 видов — 31% (*Anthriscus sylvestris*, *Avenella flexuosa*, *Calamagrostis arundinacea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Cirsium heterophyllum*, *Fragaria vesca*, *Geranium*

Таблица 1. Видовой состав и проективное покрытие живого напочвенного покрова на участках с посадками сосны обыкновенной в карьере по добыче ПГМ с внесением торфа и без него

Table 1. Species composition and projective cover of living ground vegetation on sand and gravel pit plots reforested with Scots pine on soils with or without peat improvement

Виды Species	Карьер, № ПП Quarry, № SP			Естественное лесное сообщество Natural forest community	ЭЦГ ECG	Экологические группы по шкалам Ecological groups		
	1	2	3			свет light	влажность moisture	почвенное богатство soil fertility
Сосудистые растения Vascular plants								
<i>Aegopodium podagraria</i> L.	0	0	5	0	1*	C-Cu/S-Sci	M	Эв/Ев
<i>Agrostis capillaris</i> L.	0	0	+	0	6*	C-Гел/S-Hel	M	Ме-Ол/Ме-Ол
<i>Alchemilla subsrenata</i> Bus.	0	0	+	0	adv/adv	Гел/Hel	M	Ме-Ол/Ме-Ол
<i>Antennaria dioica</i> (L.) Gaertn.	1	0	0	0	3	C-Гел/S-Hel	K-M/X-M	Ме-Ол/Ме-Ол
<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	0	0	+	0	6*	Гел/Hel	K-M/X-M	Ме-Ол/Ме-Ол
<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	0	0	5	0	2*	Гел/Hel	M	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drej.	+	0	5	1	2	C-Гел/S-Hel	K-M/X-M	Ол/Ол
<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth	0	0	10	0	2*	C-Cu/S-Sci	M	Ме
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	0	1	0	+	3	Гел/Hel	K-M/X-M	Ол/Ол
<i>Campanula rotundifolia</i> L.	0	0	+	0	4	Гел/Hel	M	Ме-Ол/Ме-Ол
<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	+	+	5	0	2*	Гел/Hel	M-Г/М-Н	Эв/Ев
<i>Cirsium heterophyllum</i> (L.) Hill	0	0	3	0	2	C-Гел/S-Hel	M-Г/М-Н	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Coccyanthe flos-cuculi</i> (L.) Fourr.	0	0	+	0	5*	Гел/Hel	M-Г/М-Н	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Convallaria majalis</i> L.	0	0	4	0	1	Гел/Hel	M	Ме
<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) Beauv.	0	0	10	0	6*	C-Гел/S-Hel	M-Г/М-Н	Ме
<i>Diphastastrum complanatum</i> L.	0	0	0	+	3	Гел/Hel	K-M/X-M	Ол/Ол
<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P. Fuchs	0	0	5	0	4*	C-Cu/S-Sci	M-Г/М-Н	Ме
<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	0	0	10	0	5	C-Гел/S-Hel	Г/Н	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Fragaria vesca</i> L.	0	0	+	0	2*	C-Гел/S-Hel	M	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Galium mollugo</i> L.	0	0	1	0	6*	C-Гел/S-Hel	M	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Geranium silvaticum</i> L.	0	0	2	0	2	C-Гел/S-Hel	M-Г/М-Н	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Lathyrus vernus</i> (L.) Bernh.	0	0	+	0	1	Cu/Sci	M	Ме-Эв/Ме-Ев
<i>Leucanthemum ircutianum</i> Turcz. Ex DC	0	0	+	0	adv/adv	Гел/Hel	K-M/X-M	Ме
<i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.	0	0	0	+	2	C-Cu/S-Sci	M	Ме
<i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W. Schmidt	0	0	1	0	2	C-Cu/S-Sci	M	Ме

Таблица 1. Продолжение / Table 1. Continuation

Виды Species	Карьер, № ПП Quarry, № SP			Естественное лесное сообщество Natural forest community	ЭЦГ ECG	Экологические группы по шкалам Ecological groups		
	1	2	3			свет light	влажность moisture	почвенное богатство soil fertility
<i>Melampyrum sylvaticum</i> L.	0	0	2	0	2	C-Гел/S-Hel	M	Me
<i>Melica nutans</i> L.	0	0	+	0	1	C-Cu/S-Sci	M-Г/M-H	Me
<i>Oxalis acetosella</i> L.	0	0	5	0	1	Cu/Sci	M-Г/M-H	Me
<i>Orthilia secunda</i> (L.) House	0	0	1	0	4	C-Гел/S-Hel	M	Me-Ол/Me-Ол
<i>Pilosella officinarum</i> F. Schultz et Sch. Bip.	1	0	0	0	3*	C-Гел/S-Hel	K-M/X-M	Me
<i>Poa annua</i> L.	+	+	0	0	алв/adv	C-Гел/S-Hel	M	Эв/Эу/Me-Eu
<i>Ranunculus acris</i> L.	0	0	+	0	6*	Гел/Hel	M	Me
<i>Rosa acicularis</i> Lindl.	0	0	1	0	2	C-Гел/S-Hel	M	Me
<i>Rubus saxatilis</i> L.	0	0	+	0	2	C-Гел/S-Hel	M-Г/M-H	Me-Эв/Me-Eu
<i>Stellaria graminea</i> L.	0	0	+	0	7*	Гел/Hel	M	Me
<i>Trollius europaeus</i> L.	0	0	+	0	6*	Гел/Hel	M-Г/M-H	Me
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	0	0	10	5	1	C-Гел/S-Hel	M	Me
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	1	1	5	40	4	C-Гел/S-Hel	M	Me-Ол/Me-Ол
<i>Veronica officinalis</i> L.	0	0	+	0	3*	C-Гел/S-Hel	M	Me-Эв/Me-Eu
<i>Vicia cracca</i> L.	0	0	+	0	6*	Гел/Hel	M	Me-Эв/Me-Eu
<i>Viola canina</i> L.	0	0	+	0	6	C-Гел/S-Hel	M	Me
Подrost древесных растений Undergrowth of woody plants								
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	+	+	0	0	2	C-Гел/S-Hel	M-Г/M-H	Me
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	+	+	+	+	4	Гел/Hel	M	Me
<i>Betula pendula</i> Roth	0	0	+	0	4	Гел/Hel	M	Me
<i>Padus avium</i> Mill.	0	0	+	0	1	C-Гел/S-Hel	M-Г/M-H	Me-Эв/Me-Eu
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	+	+	+	0	4	C-Cu/S-Sci	M	Me
<i>Pinus sylvestris</i> L.	+	+	+	+	4	Гел/Hel	M	Me-Ол/Me-Ол
<i>Populus tremula</i> L.	+	+	0	0	4	Гел/Hel	M	Me
<i>Salix caprea</i> L.	+	+	0	0	2	C-Гел/S-Hel	M	Me
<i>Salix myrsinifolia</i> Salisb.	0	+	+	0	2	Гел/Hel	Г/H	Me
<i>Salix phylicifolia</i> L.	0	0	+	0	4	Cu/Sci	M-Г/M-H	Me
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	0	0	+	0	2	C-Cu/S-Sci	M	Me
Всего Total	12	11	43	8				
в т.ч. древесных растений including woody plants	6	7	8	2				

Таблица 1. Окончание / Table 1. Ending

Виды Species	Карьер, № ПП Quarry, № SP			Естественное лесное сообщество Natural forest community	ЭЦГ ECG	Экологические группы по шкалам Ecological groups		
	1	2	3			свет light	влажность moisture	почвенное богатство soil fertility
Лишайники Lichens								
<i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot.	10	10	0	0				
<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Web.	10	10	0	0				
<i>Cladonia stellaris</i> (Opiz) Pouzar et Vězda	10	10	0	0				
<i>Cladonia deformis</i> (L.) Hoffm.	+	+	0	0				
<i>Cladonia coniocraea</i> (Florke) Spreng.	+	+	0	0				
<i>Cladonia decorticata</i> (Florke) Spreng.	+	+	0	0				
<i>Cladonia verticillata</i> (Hoffm.) Schaer.	+	+	0	0				
<i>Cladonia</i> cf. <i>merochlorophaea</i> Asahina	+	+	0	0				
<i>Cladonia crispata</i> (Ach.) Flot.	+	+	0	0				
<i>Cladonia gracilis</i> subsp. <i>Turbinata</i> (Ach.) Ahti	5	+	0	0				
<i>Cladonia cornuta</i> (L.) Hoffm.	+	+	+	0				
<i>Stereocaulon tomentosum</i> Fr.	30	20	0	0				
Мхи Mosses								
<i>Dicranum polysetum</i> Sw.	0	0	+	3				
<i>Dicranum scoparium</i> Hedw.	0	0	4	0				
<i>Hypocnium splendens</i> (Hedw.) Br.	0	0	2	2				
<i>Niphotrichum canescens</i> (Hedw.) Bednarek-Ochyra & Ochyra	0	+	+	0				
<i>Polytrichum juniperinum</i> Hedw.	+	+	3	0				
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt	0	+	5	10				
<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i> (Hedw.) Warnst.	0	+	1	0				
Всего видов мхов и лишайников Total species of mosses and lichens	13	16	8	2				
Общее проективное покрытие Total projective cover	60	50	90	60				
Примечания. Знаком "+" отмечено проективное покрытие менее 1%; * – эвапофиты по сводке А.В. Кравченко [38]. Эколого-ценотические группы (ЭЦГ) приводятся по монографии М.Л. Раменской (1983): 1 – лесные эвтрофные мезогитрофиты сциофиты; 2 – лесные мезоолиготрофные мезозофиты сциофиты-семигелиофиты; 3 – лесные олиготрофные ксерофиты-гелиофиты; 4 – лесные виды с широкой экологической амплитудой; 5 – болотные эу-мезотрофы; 6 – луговые мезогитрофиты; 7 – прибрежные пресноводных водоемов; адв – адвентивный вид. Экологические группы. По отношению к свету: Гел – гелиофит, С-Гел – семигелиофит, С-Сц – сциофит; по отношению к влажности: К-М – ксеро-мезо-фит, М – мезофит, М-Г – мезо-гитроф, Г – гитрофит; по отношению к плодородию почвы: Ол – олиготроф, Ме-Ол – мезо-олиготроф, Ме – мезотроф, Ме-Эв – мезо-эв-троф, Эв – эвтроф. Note. The "+" sign marks the projective cover less than 1%; * – euarophytes by A.V. Kravchenko [38]. Ecological-coenotic groups (ECG) are given according to M.L. Ramenskaya monograph (1983): 1 – forest eutrophic meso-hygrophilous sciophilous species; 2 – forest meso-oligotrophic mesophilous sciophilous species; 3 – forest oligotrophic xerophilous heliophilous species; 4 – forest species with a wide ecological amplitude; 5 – meso-eutrophic mire species; 6 – meso-hygrophilous plants of meadows; 7 – species of freshwater shores, adv – advent species. Ecological groups. With respect to light: Hel – heliophilous, S-Hel – semi-heliophilous, S-Sci – semi-sciophilous, Sci – sciophilous; with respect to moisture: X-M – xero-mesophilous, M – mesophilous, M-H – meso-hygrophilous, H – hygrophilous, H-Hy – hygro-hydrophilous; with respect to soil fertility: Ol – oligotrophic, Me-Ol – meso-oligotrophic, Me – mesotrophic, Me-Eu – meso-eutrophic, Eu – eutrophic.								

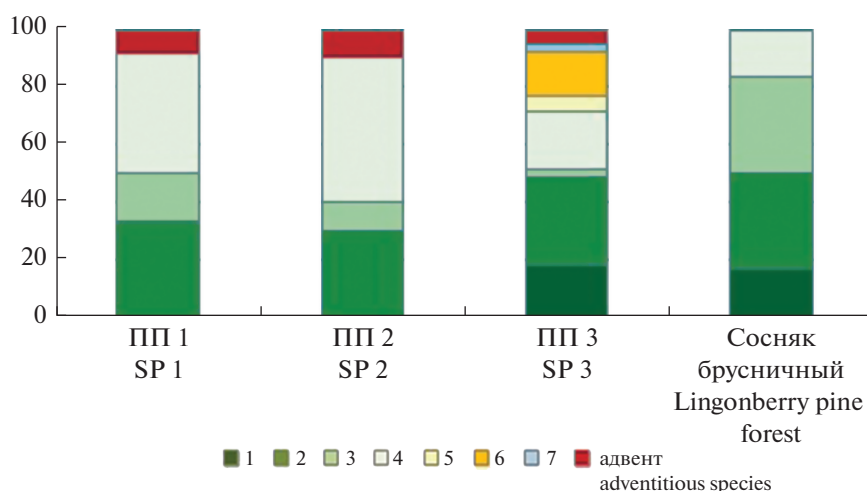


Рис. 4. Эколого-ценотическая структура видового состава сосудистых растений живого напочвенного покрова на участках с посадками сосны в карьере по добыче ПГМ и естественном лесном сообществе. По вертикали — относительное участие (в %) от абсолютного числа видов; Цифрами обозначены номера эколого-ценотических групп по М.Л. Раменской (1983). Полные названия — см. в обозначениях к таблице 1; адвент — адвентивный вид.

Fig. 4. Ecological and coenotic structure of living ground cover vascular plants species composition on sand and gravel pit plots reforested with Scots pine and in natural forest community. Y-axis — relative participation (%) of the total number of species; the numbers indicate the ecological and coenotic groups according to M.L. Ramenskaya (1983). See abbreviations in the notes to table 1.

silvaticum, *Maianthemum bifolium*, *Melampyrum sylvaticum*, *Rosa acicularis*, *Rubus saxatilis*) и ельников — 6 видов — 17% (*Aegopodium podagraria*, *Convallaria majalis*, *Lathyrus vernus*, *Melica nutans*, *Oxalis acetosella*, *Vaccinium myrtillus*). Еще 4 из выявленных лесных видов в естественных условиях могут произрастать в разных типах лесных сообществ. Кроме того, отмечено 8 луговых видов, 7 из которых являлись апофитами (*Agrostis capillaris*, *Anthoxanthum odoratum*, *Deschampsia cespitosa*, *Galium mollugo*, *Ranunculus acris*, *Trollius europaeus*, *Vicia cracca*), 1 вид прибрежных (*Stellaria graminea*) и 2 вида переувлажненных местообитаний (*Coccyganthus flos-cuculi*, *Filipendula ulmaria*). Все они, за исключением *Filipendula ulmaria*, являются апофитами. В естественном лесном сообществе предсказуемо преобладали виды, характерные для сосновых лесов.

В сложении общего проективного покрытия (ОПП) травяно-кустарничкового яруса доли эколого-ценотических групп распределены следующим образом. На участке с внесением торфа (ПП 3) наибольшее ОПП имеют виды богатых лесных сообществ. Среди них *Vaccinium myrtillus*, *Calamagrostis arundinacea* (по 10%), *Aegopodium podagraria* (5%), *Convallaria majalis* (4%) и др. в совокупности — 61%. За ними следуют виды с широкой экологической амплитудой (13%), из которых наибольшим проективным покрытием отличаются *Dryopteris carthusiana* и *Vaccinium vitis-idaea* — по 5%, и луговые виды (13%), среди которых доминирует луговой апофит *Deschampsia cespitosa* (10%). Проективное покрытие видов переувлажненных местообитаний составляет 11%, среди них доми-

нирует *Filipendula ulmaria* (10%). На участках без внесения торфа соотношение групп в сложении ОПП иное: большую часть напочвенного покрова составляют лишайники (50–60%), участие сосудистых растений характерных для бедных сосняков (*Antennaria dioica*, *Calluna vulgaris*, *Pilosella officinarum*) незначительно — 7% на ПП 1 и 5% на ПП 2.

Анализ видового состава травяно-кустарничкового яруса по отношению к световому фактору (рис. 5a) показал, что в целом на всех ПП в живом напочвенном покрове преобладали светолюбивые виды — семи- и гелиофиты (19 и 18 видов — 49 и 46% соответственно). На участках без добавления торфа (ПП 1 и 2) отмечены только семи- и гелиофиты, тогда как на ПП 3 также присутствовали семисциофиты — 5 видов (14%) и сциофиты — 2 вида (6%).

По отношению к почвенному увлажнению (рис. 5b), на всех ПП в видовом составе преобладали мезофиты — 22 вида (56%), за ними следуют мезо-гигрофиты — 10 видов (26%), ксеро-мезофиты — 6 видов (15%) и гигрофиты — 1 вид (3%). На (ПП 1 и 2) преобладали ксеро-мезофиты и мезофиты; на ПП 3 — мезофиты и мезо-гигрофиты (21 и 10 соответственно).

По отношению к почвенному плодородию (рис. 5c) в видовом составе преобладали мезотрофы — 16 (41%). За ними в порядке уменьшения следует мезо-эвтрофы — 11 видов (28%), мезо-олиготрофы — 7 видов (18%), эвтрофы — 3 вида (8%), олиготрофы — 2 вида (5%). На ПП 1 и 2 среди шести произраставших здесь видов травяно-кустарничкового яруса отмечено по 2 мезо-

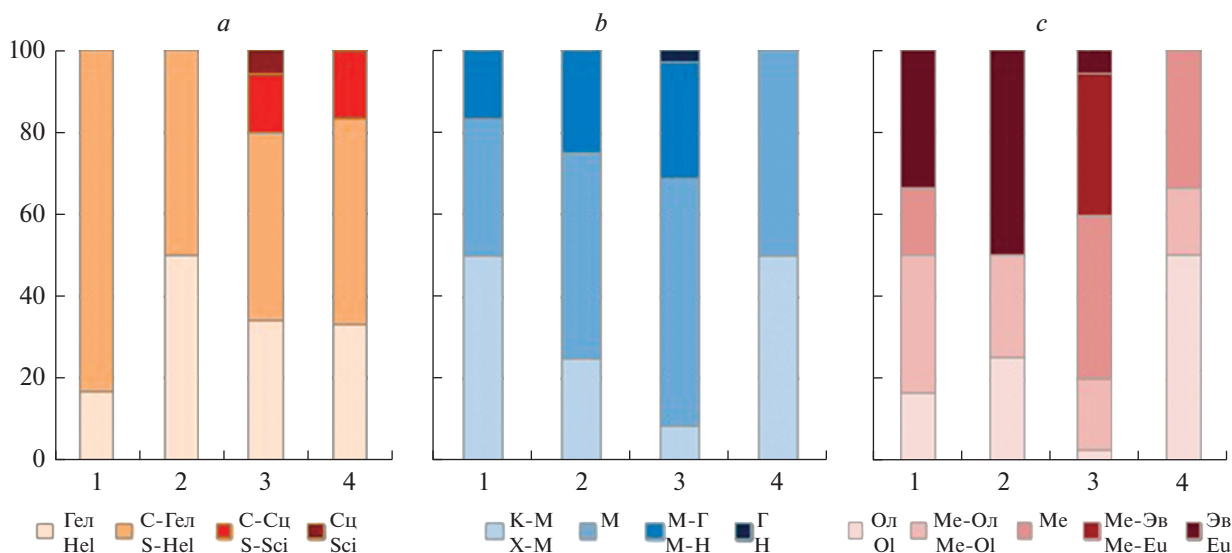


Рис. 5. Соотношение числа видов сосудистых растений в живом напочвенном покрове по отношению к экологическим факторам на участках с посадками сосны в карьере по добыче ПГМ и естественном лесном сообществе. По вертикали: относительное участие (в %) от абсолютного числа видов; по горизонтали: 1 – ПП 1, 2 – ПП 2, 3 – ПП 3, 4 – сосняк брусничный (естественное лесное сообщество). а – освещенность (Гел – гелиофит, С-Гел – семигелиофит, С-Сц – семисциофит, Сц – сциофит), б – влажность (К-М – ксеро-мезофит, М – мезофит, М-Г – мезо-гигрофит, Г – гигрофит), с – плодородие почвы (Ол – олиготроф, Ме-Ол – мезо-олиготроф, Ме – мезотроф, Ме-Эв – мезо-эвтроф, Эв – эвтроф).
Fig. 5. The ratio of the number of vascular plant species of living ground cover in relation to environmental factors on sand and gravel pit plots reforested with Scots pine and in natural forest community. Y-axis: relative participation (%) of the total number of species; x-axis: 1 – SP 1, 2 – SP 2, 3 – SP 3, 4 – lingonberry pine forest *Pinus sylvestris*–*Vaccinium vitis-idaea* (natural forest community). a – illumination (Hel – heliophilous, S-Hel – semi-heliophilous, S-Sci – semi-sciophilous, Sci – sciophilous), b – humidity (X-M – xero-mesophilous, M – mesophilous, M-H – meso-hygrophilous, H – hygrophilous), c – soil fertility (Ol – oligotrophic, Me-Ol – meso-oligotrophic, Me – mesotrophic, Me-Eu – meso-eutrophic, Eu – eutrophic).

олиготрофа и эвтрофа и по одному олиготрофу и мезотрофу. На ПП 3 по отношению к плодородию почвы в видовом составе значительно преобладали мезотрофы (14 видов) и мезо-эвтрофы (12 видов).

В естественном лесном сообществе в видовом составе травяно-кустарничкового яруса по отношению к освещенности в близких долях представлены семи- и гелиофиты, по отношению к влажности – ксеро-мезофиты и мезофиты; по от-

ношению к почвенному богатству преобладали олиготрофы.

Сохранность и рост лесных культур сосны

Сохранность лесных культур является важным показателем при определении эффективности лесовосстановительных мероприятий. Приживаемость культур первого года на всех ПП была довольно высокой и составляла 88–91%. Спустя

Таблица 2. Таксационная характеристика 30-летних культур сосны обыкновенной на постоянных пробных площадях

Table 2. Mensurational characteristics of 30-year-old Scots pine stands on sample plots

№ ПП № Sample plots	Густота, шт./га Density, ind. /ha	Сохранность культур, % Preservation of forest crops, %	Средние Average		Полнота Areal density		Бонитет Quality class	Запас, м³/га Volume, m³/ha
			диаметр, см diameter, cm	высота, м height, m	абсолютная basal area, m²/ha	относительная relative density		
1	2680	54	4.3	3.1	3.6	0.3	V,9	12
2	3280	65	5.0	4.2	6.0	0.4	V,2	20
3	2990	60	10.4	10.5	26.0	1.1	II,5	144

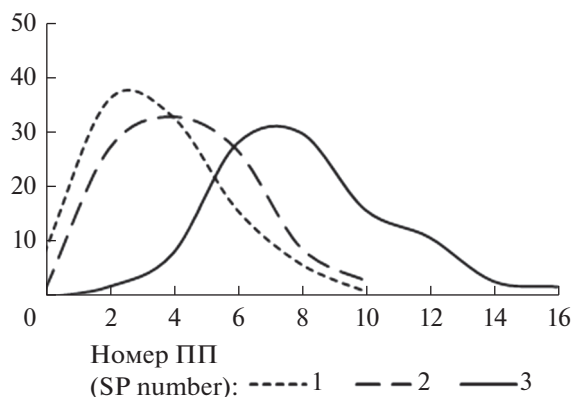


Рис. 6. Распределение культур сосны по диаметру в зависимости от типа субстрата (ПП 1 и ПП 2 — песчаный субстрат, ПП 3 — песчаный субстрат с торфом). По вертикали — количество деревьев, %; по горизонтали — диаметр, см.

Fig. 6. Diameter distribution of pine crops depending on substrate (SP 1 and SP 2 — sandy substrate, SP 3 — sandy substrate with peat). Y-axis — the number of trees, %; x-axis — diameter, cm.

3 десятилетия наиболее высокая сохранность (60–65%) наблюдалась в варианте посадок сосны на ПП 2 и 3 (табл. 2).

К 30-летнему возрасту культур разница между исследуемыми вариантами по среднему диаметру достигала 2.1–2.4 крат, а по средней высоте 2.5–3.4 крат. Данное преимущество отразилось в накоплении запаса древесины, который на ПП 3 составлял 144 м³/га, в то время как на участках ПП 1 и 2 составлял всего 12 и 20 м³/га соответственно. Продуктивность местопроизрастания благодаря внесению торфа повысилась в среднем на 3 класса бонитета.

Существенные различия в росте культур сосны нашли отражение в характере распределения деревьев в насаждениях (рис. 6). На ПП 1 в возрасте 30 лет 8% деревьев еще не достигли высоты 1.3 м, а 69% деревьев относилось к низшим ступеням толщины — 2 и 4 см. Слабый рост и развитие отмечен для культур на ПП 2, где около 60% посадок имели диаметр на высоте 1.3 м менее 6 см. В варианте с торфом (ПП 3) относительно лучшие условия минерального питания обеспечили более интенсивный рост культур. Здесь 90% деревьев имели диаметр 8 см и более, в том числе 31% в диапазоне 12–18 см, т.е. относились к тем ступеням толщины, которые в других вариантах были представлены лишь единичными экземплярами или полностью отсутствовали.

Таким образом, на участке с внесением торфа культуры сосны характеризуются более высокими показателями роста, древостой находится в фазе активного формирования и отличается значительно более широкой дифференциацией особей по диаметру и высоте.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование почвенного и растительного покрова — глубоко взаимосвязанные процессы. По мере развития растительного покрова происходит постепенное формирование почвы, изменяются ее морфологические и физико-химические свойства: наблюдается увеличение влажности, накопление органического вещества за счет опада, изменение кислотно-щелочных свойств и др. [15]. В то же время при трансформации почвенной толщи, накоплении питательных веществ растения лучше растут и развиваются, более разнообразным становится и состав растительного покрова [48]. Наиболее ярко эти процессы проявляются на начальных стадиях восстановления биогеоценоза. Наши исследования показали, что субстраты, формирующиеся на месте бывшего песчано-гравийного карьера, находятся на начальных стадиях почвообразования и имеют укороченный маломощный профиль. Отмечено формирование серогумусового горизонта, наблюдается гумусонакопление и гумусоформирование — ведущие почвообразовательные процессы при формировании почв выработанных песчаных карьеров [8, 49]. Происходит типичный для зональных почв процесс формирования лесной подстилки [50]. Развитие растительного покрова происходит по зональному типу, который определяет лесорастительные условия. Лесные культуры *Pinus sylvestris* имеют относительно хорошую сохранность. Однако в связи с использованием разных сценариев рекультивации направленность и скорость развития биогеоценозов принципиально различаются.

Наименьшие значения содержания биогенных элементов в изучаемых почвах (С, N и К) отмечены на ПП 1 и 2. Эти насаждения отличаются от естественных более низким биоразнообразием и проективным покрытием видов живого напочвенного покрова, который сформирован небольшой группой нетребовательных к почвенным условиям видов растений и лишайников. В мохово-лишайниковом покрове доминируют лишайники. Ксерофильные виды сосудистых растений, характерные для северотаежных сосняков лишайниковых, присутствуют единично [21, 37, 51]. Высокая сохранность сосны через 30 лет подтверждает ее перспективность для лесной рекультивации карьеров в таежной зоне [22, 30], в том числе и в Карелии [29, 52]. Однако без дополнительного минерального питания деревья характеризуются низкими показателями роста. Такое сочетание относительно высокой сохранности и низкой производительности при равномерной посадке и неудовлетворительных условиях роста культур закономерно [53]. Основным ограничивающим фактором для успешного роста культур в данном случае выступает бедность субстрата, который, в

связи с особенностями гранулометрического состава (пески и гравий), отличается нестабильностью водного режима и является крайне малообеспеченным элементом минерального питания. Это отражается как на процессах почвообразования, так и на развитии растительного сообщества в целом [2, 21, 24, 29, 54–60], особенно в северных условиях [1, 2, 61–63]. Почвы нарушенных территорий обычно имеют очень низкое содержание углерода [64], а дефицит азота, который в условиях средней тайги является лимитирующим фактором для роста и развития растений [65], во многом определяет состояние напочвенного покрова на ПП 1 и 2. Медленно развивающиеся лесные культуры сосны обыкновенной и разреженный живой напочвенный покров хотя и способствовали биологической активизации исходного минерального субстрата, но не привели к активному почвообразованию. Восстановление подобных биогеоценозов на начальных стадиях происходит крайне медленно. В результате, рекультивация карьера по добыче песчано-гравийного материала, сводящаяся только к посадке древесных растений (сосны), не привела к ускоренному формированию полноценного биогеоценоза в условиях таежной зоны, что согласуется с данными исследований, выполненных в других регионах [48, 55, 66–68].

На участке, на поверхность которого был дополнительно внесен торф (ПП 3), почва отличается более активными почвообразовательными процессами, высокими показателями содержания влаги, интенсивнее идут процессы накопления органического вещества. Заметно увеличилось содержание большинства элементов минерального питания: почвы характеризуются высоким уровнем содержания углерода в верхнем органо-генном горизонте (13–32%) и в нижележащих горизонтах (2–10%), более высоким содержанием азота (0.05–0.2%) и калия (3–13 мг/100 г). В верхнем 10-сантиметровом минеральном горизонте почвы под влиянием внесенного торфа и в результате формирования более развитого напочвенного покрова (следовательно, более обильного опада) произошла более существенная трансформация кислотно-щелочных свойств. Трансформация морфологических и физико-химических свойств почв свидетельствует о том, что скорость педогенных процессов, трансформация минеральной части техногенного субстрата активизируется под действием органического вещества [69]. Внесенный торфяной субстрат приводит к изменению физических (накапливает и удерживает атмосферную влагу, изменяет показатели кислотности) и химических (обогащает биогенными элементами) свойств песчаного субстрата, и, таким образом, способствует улучшению условий произрастания растений [2, 32, 70]. Это отразилось на сохранности и росте древесных растений: при одинаково

высокой начальной приживаемости через 30 лет у растений на ПП 3 показатели среднего диаметра и высоты были более чем в 2 раза выше по сравнению с показателями культур, высаженных в песчаный грунт (ПП 1 и 2), что свидетельствует об их успешной адаптации к новым условиям произрастания и быстром вступлении в фазу активного роста. Такие искусственные растительные сообщества, развивающиеся на техногенных землях, иногда даже могут превосходить естественные лесные сообщества по таксационным показателям [27, 55, 71]. В нашем случае, культуры сосны, растущие на субстрате с добавлением торфа (ПП 3), в 30-летнем возрасте обладали довольно значительной продуктивностью (II, 5 класс бонитета), что считается высоким показателем и для производственных культур сосны таежной зоны [52, 72–75]. Накопленный к этому возрасту запас сырой древесины был равен 144 м³/га и в 7–12 раз превосходил запас насаждений на участках, где торф не вносился (ПП 1 и 2). Схожие данные получены при исследовании 36-летних культур сосны, созданных в различных эдафических условиях при рекультивации песчано-гравийного карьера в Ленинградской области [76]. При этом успешный рост насаждений определялся дополнительным содержанием питательных веществ в верхней части вскрышного вала, где содержание органического вещества было в 6 раз более высоким, по сравнению с дном карьера.

Напочвенный покров на участке с внесением торфа (ПП 3) отличался более высоким проективным покрытием и видовым разнообразием, с высокой долей эу- мезотрофов, характерных для более богатых лесных сообществ – сосняков черничных, и в целом восстанавливался интенсивнее, что согласуется с ранее полученными данными [2, 77]. В исследованиях, проведенных в республике Коми, также показано положительная реакция напочвенного покрова на наличие торфа в условиях карьера по добыче песчано-гравийного материала [77]. Кроме того, торф сам является источником диаспор многих видов растений. Окружающее карьер естественное лесное сообщество могло являться источником только небольшого числа аборигенных лесных растений, произрастающих в карьере. Тогда как, на участке с участием торфа были отмечены как лесные (*Aegopodium podagraria*, *Anthriscus sylvestris*, *Cirsium heterophyllum*, *Convallaria majalis*, *Melica nutans*, *Oxalis acetosella*), так и болотные (*Coccyganthus flos-cuculi*, *Filipendula ulmaria*) виды, не отмеченные в окружающих лесных сообществах. Весьма вероятно что зачатки этих растений могли попасть во время создания опытного участка вместе с субстратом, на котором они ранее произрастали, а почвенные условия стали благоприятными для их успешного развития. Активно разрастаясь, растения производят большее количество опада, который, включа-

ясь в круговорот веществ, в свою очередь улучшает свойства почвы и способствует ее дальнейшему развитию [49]. Так, на ПП 3 уже отмечено формирование малоомощной задерненной подстилки, тогда как на ПП 1 и 2 происходит процесс формирования только лишайниковой “корочки”.

Одновременно с формированием почв и напочвенного покрова на ПП 3 происходит усложнение вертикальной структуры всего фитоценоза — появляются ярусы подроста и подлеска. Активно формирующийся древесный ярус становится реально действующим эдификатором и формируют внутреннюю среду сообщества [79–81], оказывает решающее влияние на формирование напочвенного покрова и почвы [8, 82, 83] и обеспечивает развитие растительного сообщества по характерному для данной местности “сценарию” с доминированием в напочвенном покрове типичных лесных растений. Следует ожидать, что в дальнейшем такое влияние будет только усиливаться.

Таким образом, полученные результаты наглядно показывают, что в связи с использованием разных способов рекультивации, направленность и скорость восстановления биогеоценозов существенно различались. При одинаковых условиях на начальных стадиях восстановления почвенно-растительного покрова (однородный рельеф, подстилающие породы, одинаковый срок восстановления), добавление торфяного субстрата явилось решающим фактором, определившим дальнейший путь развития биогеоценоза. И хотя применение торфа экономически более затратно, по сравнению с простой посадкой древесных растений [84], его можно рекомендовать в качестве дополнительного субстрата при подготовке поверхности карьеров по добыче ПГМ для их рекультивации в таежной зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создаваемые лесные культуры *Pinus sylvestris* при рекультивации карьеров по добыче песчано-гравийного материала отличаются довольно высокими показателями сохранности, что позволяет ускорить период формирования древесного яруса на нарушенной лесной территории за счет сокращения длительного этапа естественного освоения древесными растениями свободного минерального субстрата. Однако химические свойства песчаных техногенных грунтов без дополнительного внесения удобрений являются крайне несбалансированными по основным элементам

питания, что приводит к замедлению процессов почвообразования и развитию растительного сообщества в целом. В результате формируются малопродуктивные фитоценозы с низким биоразнообразием.

Внесение органического вещества в виде торфа даже в небольших объемах существенно ускоряет процессы почвообразования и формирования благоприятных для растений почвенных условий. В связи с этим происходит формирование живого напочвенного покрова с высоким проективным покрытием и видовым разнообразием, в том числе с участием растений, типичных для богатых лесных сообществ. Искусственно созданный древостой отличается более высокими показателями роста, которые, в отличие от окружающих сосняков брусничных, более сходны с показателями естественно произрастающих высокопродуктивных сосновых насаждений таежной зоны (сосняков черничных). Внесение торфа привело к более быстрому формированию полноценного высокопродуктивного растительного сообщества в относительно короткие сроки, что представляет уже не только экологическую, но и коммерческую ценность.

В свою очередь, сформировавшийся древесный ярус, изменяя световой режим, качество и количество растительного опада, определяет структуру живого напочвенного покрова. Постепенно вытесняются “случайные” виды, что способствует формированию живого напочвенного покрова характерного для лесных сообществ. В дальнейшем, развитый живой напочвенный покров (при большой доле злаков) и высокопродуктивный древостой, вместе активно поставляющие органическое вещество, приводят к усилению процессов почвообразования (гумусообразования и гумусонакопления) и способствуют ускоренному развитию почвы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФИЦ “Карельский научный центр РАН” (Институт леса КарНЦ РАН).

Выражаем благодарность сотрудникам Института леса КарНЦ РАН: В.В. Тимофеевой — за помощь в определении видов сосудистых растений, М.А. Фадеевой — лишайников; сотруднику Института биологии КарНЦ РАН М.А. Бойчук — за помощь в определении видов мхов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорец Н.Г., Шильцова Г.В., Германова Н.И., Антипина Г.С., Крышень А.М., Соколов А.И. 1998. Начальные этапы почвообразования на отвалах железорудного месторождения в северотаежной подзоне Карелии. — Почвоведение. 2: 133–139.

2. Федорец Н.Г., Соколов А.И., Крышень А.М., Медведева М.В., Костина Е.Э. 2011. Формирование лесных сообществ на техногенных землях северо-запада таежной зоны России. Петрозаводск. 130 с.
3. Начальные стадии формирования биогеоценозов на техногенных землях Европейского Севера. 1999. Петрозаводск. 74 с.
4. Сумина О.И. 2013. Формирование растительности на техногенных местообитаниях Крайнего Севера России. СПб. 340 с.
5. Chen H.Y.H., Biswas S.R., Sobey T.M., Brassard B.W., Bartels S.F. 2018. Reclamation strategies for mined forest soils and overstorey drive understorey vegetation. — *J. Applied Ecology*. 55(2): 926–936.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.13018>
6. Миронова С.И. 2000. Техногенные сукцессионные системы растительности Якутии (на примере Западной и Южной Якутии). Новосибирск. 152 с.
7. Экологические основы восстановления экосистем на Севере. 2006. Екатеринбург. 80 с.
8. Абакумов Е.В. 2008. Накопление и трансформация органического вещества на разновозрастных отвалах песчаного карьера. — *Почвоведение*. 8: 955–963.
9. Мананов Ю.А. 2009. Парциальные флоры техногенных экотопов Кузбасса. — *Вестник Оренбургского государственного университета*. 9 (103): 104–109.
10. Капитонова О.А., Селиванов А.Е., Капитонов В.И. 2017. Структура растительных сообществ начальных стадий сукцессий на антропогенных песчаных обнажениях лесотундры и северной тайги Западной Сибири. — *Сибирский экологический журнал*. 24(6): 731–745.
<https://doi.org/10.15372/sej20170606>
11. Дружинина О.А., Мяло Е.Г. 1990. Охрана растительного покрова Севера: проблемы и перспективы. М. 176 с.
12. Капелькина Л.П. 1993. Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов. СПб. 192 с.
13. Капелькина Л.П. 2014. Трансформация тундровых экосистем на нефтепромыслах Севера России. — *Теоретическая и прикладная экология*. 1: 49–52.
14. Zipper C., Burger J., Skousen J., Angel P., Barton C., Davis V., Franklin J. 2011. Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines. — *Environmental Management*. 47: 751–765.
<https://doi.org/10.1007/s00267-011-9670-z>
15. Macdonald S.E., Landhäusser S.M., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D.F., Quideau S. 2015. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. — *New Forests*. 46(5): 703–732.
<https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>
16. Pinno B.D., Hawkes V.C. 2015. Temporal trends of ecosystem development on different site types in reclaimed boreal forests. — *Forests*. 6(6): 2109–2124.
<https://doi.org/10.3390/F6062109>
17. Баталов А.А., Мартынов Н.А., Кулагин А.Ю., Горюхин О.Б. 1989. Лесовосстановление на промышленных отвалах Предуралья и Южного Урала. Уфа. 140 с.
18. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель. 2011. Екатеринбург. 267 с.
19. Мананов Ю.А., Стельникова Т.О., Куприянов А.Н. 2011. Формирование растительного покрова в техногенных ландшафтах Кузбасса. Новосибирск. 167 с.
20. Сумина О.И. 2012. Поливариантная модель первичной сукцессии растительности на экотопически гетерогенной территории (на примере карьеров лесотундры). — *Успехи современного естествознания*. 11(1): 112–116.
21. Лиханова И.А., Шушпанникова Г.С., Железнова Г.В., Пыстина Т.Н. 2020. Синтаксономия растительности карьеров на месте сведенных сосняков лишайниковых и зеленомошных (среднетаежная подзона европейского северо-востока России). — *Растительность России*. 39: 3–25.
<https://doi.org/10.31111/vegrus/2020.39.3>
22. Нуреева Т.В., Куклина Н.А., Чефранова М.Н., Мухортов Д.И. 2016. Особенности роста и формирования культур сосны обыкновенной при рекультивации карьеров. — *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. 1(29): 57–68.
23. Трещевская Э.И., Панков Я.В., Трещевская С.В., Тихонова Е.Н. 2017. Культуры сосны обыкновенной на деградированных техногенно нарушенных землях ЦЧР. Воронеж. 133 с.
24. Лиханова И.А., Кузнецова Е.Г., Новаковский А.Б. 2020. Формирование растительного покрова на карьерах после проведения лесной рекультивации в средней тайге Республики Коми. — *Лесоведение*. 5: 424–432.
<https://doi.org/10.31857/S0024114820050095>
25. Халилова С.Р., Касимов А.К. 2007. Некоторые результаты исследования восстановления и улучшения нарушенных земель методом лесной рекультивации. — *Вестник КрасГАУ*. 4: 49–51.
26. Назаренко Е.Б., Гамсахурдия О.В. 2013. Биологическая рекультивация техногенных ландшафтов. — *Вестник МГУЛ — Лесной вестник*. 4 (96): 183–187.

27. Данилов Ю.И., Петров В.А., Навалихин С.В. 2013. Влияние внесения торфа на рост культур сосны при рекультивации песчаных карьеров. — Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 4: 168–174.
28. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 г. 2021. Петрозаводск. 277 с.
29. Гаврилова О.И. 2010. Восстановление растительного покрова песчано-гравийных карьеров лесокультурными методами. — В сб.: Труды лесоинженерного факультета Петрозаводского гос. университета. Петрозаводск. 8: 21–25.
<https://doi.org/10.15393/j2.art.2010.1739>
30. Сунгурова Н.Р., Сунгуров Р.В., Страздаускас С.Е. 2014. Культуры сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) на рекультивируемых землях. — Вестник КрасГАУ. 11: 170–173.
31. Классификация земель, нарушенных при добыче строительных материалов в Карелии. 1980. Т. 3. Петрозаводск. 124 с.
32. Кузьмин И.А., Стрелкова А.А. Лесовосстановление и формирование почвенного профиля на техногенных землях. — В сб.: Вопросы лесовосстановления и ледозащиты в Карелии. Петрозаводск. 1983. С. 71–78.
33. Разработка методов лесомелиорации техногенных пустошей Европейского Севера. 1993. Петрозаводск. 294 с.
34. Chokkalingam U.S., Sabogal C., Almeida E., Carandang A. P., Gumartini T., de Jong W., Brienza S.Jr., Lopez A.M., Murniati, Nawir A.A., Wibowo R.L., Toma T., Wollenberg E., Zaizhi Z. 2005. Local Participation, Livelihood Needs, and Institutional Arrangements: Three Keys to Sustainable Rehabilitation of Degraded Tropical Forest Lands. — In: Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees. New York. P. 405–414.
https://doi.org/10.1007/0-387-29112-1_58
35. Атлас Республики Карелия. 2021. Петрозаводск. 48 с.
36. Раменская М.Л. 1983. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л. 203 с.
37. Крышень А.М. 2006. Растительные сообщества вырубок Карелии. М. 262 с.
38. Кравченко А.В. 2007. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск. 403 с.
39. Плантариум: открытый онлайн атлас-определитель растений и лишайников России и сопредельных стран. 2007–2021. <http://www.plantarium.ru>
40. Ellenberg H. 1974. Zeigerwerte der Gefässpflanzen Mitteleuropas. Göttingen. 97 s.
41. Ellenberg H. 1996. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Stuttgart. 1095 s.
42. Landolt E. 1977. Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. — In: Veroff. Geobot. Inst. Zurich, ETH: H. 64: 1–208.
43. Цыганов Д.Н. 1983. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М. 196 с.
44. Теория и практика химического анализа почв. 2006. М. 400 с.
45. Классификация и диагностика почв России. 2004. Смоленск. 342 с.
46. Полевой определитель почв России. 2008. М. 150 с.
47. Разнообразие почв и биоразнообразие в лесных экосистемах средней тайги. 2006. М. 287 с.
48. Лиханова И.А., Ковалева В.А. 2018. Одновременный посев луговых злаков и посадка древесных растений в ходе лесной рекультивации нарушенных земель в северной тайге республики Коми. — Лесоведение. 6: 444–453.
<https://doi.org/10.1134/S0024114818060050>
49. Лиханова И.А., Кузнецова Е.Г., Лаптева Е.М., Денева С.В., Макеев Б.А. 2021. Почвообразование на карьерах после проведения лесной рекультивации в среднетаежной подзоне на европейском северо-востоке России. — Почвоведение. 4: 502–520.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21040109>
50. Абакумов Е.В., Гагарина, Э.И. 2003. Начальные стадии почвовосстановления на отвалах отсева дробления гранитов. — Вестник СПбГУ. Сер. 3. 3 (19): 87–95. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21099993>
51. Крышень А.М., Геникова Н.В., Гнатюк Е.П., Преснухин Ю.В., Ткаченко Ю.Н. 2018. Ряды восстановления сосняков Восточной Фенноскандии на песчаных автоморфных почвах. — Бот. журн. 103(1): 5–35.
<https://doi.org/10.1134/S0006813618010015>
52. Соколов А.И. 2016. Повышение ресурсного потенциала таежных лесов лесокультурным методом. Петрозаводск. 178 с.
53. Сеннов С.Н. 1984. Уход за лесом. Экологические основы. М. 128 с.
54. Grubb P.J. 1986. Problems posed by sparse and patchily distributed species in species-rich plant communities. — In: Community Ecology. New York. P. 207–225.
55. Коронатова Н.Г. 2003. Особенности и условия восстановления почвенно-растительного покрова на карьерах Западной Сибири. — Вестник Томского гос. ун-та. 7: 135–141.

56. Воронина Л.А. 2004. Рост культур сосны на техногенных ландшафтах Южного Кузбасса. — В сб.: Восстановление нарушенных ландшафтов. Барнаул. С. 264–269.
57. Юрьева А.Л. 2005. Особенности строения корневых систем лесных культур сосны как фактор экологической устойчивости. — *Resources and Technology*. 6: 82–86.
<https://doi.org/10.15393/j2.art.2005.1904>
58. Капелькина Л.П. 2013. Анализ опыта лесной рекультивации нарушенных земель. — В сб.: Лесовосстановление в Поволжье: состояние и пути совершенствования. Йошкар-Ола. С. 62–68.
59. Журбенко П.М., Навалихин С.В., Терехина О.В. 2014. Продуктивность живого напочвенного покрова на отработанных песчаных карьерах Ленинградской области. — В кн.: Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка. Сыктывкар. С. 87–91.
60. Данилов Ю.И., Смирнов А.П., Петров В.А. 2017. Рост культур сосны при рекультивации песчаных карьеров Карельского перешейка. — *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 219: 6–17.
<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2017.219.6-17>
61. Васильевская В.Д., Григорьев В.Я. 2002. Биологические показатели деградации и самовосстановления почвенно-растительного покрова тундр. — *Сибирский экологический журнал*. IX(3): 355–370.
62. Магомедова М.А., Морозова Л.М. 1997. Оценка перспектив естественного восстановления растительности на техногенно-нарушенных территориях полуострова Ямал. — В сб.: Освоение севера и проблемы рекультивации. Сыктывкар. С. 108–114.
63. Сумина О.И. 1997. К анализу разнообразия растительности карьеров (на примере карьеров севера Западной Сибири). — В сб.: Освоение севера и проблемы рекультивации. Сыктывкар. С. 76–87.
64. Indorante S.J., Jansen I.J., Boast C.W. 1981. Surface mining and reclamation: Initial changes in soil character. — *J. Soil Water Conserv.* 36 (3): 347–351.
65. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. 2003. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск. 240 с.
66. Касимов А.К., Галако В.А., Итешина Н.М., Халилова С.Р. 2010. Лесовосстановление отработанных песчаногравийных месторождений Прикамья. — *Известия Самарского научного центра РАН*. Т. 12. 1(3): 880–884.
http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_880_884.pdf
67. Коронатова Н.Г., Миронычева-Токарева Н.П. 2012. Восстановление растительного покрова на рекультивированном песчаном карьере в северной тайге. — В сб.: Интерэкспо Гео-Сибирь. 2(3): 28–33.
68. Данилов Ю.И., Смирнов А.П., Навалихин С.В., Фетисова А.А., Петров В.А. 2019. Рост культур сосны в условиях рекультивированных песчаных карьеров. — *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 1: 40–53.
<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2019.1.40>
69. Патова Е.Н., Кулюгина Е.Е., Денева С.В. 2016. Процессы естественного восстановления почв и растительного покрова на отработанном угольном карьере (большеземельская тундра). — *Экология*. 3: 173–179.
<https://doi.org/10.7868/S0367059716020116>
70. Наквасина Е.Н. 2009. Агрохимические свойства почв. Архангельск. 101 с.
71. Седых В.Н. 2016. Техногенные леса на нарушенных землях Западной Сибири. — *Сибирский лесной журн*. 2: 43–50.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20160204>
72. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. 2004. Фитомасса культур сосны и ели в европейской части России. Архангельск. 112 с.
73. Гаврилова О.И., Пак К.А., Морозова И.В., Юрьева А.Л. 2017. Формирование искусственных сосновых древостоев в условиях карельской таежной зоны. — *Лесн. журн*. 4: 23–33.
<http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b55/gavrilova.pdf>
74. Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Болотов И.Н., Филиппов Б.Ю., Адаи Д.М. 2018. Биологическая продуктивность культур сосны обыкновенной северотаежного лесного района. — *Известия ВУЗов. Лесн. Журн*. 6 (366): 101–108. http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b75/101_108.pdf
75. Солдатова Д.Н., Ильинцев А.С. 2020. Рост и продуктивность лесных культур сосны С.В. Алексеева на Европейском Севере России. — *Изв. ВУЗов. Лесн. журн*. 1: 99–112.
http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a30/99_112.pdf
76. Данилов Ю.И., Навалихин С.В., Петров В.А. 2018. Рост и продуктивность культур сосны при рекультивации песчаных карьеров. — В сб.: Леса России: политика, промышленность, наука, образование. СПб. Т. 1. С. 92–94.
77. Костина Е.Э., Крышень А.М., Геникова Н.В. 2021. Анализ видового состава сосудистых растений на отвалах и карьерах на территории республики Карелия. — *Бот. журн*. 106(12): 3–22.
<https://doi.org/10.31857/S000681362112005X>
78. Лиханова И.А., Железнова Г.В. 2012. Восстановление растительности на карьерах строительных материалов окрестностей г. Сыктывкар при проведении лесной рекультивации. — *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 14(1): 1485–1488.

79. Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю., Ипатов В.С. 2006. Оценка влияния деревьев на виды травяно-кустарничкового и мохового ярусов в сосняке чернично-зеленомошном. — Бот. журн. 91(2): 176–192.
80. Журавлева Е.Н., Ипатов В.С., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. 2012. Изменение растительности на лугах под влиянием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). — Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Сер. 3. Биология. 2: 3–12.
<https://biocomm.spbu.ru/article/view/3842/3439>
81. Горелов А.М. 2012. Роль фитогенного поля в формировании пространственных структур древесного растения. — Modern Phytomorphology. 1: 137–141.
<https://www.phytomorphology.com/articles/the-role-of-phytogenous-field-in-the-formation-of-woody-plants-space-structure.pdf>
82. Костина Е.Э. 2012. Особенности формирования лесных сообществ в песчано-гравийных карьерах Карелии. — Известия Самарского научного центра РАН. 14(1): 1284–1287.
83. Уфимцев В.И., Стрельникова Т.О., Куприянов О.А. 2018. Структура живого напочвенного покрова в сосняках на участках рекультивации Кузбасса. — Вестник Томского государственного университета. Сер. Биология. 44: 36–58.
<https://doi.org/10.17223/19988591/44/3>
84. Чернявский Е.А. 2013. Инженерные изыскания, разработка и рекультивация карьеров песка в западной Сибири (на примере термокарстового газоконденсатного месторождения). — Экология урбанизированных территорий. 2: 91–96.

Development of Vegetation Cover of the Forest Restoration Sites (Case Study of a Sand and Gravel Pit in Karelia)

E. E. Kostina^a, *, G. V. Akhmetova^a, A. N. Pekkoiev^a, V. A. Kharitonov^a, A. M. Kryshen^a

^a Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

*e-mail: kostina@krc.karelia.ru

Abstract—The state of biogeocoenoses was studied 30 years after artificial reforestation of sand and gravel pit with Scots pine (*Pinus sylvestris*). Pine seedlings were planted whether in unimproved sand and gravel substrate (first two plots), or in substrate improved with peat or peat mixture (third plot). On the unimproved substrate, the regenerated vegetation is represented by lichen pine forest of the fifth quality class, with poorly developed living ground cover dominated by lichens *Cladonia* spp. and *Stereocaulon tomentosum*. By the time of the study, on the first two plots, the site soils were at the initial development stage - gray-humus psammozems (arenosols). Thus, reclamation, if narrowed to the practice of tree (pines) planting only, does not promote accelerated formation of a fully-fledged biogeocoenosis. On the third plot, introduction of organic matter in the form of peat substrate resulted in the development of a more productive biocoenosis (the forest quality increased by three classes). The high species diversity of the vegetation cover and the formation of more complex soils — gray-humus replantozems were observed. Under equal initial conditions, the improvement of substrate with peat was a key factor, which determined further development of biogeocoenosis. Peat increases fertility of the initial mineral substrate, improving its chemical and physical properties, and also, it is a source of diaspores of many native forest and swamp plant species. After 30 years, the actively forming forest environment itself influences the further development of living ground cover and soil formation processes by changing the light conditions and the nature of plant litter.

Keywords: sand and gravel pit, reclamation, *Pinus sylvestris* L., biodiversity, revegetation, soil formation

ACKNOWLEDGMENTS

The research was funded by the federal budget within the framework of the State research assignment to the KarRC RAS (Forest Research Institute of the KarRC RAS).

The authors would like to express their gratitude to the staff of the Forest Research Institute of the KarRC RAS: V.V. Timofeeva for her assistance in identification of vascular plants, M.A. Fadeeva — of lichens, and an employee of the Institute of Biology of the KarRC RAS M.A. Boichuk — for her help in identifying moss species.

REFERENCES

1. Fedorets N.G., Shiltsova G.V., Germanova N.I., Antipina G.S., Kryshen A.M., Sokolov A.I. 1998. Initial stages of soil formation on the tailings of an iron-ore deposit in the subzone of northern taiga in Karelia. — Pochvovedenie. 2: 133–139. (In Russian)

2. Fedorets N.G., Sokolov A.I., Kryshen A.M., Medvedeva M.V., Kostina E.E. 2011. [Formation of forest communities on technogenic lands of the north-west of the taiga zone of Russia]. Petrozavodsk. 130 p. (In Russian)
3. [The initial stages of the biogeocenoses formation on technogenic lands of the European North]. 1999. Petrozavodsk. 74 p. (In Russian)
4. Sumina O.I. 2013 [Vegetation formation in technogenic habitats of the Far North of Russia]. SPb. 340 p. (In Russian)
5. Chen H.Y.H., Biswas S.R., Sobey T.M., Brassard B.W., Bartels S.F. 2018. Reclamation strategies for mined forest soils and overstorey drive understorey vegetation. — J. Applied Ecology. 55(2): 926–936. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13018>
6. Mironova S.I. 2000. [The succession of vegetation in the man-made landscapes of Yakutia]. Novosibirsk. 152 p. (In Russian)
7. [Ecological foundations of ecosystem restoration in the North]. 2006. Ekaterinburg. 80 p. (In Russian)
8. Abakumov E.V. 2008. Accumulation and transformation of organic matter in different ages dumps from sand quarries. — Eurasian Soil Science. 8: 844–851.
9. Manakov Yu.A. 2009. Partial floras of industrial ecotopes of Kuzbass. — Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 9 (103): 104–109. (In Russian)
10. Kapitonova O.A., Selivanov A.E., Kapitonov V.I. 2017. Structure of plant communities in the early succession stages on anthropogenic sandy outcrops of the Forest-Tundra and Northern Taiga of Western Siberia. — Contemporary Problems of Ecology. 10(6): 651–663. <https://doi.org/10.1134/S199542551706006>
11. Druzhinina O.A., Myalo E.G. 1990. [Protection of the vegetation cover of the North: problems and prospects]. Moscow. 176 p.
12. Kapelkina L.P. 1993. [Ecological aspects of optimization of technogenic landscapes]. SPb. 192 p. (In Russian)
13. Kapelkina L.P. 2014. Transformation of tundra ecosystems in oil development industrials of the North of Russia. — Theoretical and applied ecology. 1: 49–52. (In Russian)
14. Zipper C., Burger J., Skousen J., Angel P., Barton C., Davis V., Franklin J. 2011. Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines. — Environmental Management. 47: 751–765. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9670-z>
15. Macdonald S.E., Landhäusser S.M., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D.F., Quideau S. 2015. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. — New Forests. 46(5): 703–732. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>
16. Pinno B.D., Hawkes V.C. 2015. Temporal trends of ecosystem development on different site types in reclaimed boreal forests. — Forests. 6(6): 2109–2124. <https://doi.org/10.3390/F6062109>
17. Batalov A.A., Martyanov N.A., Kulagin A.Yu., Goryukhin O.B. 1989. [Reforestation on industrial dumps of the Urals and the Southern Urals]. Ufa. 140 p. (In Russian)
18. [Ecological foundations and experience of biological reclamation of lands disturbed by industry]. 2011. Ekaterinburg. 267 p. (In Russian)
19. Manakov Yu.A., Srelnikova T.O., Kupriyanov A.N. 2011. [Formation of vegetation cover in technogenic landscapes of Kuzbass]. Novosibirsk. 167 p. (In Russian)
20. Sumina O.I. 2012. Multivariate models of primary vegetation succession ecotopic on heterogeneous territories (illustrated career forest-tundra). — Successes of Modern Natural Sciences. 11(1): 112–116. (In Russian)
21. Likhanova I.A., Shushpannikova G.S., Zheleznova G.V., Pystina T.N. 2020. Syntaxonomy of plant communities at the quarries after the cuttings of lichen and green moss pine forests (Middle Taiga subzone of the European North-east of Russia). — Vegetation of Russia. 39: 3–25. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2020.39.3> (In Russian)
22. Nureeva T.V., Kuklina N.A., Chefranova M.N., Mukhortov D.I. 2016. Patterns of growth and formation of Scots pine species for the purpose of quarry reclamation. — Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 1(29): 57–68. (In Russian)
23. Treshchevskaya E.I., Pankov Ya.V., Treshchevskaya S.V., Tikhonova E.N. 2017. [Planting of Scots pine on degraded technogenically disturbed lands of the Central Black Earth Region]. Voronezh. 133 p. (In Russian)
24. Likhanova I.A., Kuznetsova E.G., Novakovskiy A.B. 2020. [Vegetative cover forming on quarries after forest reclamation being performed in middle taiga subzone of North-East of the European Russia]. — Lesovedenie. 5: 424–432. <https://doi.org/10.31857/S0024114820050095> (In Russian)
25. Khalilova S.R., Kasimov A.K. 2007. [Some results of the study of restoration and improvement of disturbed lands by the method of forest reclamation]. — Vestnik KrasGAU. 4: 49–51. (In Russian)
26. Nazarenko E.B., Gamsakhurdiya O.V. 2013. [Biological reclamation of technogenic landscapes]. — Vestnik MGUL — Lesnoj vestnik. 4 (96): 183–187. (In Russian)

27. Danilov Yu.I., Petrov V.A., Navalikhin S.V. 2013. [The effect of peat application on the growth of pine crops during the reclamation of sand pits]. — Aktualnye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. 4: 168–174. (In Russian)
28. [State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2020]. 2021. Petrozavodsk. 277 p. (In Russian)
29. Gavrilova O.I. 2010. [Restoration of vegetation cover on sand and gravel quarries by artificial reforestation methods]. — In: Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta Petrozavodskogo gos. universiteta. Petrozavodsk. 8: 21–25. (In Russian) <https://doi.org/10.15393/j2.art.2010.1739>
30. Sungurova N.R., Sungurov R.V., Strazdaskas S.E. 2014. [Cultures of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on recultivated lands]. — Vestnik KrasGAU. 11: 170–173.
31. [Classification of lands disturbed during the extraction of construction materials in Karelia]. 1980. Tom 3. Petrozavodsk. 124 p. (In Russian)
32. Kuzmin I.A., Strelkova A.A. 1983. [Reforestation and formation of soil profile on technogenic lands]. — In: [Issues of forest restoration and ice guard in Karelia]. Petrozavodsk. P. 71–78. (In Russian)
33. [Development of methods of forest reclamation of technogenic wastelands of the European North]. 1993. Petrozavodsk. 294 p. (In Russian)
34. Chokkalingam U.S., Sabogal C., Almeida E., Carandang A.P., Gumartini T., de Jong W., Brienza S.Jr., Lopez A.M., Murniati, Nawir A.A., Wibowo R.L., Toma T., Wollenberg E., Zaizhi Z. 2005. Local Participation, Livelihood Needs, and Institutional Arrangements: Three Keys to Sustainable Rehabilitation of Degraded Tropical Forest Lands. — In: Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees. New York. P. 405–414. https://doi.org/10.1007/0-387-29112-1_58
35. [Atlas of the Republic of Karelia]. 2021. Petrozavodsk. 48 p. (In Russian)
36. Ramenskaya M.L. 1983. Analysis of flora in the Murmansk region and Republic of Karelia. Leningrad. 203 p. (In Russian)
37. Kryshen A.M. 2006. [Plant communities of logging areas in Karelia]. Moscow. 262 p. (In Russian)
38. Kravchenko A.V. 2007. [A compendium of Karelian flora (vascular plants)]. Petrozavodsk. 403 p. (In Russian)
39. Plantarium: open on-line atlas and key to plants and lichens of Russia and neighbouring countries. 2007–2021. <http://www.plantarium.ru/> (In Russian)
40. Ellenberg H. 1974. Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. Göttingen. 97 p. (In German)
41. Ellenberg H. 1996. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Stuttgart. 1095 p. (In German)
42. Landolt E. 1977. Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. In: Veröff. Geobot. Inst. Zurich, ETH: H. 64: 1–208. (In German)
43. Tsyganov D.N. 1983. [Phyto-indication of ecological regimes in the subzone of coniferous-deciduous forests]. Moscow. 196 p.
44. [Theory and practice of the chemical analysis of soils]. 2006. Moscow. 400 p. (In Russian)
45. [Classification and diagnostics of soils in Russia]. 2004. Smolensk. 342 p. (In Russian)
46. [Field determinant of soils of Russia]. 2008. Moscow. 150 p. (In Russian)
47. [Soil diversity and biodiversity in the middle taiga ecosystems]. 2006. Moscow. 287 p. (In Russian)
48. Likhanova I.A., Kovaleva V.A. 2018. Possibilities of simultaneous seeding of meadow grasses and wooden plants for remediation of disturbed lands in north of taiga domain in Komi Republic. — Lesovedenie. 6: 444–453. <https://doi.org/10.1134/S0024114818060050> (In Russian)
49. Likhanova I.A., Kuznetsova E.G., Lapteva E.M., Deneva S.V., Makeev B.A. 2021. Soil development in the quarries after forest reclamation in the Middle Taiga subzone of the Northeast of European of Russia. — Pochvovedenie. 4: 502–520. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21040109> (In Russian)
50. Abakumov E.V., Gagarina E.I. 2003. The initial stages of soil restoration on the grounds of granite-crushing sifting near the mining-exploitation complexes Kuznechnoye (Leningrad region). — Vestnik of Saint Petersburg University. Series 3. Biology. 3: 87–95. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21099993> (In Russian)
51. Kryshen A.M., Genikova N.V., Gnatyuk E.P., Presnukhin Yu.V., Tkachenko Yu.N. 2018. Reforestation series of pine forest communities in Eastern Fennoscandia on sandy automorphic soils. — Botanicheskii zhurnal. 103(1): 5–35. <https://doi.org/10.1134/S0006813618010015> (In Russian)
52. Sokolov A.I. 2016. [Increasing the resource potential of taiga forests by the forest-cultural method]. Petrozavodsk. 178 p. (In Russian)
53. Sennov S.N. 1984. [Forest care. Environmental fundamentals]. Moscow. 128 p. (In Russian)
54. Grubb P.J. 1986. Problems posed by sparse and patchily distributed species in species-rich plant communities. In: Community Ecology. New York. P. 207–225.
55. Koronatova N.G. 2003. [Features and conditions of restoration of soil and vegetation cover in the quarries of Western Siberia]. — Vestnik Tomskogo gos. un-ta. 7: 135–141. (In Russian)

56. *Voronina L.A.* 2004. [Growth of pine crops on technogenic landscapes of Southern Kuzbass]. — In: [Restoration of disturbed landscapes] Barnaul. P. 264–269. (In Russian)
57. *Yuryeva A.L.* 2005. Morphological particularities of the root systems of pine cultures as a factor of environmental sustainability. — Resources and technology. 6: 82–86.
<https://doi.org/10.15393/j2.art.2005.1904> (In Russian)
58. *Kapelkina L.P.* 2013. [Analysis of the experience of forest reclamation of disturbed lands]. — In: [Forest restoration in Volga region: current state and opportunities for improvement]. Yoshkar-Ola. P. 62–68. (In Russian)
59. *Zpurbenko P.M., Navalikhin S.V., Terekhina O.V.* 2014. Productivity of the living ground cover on the depleted sand pits of the Leningrad region. — In: [Contemporary topics and prospects of the rational forest exploitation in the market economy]. Syktyvkar. P. 87–91. (In Russian)
60. *Danilov Yu.I., Smirnov A.P., Petrov V.A.* 2017. Growth of pine cultures at recultivation of sand quarries Karelian isthmus. — Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 219: 6–17.
<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2017.219.6-17> (In Russian)
61. *Vasilyevskaya V.D., Grigoryev V.Ya.* 2002. [Biological indicators of degradation and self-healing of tundra soil and vegetation cover]. — Sibirskij ekologicheskij zhurnal. IX(3): 355–370. (In Russian)
62. *Magomedova M.A., Morozova L.M.* 1997. [Assessment of the prospects of natural vegetation restoration in the technogenically disturbed territories of the Yamal Peninsula]. — In: [Development of northern territories and problems of reclamation]. P. 108–114. (In Russian)
63. *Sumina O.I.* 1997. [To the analysis of the vegetation diversity of quarries (example of quarries in the North of Western Siberia)]. — In: [Development of northern territories and problems of reclamation]. Syktyvkar. P. 76–87. (In Russian)
64. *Indorante S.J., Jansen I.J., Boast C.W.* 1981. Surface mining and reclamation: Initial changes in soil character. — J. Soil Water Conserv. 36 (3): 347–351.
65. *Fedorets N.G., Bakhmet O.N.* 2003. [Ecological settings of carbohydrate and nitrogen transformations in forest soils]. Petrozavodsk. 240 p. (In Russian)
66. *Kasimov A.K., Galako V.A., Iteshina N.M., Khalilova S.R.* 2010. Reafforestation of fulfilled sandy gravel deposits in Prikamye. — Izvestia RAS SamSC. 12(1–3): 880–884.
http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_880_884.pdf (In Russian)
67. *Koronatova N.G., Mironycheva-Tokareva N.P.* 2012. Revegetation in the reclaimed sand quarry in the northern taiga. — Interekspo GEO-Siberia. 2(3): 28–33. (In Russian)
68. *Danilov Yu.I., Smirnov A.P., Navalikhin S.V., Fetisova A.A., Petrov V.A.* 2019. [Scots pine forest plantations growth in the conditions of sand pits recultivation]. — Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva. 1: 40–53.
<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2019.1.40> (In Russian)
69. *Patova E.N., Kulyugina E.E., Deneva S.V.* 2016. Processes of natural soil and vegetation recovery on a worked-out open pit coal mine (Bol'shezemel'skaya tundra). — Russ. J. Ecol. 47: 228–233.
<https://doi.org/10.7868/S0367059716020116>
70. *Nakvasina E.N.* 2009. [Agrochemical properties of soils]. Archangelsk. 101 p. (In Russian)
71. *Sedykh V.N.* 2016. Technogenic forests on the disturbed lands of Western Siberia. — Siberian journal of forest science. 2: 43–50.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20160204> (In Russian)
72. *Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov. I.V.* 2004. [Phytomass of pine and spruce crops in the European part of Russia]. Archangelsk. 112 p.
73. *Gavrilova O.I., Pak K.A., Morozova I.V., Yur'eva A.L.* 2017. Formation of artificial pine stands in the Karelian taiga zone. — Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 4: 23–33.
<http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b55/gavrilova.pdf> (In Russian)
74. *Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Bolotov I.N., Filippov B.Yu., Adai D.M.* 2018. Biological productivity of Scots pine cultures in the northern taiga forest area. — Lesnoy Zhurnal. 6: 101–108.
http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b75/101_108.pdf (In Russian)
75. *Soldatova D.N., Ilintsev A.S.* 2020. Growth and productivity of pine forest crops named after S.V. Alekseev in the European North of Russia. — Lesnoy Zhurnal. 1: 99–112.
http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a30/99_112.pdf (In Russian)
76. *Danilov Yu.I., Navalikhin S.V., Petrov V.A.* 2018. [Growth and productivity of pine crops during reclamation of sand pits]. — In: [Forests of Russia: Politics, industry, science, education]. SPb. T. 1: 92–94. (In Russian)
77. *Kostina E.E., Kryshen A.M., Genikova N.V.* 2021. Analysis of vascular plant species composition of dumps and quarries in the Republic of Karelia. — Botanicheskii zhurnal. 106(12): 3–22.
<https://doi.org/10.31857/S000681362112005X> (In Russian)
78. *Likhanova I.A., Zheleznova G.V.* 2012. [Vegetation restoration at sand pits in the suburbs of Syktyvkar during forest restoration]. — Izvestia RAS SamSC. 14(1): 1485–1488. (In Russian)

79. *Lebedeva V.H., Tikhodeeva M.Yu., Ipatov V.S.* 2006. Estimation of tree layer influence on soil cover plant species in bilberry-moss pine forest – *Botanicheskii zhurnal*. 91(2): 176–192. (In Russian)
80. *Zhuravleva E.N., Ipatov V.S., Lebedeva V.H., Tikhodeeva M.Yu.* 2012. Vegetation changes in meadows under the influence of Scotts pine (*Pinus sylvestris* L.). – *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 3. Biology*. 2: 3–12. <https://biocomm.spbu.ru/article/view/3842/3439> (In Russian)
81. *Gorelov A.M.* 2012. The role of phytogenous field in the formation of woody plants space structure. – *Modern Phytomorphology*. 1: 137–141. <https://www.phytomorphology.com/articles/the-role-of-phytogenous-field-in-the-formation-of-woody-plants-space-structure.pdf> (In Russian)
82. *Kostina E.E.* 2012. [Formation patterns of forest communities in sand-gravel quarries in Karelia]. – *Izvestia RAS SamSC*. 14(1): 1284–1287. (In Russian)
83. *Ufimtsev V.I., Strelnikova T.O., Kupriyanov O.A.* 2018. Structure of the living ground cover in pine forests on dumps of Kuzbass. – *Tomsk State University Journal of Biology*. 44: 36–58. <https://doi.org/10.17223/19988591/44/3> (In Russian)
84. *Chernyavskiy E.A.* 2013. [Engineering survey, development and remediation of sand quarries in Western Siberia (by the example of the frost-thaw gas condensate field)]. – *Ecology of urban areas*. 2: 91–96. (In Russian)

**АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ**

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ
ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ЛИСТЬЕВ
BETULA PENDULA (BETULACEAE)**© 2022 г. М. М. Дорофеева^{1, 2, *}, С. А. Бонецкая¹¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
г. Санкт-Петербург, Россия²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: dorofeevamt@gmail.com

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

После доработки 28.09.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

На основе цифровых технологий обработки изображений (Самаркина и др., 2019) выполнено измерение параметров листовых пластинок *Betula pendula* Roth и расчет показателей их флуктуирующей асимметрии и площади на 25 пробных площадках на территории г. Санкт-Петербурга. Используемое программное обеспечение на базе Matlab автоматически рассчитывает показатель асимметрии листовых пластинок и площадь листа, анализируя расположение точек на правой и левой кромке листа. Отмечена высокая перспективность метода, по сравнению с традиционной методикой измерения 5-ти параметров листа. Методика не требует применения особого оборудования и легко может быть освоена специалистами.

Ключевые слова: площадь листьев, флуктуирующая асимметрия, методы определения, компьютерные технологии, *Betula pendula*, г. Санкт-Петербург

DOI: 10.31857/S0033994622030049

Древесные растения активно используются в биологическом мониторинге и в целях биоиндикации чаще всего анализируют анатомические и морфологические характеристики листьев. Особой популярностью для этой цели, в связи с широким распространением и билатерально-симметричной формой листовой пластинки, пользуется вид *Betula pendula* Roth.

Многочисленными исследованиями установлена корреляция между величиной флуктуирующей асимметрии (ФА) листовой пластинки *Betula pendula* и уровнем загрязнения среды [1–8]. При этом в некоторых работах авторы указывают на отсутствие ожидаемого увеличения ФА под воздействием экологических стрессов [9]. Было показано, что ФА листьев *Betula pendula* не изменяется в градиенте сильной техногенной нагрузки [10]. В обзоре Graham et al. [11] отмечено, что в более чем половине проанализированных исследований для разных видов растений было выявлено отсутствие значимых различий ФА между загрязненными и незагрязненными местобитаниями. Показано, что увеличение ФА определяется сочетанием воздействия множества факторов среды и зависит так же от климатических и почвенных условий [11]. Отсутствие реакции на загрязнение

может объясняться развитием устойчивости к антропогенным факторам. Вопрос значения показателя ФА при биологическом мониторинге остается пока открытым.

Тем не менее вид *Betula pendula* рекомендован для оценки состояния наземных экосистем “Методическими рекомендациями по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ” распоряжения Росэкологии № 460-р от 16 октября 2003 г. [12]. Данная методика рекомендована для широкого использования и основана на оценке показателя ФА. При измерении ФА оценивается асимметричность проявления пяти признаков на правой и левой половинах листа, рассчитывается средняя арифметическая показателей. Для проведения измерений часть исследователей используют непосредственно листья, а не сканированные изображения листовых пластинок. Измерения выполняются линейками, штангенциркулями и т.д., что значительно снижает точность оценок ФА. Общеизвестная методика является трудоемкой и требует значительных затрат времени, даже при использовании Adobe Photoshop и подобных программ для измерения электронных изображений листьев.

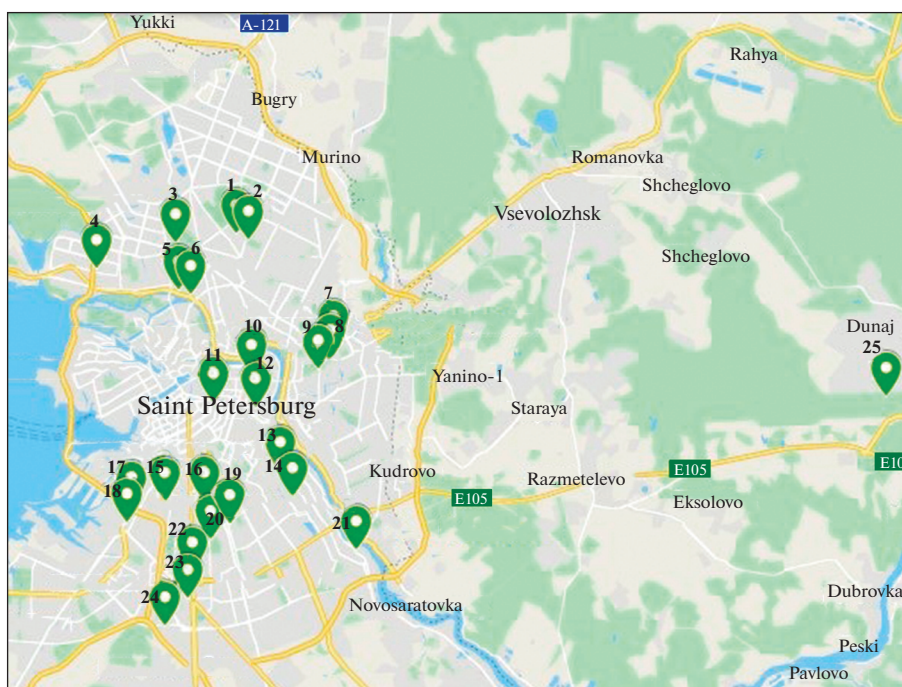


Рис. 1. Карта расположения пробных площадок на территории г. Санкт-Петербурга.
Fig. 1. Location of sample plots in St. Petersburg.

Вместе с тем, при большом объеме исследуемого материала требуется и скорость, и высокая точность измерений. В настоящее время активно разрабатываются современные методики с применением компьютерных технологий, позволяющие ускорить процесс анализа ФА.

Е.И. Самаркиной с соавт. [13] разработана программа с помощью языка программирования, встроенного в комплекс Matlab, предназначенная для определения площади и коэффициента асимметрии листовых пластинок. Данное программное обеспечение (ПО) автоматически рассчитывает показатель асимметрии и площадь листовых пластинок, анализируя расположение точек на правой и левой кромке листа и не требует проведения дополнительных измерений.

Целью работы является оценки состояния среды в г. Санкт-Петербурге по показателю флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* с использованием цифровых технологий обработки изображений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор листовых пластинок *Betula pendula* проводился в июле–августе 2019 г. в условиях г. Санкт-Петербурга в соответствии с “Методическими рекомендациями по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ” распоряжения Росэкологии № 460-р [12].

Пробные площадки (ПП) в черте города подбирались с учетом карты почвенных загрязнений, с целью охватить основные районы города. Контрольная пробная площадка в окр. г. Шлиссельбурга (Кировский р-н, Ленинградская обл.) выбрана с учетом отсутствия вблизи крупных промышленных предприятий и дорог. Всего было заложено 25 ПП (рис. 1). Данные о почвенном загрязнении на ПП представлены в табл. 1. Данные об атмосферном загрязнении вблизи ПП приведены с официального сайта “Экологический портал Санкт-Петербурга” [14] с ближайших станций автоматического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (САМ) за май–июнь 2019 г., поскольку именно в этот период происходит рост и развитие листовой пластинки *Betula pendula* (табл. 2).

На каждой ПП листья собирались с 10 деревьев *Betula pendula* с нижней части кроны по всему периметру. С каждой березы собиралось минимум 10 сформированных листовых пластинок, полностью закончивших рост, без повреждений. Всего было собрано и оцифровано 2720 листовых пластинок. Фотографии обрабатывались в графическом редакторе GIMP при наличии белых бликов, тени от листьев, черешков, для повышения контрастности изображения. Для измерений ФА были подготовлены файлы цифровых фотографии серий листовых пластинок в формате JPEG достаточного разрешения. В результате автоматического распознавания функцией Matlab объек-

Таблица 1. Характеристика пробных площадок и данные о почвенном загрязнении на территории г. Санкт-Петербурга
Table 1. Characteristics of the sample plots and data on soil pollution in St. Petersburg

№ ПП № SP	Адрес Address	Географические координаты Location coordinates		Данные о почвенном загрязнении* Data on soil pollution*					радон, кБк/м³ radon, kBq/m³	нефтепродукты, мг/кг oil products, mg/kg
		N	E	Pb, мг/кг Pb, mg/kg	бензапирен, мг/кг benzopyrene, mg/kg	диоксины (ДЭ), нг/кг dioxins (toxic equivalency), ng/kg	Zc, ед. ¹ Zc, units			
1	ул. Жака Дюкло Zhaka Duclo st.	60.009457	30.359813	150–300	0.06–0.1	0.9–1.5	64–128	10–20		
2	метро Политехническая Politeknicheskaya Metro station	60.006345	30.370074	90–150	0.06–0.1	0.3–0.6	64–128	10–20		
3	Удельный парк Udelny park	60.004962	30.303782	150–300	0.06–0.1	0.9–1.5	64–128	10–20		–
4	ул. Мебельная, 13 13 Mebelnaya st.	59.993273	30.232339	300–450	0.06–0.1	0–0.3	128–300	0–5		–
5	Строгановский парк Stroganovsky Park	59.983586	30.307169	90–150	0.06–0.1	0.6–0.9	64–128	5–10		–
6	Набережная Черной Речки Chernaya Rechka Embankment	59.981527	30.318495	300–450	0.1–0.2	0.9–1.5	128–300	10–20		–
7	ул. Бокситогорская, 6 6 Boksitogorskaya st.	59.959349	30.446910	90–150	0.06–0.1	6–9	64–128	5–10		–
8	Большохитинское кладбище, правая сторона Bolshoekhitinsky cemetery, right side	59.952715	30.443964	150–300	0.04–0.06	3–6	128–300	5–10		–
9	Большохитинское кладбище, левая сторона Bolshoekhitinsky cemetery, left side	59.947874	30.433402	30–90	0.06–0.1	0.9–1.5	32–64	10–20		>7500
10	Таврический сад Tavrichesky (Tauride) Garden	59.946218	30.373071	90–150	0.06–0.1	0–0.3	16–32	10–20		–
11	Аничков сад Anichkov Garden	59.933215	30.338798	150–300	0.04–0.06	0.6–0.9	128–300	10–20		2000–4000
12	Овсянниковский сад Ovsyannikovskiy Garden	59.930901	30.376511	150–300	0.06–0.1	0–0.3	128–300	10–20		–
13	Площадь Бехтерева Bekhterev Square	59.902255	30.399425	150–300	0.06–0.1	0.6–0.9	128–300	5–10		–

Таблица 1. Продолжение / Table 1. Continuation

№ ПП № SP	Адрес Address	Географические координаты Location coordinates		Данные о почвенном загрязнении* Data on soil pollution*					
		N	E	Pb, мг/кг Pb, mg/kg	бензопирен, мг/кг benzopyrene, mg/kg	диоксины (L ¹), нг/кг dioxins (toxic equivalency), pg/kg	Zc, ед. ¹ Zc, units	радон, кБк/м ³ radon, kBq/m ³	нефтепродукты, мг/кг oil products, mg/kg
14	ул. Ольги Берггольц, 36 к. 3 36-3 Olgy Berggolts st.	59.890409	30.409864	300–450	0.06–0.1	0.9–1.5	>300	10–20	–
15	Кировский завод, электродепо Kirov Plant, electric locomotive house	59.888571	30.294242	300–450	0.02–0.04	>9	128–300	5–10	–
16	Парк Динамо Dynamo Park	59.888482	30.330442	300–450	0.1–0.2	0.3–0.6	128–300	10–20	–
17	Сад Кирьяново Kiryanovo Garden	59.886126	30.263992	300–450	0.06–0.1	3–6	128–300	10–20	–
18	метро Кировский завод Kirovsky Zavod Metro station	59.878665	30.261034	90–150	0.06–0.1	0.6–0.9	32–64	20–30	–
19	ул. Белградская, 11 11 Belgradskaya st.	59.877716	30.353675	150–300	0.1–0.2	0–0.3	64–128	5–10	2000–40000
20	Московский парк победы Moscow Victory Park	59.871357	30.335586	150–300	0.1–0.2	0.6–0.9	128–300	10–20	–
21	метро Пролетарская Proletarskaya Metro station	59.866188	30.468050	30–90	0.06–0.1	0.6–0.9	32–64	20–30	–
22	Московский проспект, 183 183 Moskovsky prospect	59.856291	30.319989	300–450	0.06–0.1	0.6–0.9	32–64	20–30	–
23	ул. Варшавская Varshavskaya st.	59.844446	30.314755	30–90	0.04–0.06	0.3–0.6	16–32	20–30	–
24	ж/д ст. Предпортовая Predportovaya railway station	59.831649	30.295108	150–300	0.02–0.04	0.6–0.9	128–300	20–30	–
25	Садоводческий массив "Сады" "Sady" gardening allotments	59.935898	30.947061	–	–	–	–	–	–

Примечание: * использованы данные карт почвенного загрязнения г. Санкт-Петербурга [15]; ¹ – индекс суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами. Прочерк означает отсутствие данных.

Note: * Data were obtained from the soil pollution maps of St. Petersburg [15]; ¹ – index of total heavy metals in soil. A dash means no data.

Таблица 2. Данные атмосферного загрязнения воздуха в мае—июне 2019 г.
Table 2. Data on air pollution in May—June 2019

№ САМ* № AMS*	№ ПП № SP	Средние концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в отношении к среднесуточным предельно допустимым концентрациям (ПДК с.с.) Average pollutant concentrations in the atmospheric air against the daily-average maximum allowable concentrations (MAC a.d.)					Содержание взвешенных частиц в отношении к ПДК с.с. The content of particulate matter against MAC a.d.
		CO	NO	NO ₂	SO ₂	O ₃	
1	3, 5, 6	0.134	0.252	1.047	0.100	1.421	0.200
2	14	0.100	0.136	0.464	0.116	1.516	0.178
3	1, 2	0.107	0.164	0.690	—	—	0.159
4	12	0.121	0.293	0.711	0.100	—	0.170
5	15, 17, 18	0.105	0.142	0.226	0.115	—	0.449
6	4	0.105	0.193	0.828	0.127	—	—
8	16, 20, 22	0.102	0.115	0.559	0.100	1.695	0.151
9	21	0.113	0.187	0.758	0.100	1.319	0.195
10	11	0.102	0.146	0.743	0.100	—	—
12	10	0.179	0.655	1.733	—	—	—
14	7, 8, 9	0.108	0.167	0.607	—	1.482	0.119
16	13, 19	0.116	0.151	0.648	0.100	—	0.328
19	23, 24	0.107	0.110	0.406	—	1.391	0.162

Примечание: полужирным шрифтом отмечены показатели, превышающие ПДК. Проверк означает отсутствие данных. * — станция автоматического мониторинга.
 Note: Indicators in bold type exceed MAC. Dash means no data. * — automatic monitoring station.

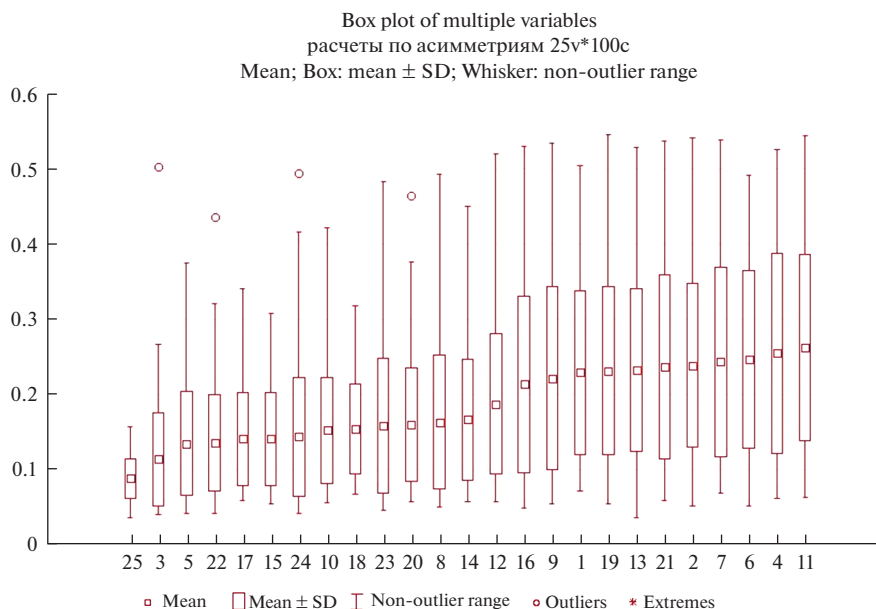


Рис. 2. График распределения значений флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* на пробных площадях. По горизонтали — номер ПП; по вертикали — величина ФА.

Fig. 2. Distribution of *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry values at different sample plots. X-axis — SP number; y-axis — fluctuating asymmetry value.

тов на цифровом изображении был сформирован массив листовых пластинок, каждой из которых соотносится своя бинарная матрица изображения. На основе матрицы бинарного изображения листовой пластинки выводятся показатели асимметрии, логарифм асимметрии, площадь левой и правой половин листовой пластинки, суммарная площадь листовой пластинки [13].

Обработку данных проводили с использованием пакета программ STATISTICA 6.0 и MS EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительный анализ данных показателей флуктуирующей асимметрии, полученных с помощью программного обеспечения Matlab

Статистические параметры выборок интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* представлены в табл. 3. Наименьшее среднее значение асимметрии, рассчитанное как среднее арифметическое всех значений выборок получено в контрольной точке — ПП № 25 (рис. 2).

Для предварительного анализа данных были взяты две выборки значений показателей флуктуирующей асимметрии: случайная пробная площадка (ПП № 9) и контрольная точка (ПП № 25). При построении гистограмм выявлена их несимметричность и смещенность распределения влево.

По критерию Колмогорова—Смирнова гипотеза о нормальности не отклоняется, но и досто-

верно не подтверждается (ПП № 9: $D = 0.13471$, $p < 0.1$; ПП № 25: $D = 0.11616$, $p < 0.15$). Тест на нормальность по критерию Хи-Квадрат (ПП № 9: $\chi^2 = 29.60539$, $p = 0.00005$; ПП № 25: $\chi^2 = 11.56577$, $p = 0.11577$) и критерию Шапиро—Уилка (ПП № 9: $W = 0.92051$, $p = 0.00001$; ПП № 25: $W = 0.96149$, $p = 0.00514$) позволяет отвергнуть гипотезу о нормальном распределении. В связи с этим рассматривались альтернативные типы распределений: распределение Вейбулла, гамма-распределение, логнормальное распределение.

Оценка, выполненная по критерию Колмогорова—Смирнова, свидетельствует об отсутствии соответствия эмпирических распределений распределению Вейбулла (ПП № 9: $D = 0.22594$, $p < 0.01$; ПП № 25: $D = 0.2845$, $p < 0.01$), гамма-распределению (ПП № 9: $D = 0.74858$, $p < 0.01$; ПП № 25: $D = 0.912286797$, $p < 0.01$) и логнормальному распределению (для обоих эмпирических распределений $D = 1$, $p < 0.01$). По критерию Хи-Квадрат установлено достоверное соответствие выборок значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 9 и № 25 ($\chi^2 = 7.09178$, $p = 0.21390$ и $\chi^2 = 4.50375$, $p = 0.47938$ соответственно) (рис. 3, 4).

Распределения многих показателей и индексов асимметрии, как правило, не подчиняются нормальному закону [16, 17]. В связи с этим в исследованиях асимметрии иногда применяют различные дополнительные преобразования для перевода ненормально распределенных показателей

Таблица 3. Статистические показатели выборки интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula*
Table 3. Statistical indicators of the samples of *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry integrated index

№ ПП № SP	Среднее Mean	Доверительный уровень Confidence level		Медиана Median	Дисперсия Variance	Стандартное отклонение Std. dev.	Коэффициент асимметрии Skewness	Коэффициент эксцесса Kurtosis	Диапазон Range	
		–95.000%	+95.000%						Min	Max
1	0.2292	0.0115	0.4469	0.2111	0.0119	0.1092	0.6044	–0.4007	0.0710	0.5046
2	0.2386	0.0119	0.4654	0.2224	0.0120	0.1094	0.4827	–0.5501	0.0507	0.5419
3	0.1138	0.0057	0.2219	0.0971	0.0038	0.0617	3.0374	15.4428	0.0399	0.5035
4	0.2547	0.0127	0.4966	0.2307	0.0176	0.1327	0.3056	–1.1657	0.0615	0.5260
5	0.1348	0.0067	0.2628	0.1184	0.0047	0.0688	1.4135	1.7920	0.0411	0.3754
6	0.2467	0.0123	0.4811	0.2172	0.0139	0.1178	0.3870	–0.9872	0.0508	0.4919
7	0.2437	0.0122	0.4752	0.2045	0.0159	0.1261	0.6848	–0.6813	0.0691	0.5387
8	0.1628	0.0081	0.3175	0.1367	0.0080	0.0892	1.7879	3.3102	0.0495	0.4935
9	0.2214	0.0111	0.4318	0.1871	0.0148	0.1217	0.8287	–0.1185	0.0540	0.5353
10	0.1521	0.0076	0.2965	0.1395	0.0049	0.0701	1.2941	2.2098	0.0553	0.4218
11	0.2628	0.0131	0.5124	0.2436	0.0154	0.1239	0.3289	–0.8269	0.0633	0.5452
12	0.1871	0.0094	0.3648	0.1738	0.0087	0.0931	1.0392	0.9856	0.0566	0.5205
13	0.2324	0.0116	0.4532	0.2052	0.0118	0.1086	0.7111	0.1407	0.0357	0.5288
14	0.1666	0.0083	0.3248	0.1463	0.0064	0.0802	1.1743	1.2855	0.0564	0.4499
15	0.1407	0.0070	0.2744	0.1217	0.0039	0.0624	0.9167	0.0764	0.0545	0.3074
16	0.2135	0.0107	0.4163	0.1775	0.0138	0.1174	0.6537	–0.6092	0.0488	0.5302
17	0.1406	0.0070	0.2741	0.1318	0.0039	0.0625	1.4018	2.0069	0.0579	0.3408
18	0.1538	0.0077	0.2999	0.1448	0.0036	0.0603	0.7972	0.1684	0.0669	0.3183
19	0.2316	0.0116	0.4516	0.2130	0.0125	0.1120	0.5347	–0.4149	0.0541	0.5460
20	0.1594	0.0080	0.3108	0.1385	0.0057	0.0754	1.4090	2.4364	0.0572	0.4650
21	0.2370	0.0119	0.4622	0.2217	0.0150	0.1224	0.3632	–0.9041	0.0592	0.5379
22	0.1354	0.0068	0.2640	0.1213	0.0042	0.0647	1.7351	4.5128	0.0410	0.4368
23	0.1583	0.0079	0.3087	0.1324	0.0080	0.0892	1.1139	1.1283	0.0460	0.4835
24	0.1436	0.0072	0.2799	0.1215	0.0062	0.0786	1.8910	4.8263	0.0413	0.4952
25	0.0877	0.0044	0.1710	0.0836	0.0007	0.0263	0.6473	0.0533	0.0361	0.1566

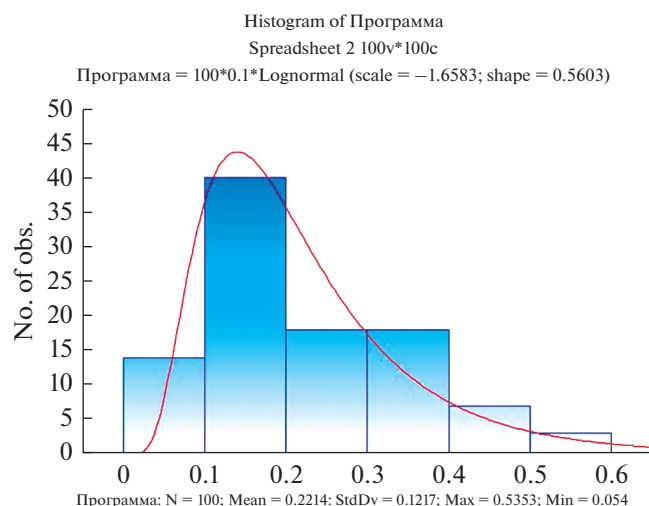


Рис. 3. Гистограмма распределения значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 9 и кривая логнормального распределения.

Fig. 3. Histogram of the distribution of fluctuating asymmetry values at SP 9 and the log-normal distribution curve.

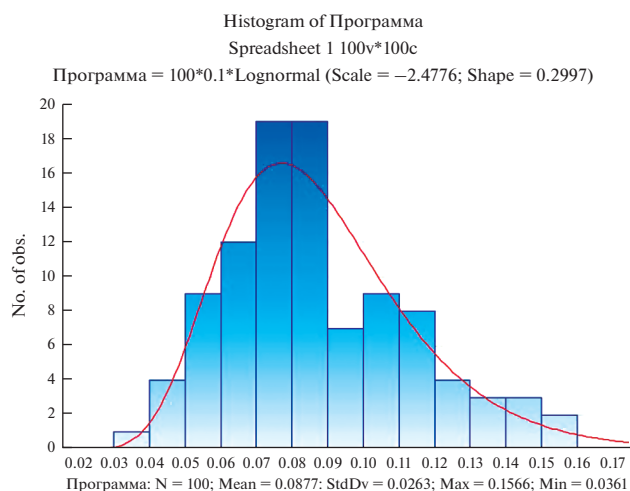


Рис. 4. Гистограмма распределения значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 25 и кривая логнормального распределения.

Fig. 4. Histogram of the distribution of fluctuating asymmetry values at SP 25 and the log-normal distribution curve.

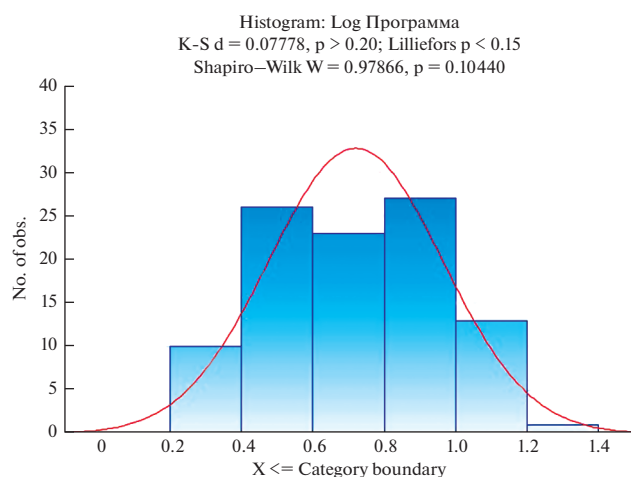


Рис. 5. Гистограмма распределения логарифмированных значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 9 и кривая нормального распределения.

Fig. 5. Histogram of the distribution of logarithmic values of fluctuating asymmetry at SP 9 and the normal distribution curve.

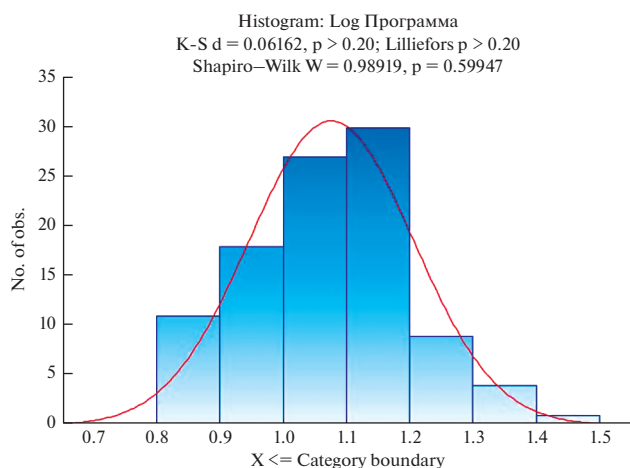


Рис. 6. Гистограмма распределения логарифмированных значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 25 и кривая нормального распределения.

Fig. 6. Histogram of the distribution of logarithmic values of fluctuating asymmetry at SP 25 and the normal distribution curve.

в форму нормального распределения (например, логарифмические трансформации).

Результаты проверки статистического анализа гипотезы о виде распределения, подтверждают нормальность распределения выборок после логарифмирования данных (рис. 5, 6). Тест на нормальность по критерию Хи-Квадрат ($\chi^2 = 4.47817$, $p = 0.61225$) и Шапиро–Уилка ($W = 0.97865$, $p = 0.1044$) позволяет подтвердить гипотезу о нор-

мальном распределении после логарифмирования данных выборки ПП № 9 и выборки ПП № 25 ($\chi^2 = 2.07830$, $p = 0.35375$; $W = 0.98918$, $p = 0.5995$).

Значение асимметрии и соответствующий ей логарифм асимметрии характеризуют листовую пластинку.

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних для выборок ПП № 9 и № 25 подтверждают, основываясь на численном значении Р-ста-

Таблица 4. Балльная шкала оценки значений логарифма флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula***Table 4.** Scoring scale for assessing the logarithmic values of *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry

Диапазоны модулей логарифма ФА Ranges of FA logarithm moduli	Балл Score
0.636–0.724	5
0.724–0.812	4
0.812–0.900	3
0.900–0.988	2
0.988–1.076	1

тики равно 0.00, что имеется статистически существенная разница значений средних, полученных по этим выборкам.

Показатель флуктуирующей асимметрии, полученный с помощью программного обеспечения Matlab

Для построение балльной оценочной шкалы были выявлены минимальные и максимальные значения логарифма асимметрии листовой пластинки и размах этих значений разбит на диапазоны (табл. 4). Проведено сопоставление численных значений границ диапазонов оценочной шкалы со средним значением логарифма показателя флуктуирующей асимметрии каждой ПП.

Таблица 5. Балльная оценка среднего показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula*

№ ПП № SP	Средние значения показателя флуктуирующей асимметрии на ПП Average values of the fluctuating asymmetry index at the SP	Средний логарифм величины флуктуирующей асимметрии Mean logarithm of fluctuating asymmetry	Модуль логарифма Logarithm modulus	Балл Score
1	0.229	–0.692	0.692	5
2	0.239	–0.672	0.672	5
3	0.114	–0.989	0.989	1
4	0.255	–0.660	0.660	5
5	0.135	–0.919	0.919	2
6	0.247	–0.663	0.663	5
7	0.244	–0.671	0.671	5
8	0.163	–0.838	0.838	3
9	0.221	–0.720	0.720	5
10	0.152	–0.860	0.860	3
11	0.263	–0.636	0.636	5
12	0.187	–0.779	0.779	4
13	0.232	–0.684	0.684	5
14	0.167	–0.829	0.829	3
15	0.141	–0.891	0.891	3
16	0.213	–0.739	0.739	4
17	0.141	–0.889	0.889	3
18	0.154	–0.845	0.845	3
19	0.232	–0.691	0.691	5
20	0.159	–0.840	0.840	3
21	0.237	–0.692	0.692	5
22	0.135	–0.910	0.910	2
23	0.158	–0.865	0.865	3
24	0.144	–0.895	0.895	3
25	0.088	–1.076	1.076	1

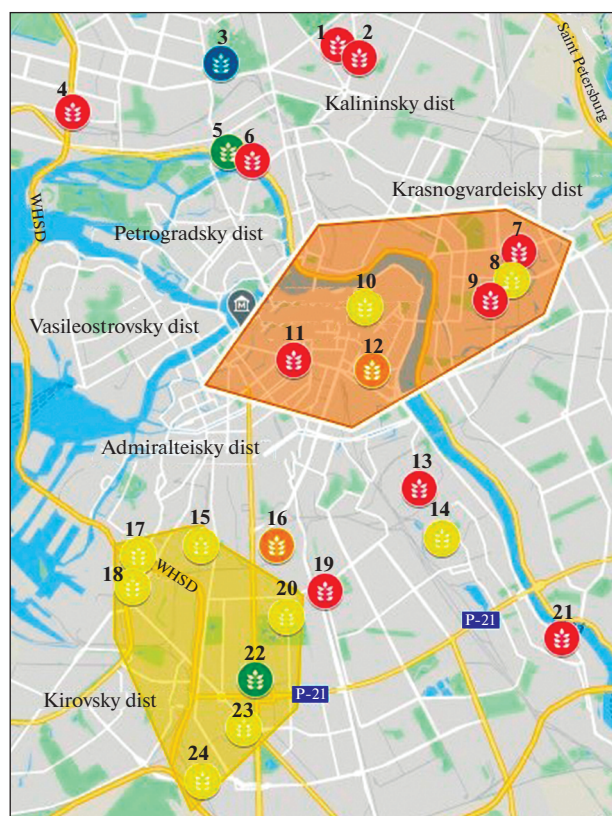


Рис. 7. Распределение уровней загрязнения на территории г. Санкт-Петербурга, согласно данным о величине ФА листьев *Betula pendula*. Балльная оценка ПП: красный — 5, оранжевый — 4, желтый — 3, зеленый — 2, синий — 1.

Fig. 7. Distribution of pollution in St. Petersburg, according to the data on *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry values. SP score: red — 5, orange — 4, yellow — 3, green — 2, blue — 1.

Для ПП получено заключение о среднем показателе ФА листовой пластинки в виде балльной оценки (табл. 5).

Наиболее часто встречаются показатели логарифма асимметрии листьев от 0.812 до 0.900 и от 0.636 до 0.724 — соответственно 3 и 5 баллов. Наиболее высокое значение средней ФА листьев получено для ПП № 11 и составило 0.263. Контрольная ПП № 25 имеет наименьший показатель

Таблица 6. Шкала оценки площади листовой пластинки *Betula pendula*

Table 6. Scoring scale of *Betula pendula* leaf blade area

Диапазон средней площади листа, см ² Range of average sheet area, cm ²	Балл Score
15.54–17.93	5
17.93–20.32	4
20.32–22.71	3
22.71–25.11	2
25.11–27.50	1

флуктуирующей асимметрии листа — 0.088, наибольшую величину его логарифма и наименьший балл (табл. 5).

По результатам картирования ПП с разными значениями параметра асимметрии листья березы повислой с помощью Google maps, можно выделить несколько районов, в которых прослеживается закономерность распределения баллов флуктуирующей асимметрии (рис. 7). В юго-западной части города преобладают объекты с 3-м баллом асимметрии. На этих участках отмечено низкое атмосферное загрязнение и средняя загрязненность почв свинцом и тяжелыми металлами. В центральной части преобладают ПП с 4-м и 5-м баллами; на этих участках присутствует загрязнение нефтепродуктами, отмечена высокая антропогенная и транспортная нагрузка. Для северной части города характерен разброс по баллам ПП. По направлению с северо-запада на северо-восток наблюдается переход от 5-го к 1–2-ому и снова к 5-му баллу. На всех ПП в этой части города, имеющих высокий балл асимметрии, присутствует высокий уровень загрязнения почв тяжелыми металлами (превышение ПДК в 25 раз).

Наибольшим показателем асимметрии характеризуется ПП № 11. На данном участке наблюдается загрязнение почв нефтепродуктами (превышение ПДК более чем в 2 раза), зафиксировано превышение ПДК для Pb в 7 раз (150–300 мг/кг), для бензапирена — в 25 раз (0.04–0.06 мг/кг), для тяжелых металлов — в 25 раз (128–300 мг/кг).

Для контрольной ПП № 25, расположенной за чертой города, характерен, как уже говорилось, наименьший показатель флуктуирующей асимметрии.

Показатель площади листовых пластинок, полученный с помощью программного обеспечения Matlab

Предварительный тест на нормальность распределения величин площади листовых пластинок березы повислой по критериям Хи-Квадрат и Шапиро–Уилка ($\chi^2 = 5.27396$, $p = 0.50919$; $W = 0.97886$, $p = 0.1084$) позволяет подтвердить гипотезу о нормальном распределении этого параметра в выборке ПП № 9 (случайная пробная площадка) и выборке ПП № 25 (контрольная точка) ($\chi^2 = 10.35026$, $p = 0.11066$; $W = 0.96146$, $p = 0.0051$). Аналогичный вывод получен при оценке по критерию согласия Колмогорова–Смирнова: данные выборок ПП № 9 ($D = 0.06435$, $p > 0.2$) и № 25 ($D = 0.09551$, $p > 0.2$) соответствуют нормальному распределению.

Для оценки изменения площади листовых пластинок *Betula pendula* были вычислены средние значения, размах средних значений разбит на 5 диапазонов (табл. 6). Для каждой ПП получено

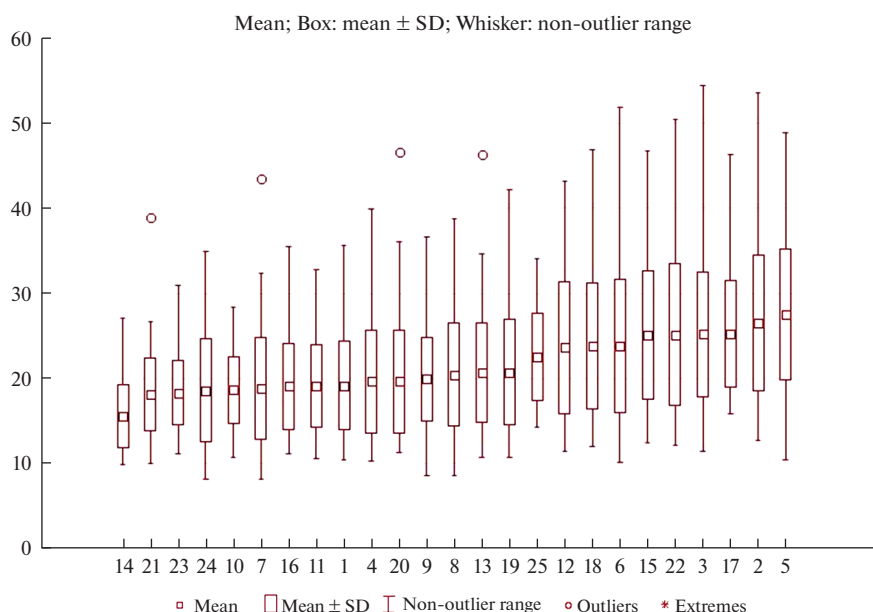


Рис. 8. Средняя площадь листовых пластинок *Betula pendula*.
По горизонтали — номер ПП; по вертикали — площадь листа, см².
Fig. 8. Average *Betula pendula* leaf blade area.
X-axis — SP number; y-axis — leaf blade area, cm².

закключение о средней площади листовой пластинки в виде балльной оценки (табл. 7).

Наиболее часто встречается 4-й балл — площадь листьев от 17.93 до 20.32 см². Наибольшее значение средней площади получено для ПП № 5 и составило 27.5 см². Контрольная ПП № 25 имеет средний балл и средний показатель площади листа (рис. 8).

Можно выделить 2 участка, на которых близко расположенные ПП имеют большую среднюю площадь листовых пластинок по сравнению с контрольной ПП № 25 (рис. 9). Первый участок — это пробные площади №№ 3, 5, 6, расположенные вблизи станции автоматического мониторинга (САМ) 1, где не зафиксировано превышений ПДК по содержанию токсичных газов в атмосферном воздухе, но при этом имеются данные о превышении ПДК по содержанию свинца, бензапирена и цинка в почве. Второй участок — ПП №№ 15, 17, 18, расположенные в окрестностях САМ 5, где выявлено превышение ПДК по содержанию в воздухе оксида азота и озона, и, кроме того, превышение ПДК по содержанию в почвах свинца, бензапирена, диоксинов, радона и цинка.

Среди исследователей нет единого мнения на счет влияния загрязнения на площадь листовой пластинки растений. Имеются сведения о тенденции к увеличению длины, ширины и площади листьев, в том числе у *Betula pendula*, под влиянием загрязнения [18]. По полученным данным наименьшая средняя площадь листовой пластинки отмечена на ПП № 14 и составила 15.54 см². Согласно картам почвенного загрязнения, это

Таблица 7. Балльная оценка средней площади листовых пластинок *Betula pendula*

Table 7. Score of *Betula pendula* average leaf blade area

№ ПП № SP	Средняя площадь листьев, см ² Average leaf blade area, cm ²	Балл Score
1	19.17	4
2	26.56	1
3	25.17	1
4	19.62	4
5	27.50	1
6	23.85	2
7	18.87	4
8	20.48	3
9	19.93	4
10	18.62	4
11	19.15	4
12	23.60	2
13	20.69	3
14	15.54	5
15	25.10	2
16	19.06	4
17	25.23	1
18	23.78	2
19	20.70	3
20	19.67	4
21	18.15	4
22	25.17	1
23	18.30	4
24	18.60	4
25	22.53	3

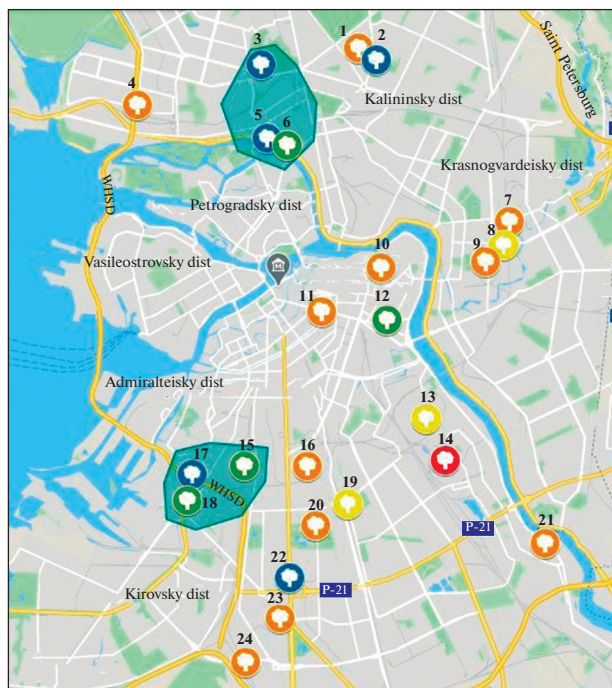


Рис. 9. Результаты балльного оценивания ПП по площади листовых пластинок *Betula pendula* на территории г. Санкт-Петербурга: красный – 5, оранжевый – 4, желтый – 3, зеленый – 2, синий – 1.

Fig. 9. The results of the sample plots scoring by *Betula pendula* leaf blades area in St. Petersburg: red – 5, orange – 4, yellow – 3, green – 2, blue – 1.

единственная ПП, где индекс суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами (Zс) превышает 300 ед., при том, что ПДК по данному показателю составляет 16 ед. Зависимость показателя площади листовой пластинки от расположения пункта или уровня атмосферного и почвенного загрязнения не прослеживается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для работы с программным обеспечением необходимы файлы цифровых фотографии серий листовых пластинок достаточного разрешения.

При наличии белых бликов, тени от листьев, черешков, для повышения контрастности изображения может понадобиться дополнительная обработка изображений в графическом редакторе. Используемая методика не требует применения особого оборудования и легко может быть освоена специалистами. По сравнению с традиционной методикой измерения 5-ти параметров листа, программное обеспечение на базе Matlab отличается высокой продуктивностью.

Анализ изменения площади листовых пластинок *Betula pendula* в г. Санкт-Петербурге не выявил зависимости этого показателя от расположения пробных площадок и уровня атмосферного загрязнения. В зоне максимального загрязнения почв тяжелыми металлами отмечена наименьшая средняя площадь листовой пластинки. На контрольной пробной площадке, расположенной за чертой города, выявлен средний показатель площади листа (балл 3).

Средний балл асимметрии листовой пластинки *B. pendula* в черте г. Санкт-Петербурга составил 3.6, что свидетельствует о достаточно высоком уровне загрязнения. Контрольная пробная площадка, расположенная за пределами города, отличается наименьшим показателем флуктуирующей асимметрии. Наиболее загрязненными, согласно величине показателя флуктуирующей асимметрии, являются центральный и восточный районы г. Санкт-Петербурга. В юго-западной части города наблюдается снижение показателя флуктуирующей асимметрии. В северной части города отмечен довольно широкий разброс показателей флуктуирующей асимметрии, что может указывать на большое количество локальных источников антропогенного воздействия на растения *Betula pendula*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке научного проекта Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН № АААА-А19-119031290052-1 “Сосудистые растения Евразии: систематика, флора, растительные ресурсы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерофеева Е.А. 2015. Флуктуирующая асимметрия листа *Betula pendula* (Betulaceae) в условиях автотранспортного загрязнения (г. Нижний Новгород). – Растительные ресурсы. 51(3): 366–383. <http://elibrary.ru/item.asp?id=23700417>
2. Ерофеева Е.А., Наумова М.М. 2012. Сезонная динамика морфофизиологических показателей листа *Betula pendula* (Betulaceae) при автотранспортном загрязнении. – Растительные ресурсы. 48(1): 59–70. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17686701>
3. Собчак Р.О., Афанасьева Т.Г., Копылов М.А. 2013. Оценка экологического состояния рекреационных зон методом флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth. – Вестн. Том. гос. ун-та. 368: 195–199. http://journals.tsu.ru/vestnik/&journal_page=archive&id=881&article_id=1155
4. Гелашивили Д.Б., Лобанова И.В., Ерофеева Е.А., Наумова М.М. 2007. Влияние лесопатологического состояния березы повислой на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки. – Поволжский экологический журн. 2: 106–115. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9483780>

5. Мандра Ю.А., Еременко Р.С. 2010. Биоиндикационная оценка состояния окружающей среды города Кисловодска на основе анализа флуктуирующей асимметрии. — Известия Самарского научного центра РАН. 12(1–8): 1990–1994. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_1990_1994.pdf
6. Бойко А.А. 2004. Оценка стабильности развития листьев березы повислой в условиях аэротехногенного загрязнения окружающей среды. — Вестник МГУЛ. Лесной вестник. 5(36): 121–123. https://les-vest.msfu.ru/les_vest/2004/Les_vest_5_2004.pdf
7. Амосова И.Б., Феклистов П.А. 2010. Асимметрия листовой пластинки березы повислой у особей разного возрастного состояния в пригородных лесах г. Архангельска. — Известия ВУЗов. Лесной журн. 2: 60–66. <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/599/59997e883ce455b8cbc903c1d12b0687.pdf>
8. Шабалина О.М., Демьяненко Т.Н. 2011. Оценка влияния загрязнения среды и почвенных факторов на показатели флуктуирующей асимметрии листа березы повислой (*Betula pendula* Roth) в г. Красноярске. — Вестник КрасГАУ. 12(63): 135–140. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17240811>
9. Коротеева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Чащина О.Е. 2015. В градиенте влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината изменяется размер, но не флуктуирующая асимметрия листа березы повислой. — Докл. РАН. 460(3): 364–367. <https://doi.org/10.7868/S0869565215020279>
10. Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Чащина О.Е., Коротеева Е.В. 2016. Влияние выбросов Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) на размер и флуктуирующую асимметрию листа подроста *Betula pendula* (Betulaceae). — Растительные ресурсы. 52(1): 109–124. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25407839>
11. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications. — Symmetry. 2(2): 466–540. <https://doi.org/10.3390/sym2020466>
12. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). 2003. — Распоряжение Росэкологии от 16.10.2003 № 460. М. 24 с.
13. Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Соколова И.Г., Жаров И.Н. 2019. Методика измерения параметров листовых пластинок по цифровому изображению с использованием специализированного программного обеспечения. — Растительные ресурсы. 4(55): 537–547. <https://doi.org/10.1134/S0033994619040101>
14. Экологический портал Санкт-Петербурга. <http://www.infoeco.ru/index.php?id=53>
15. Экологическая обстановка в районах Санкт-Петербурга. 2003. СПб. 720 с.
16. Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Иудин Д.И. 2004. Структурные и биоиндикационные аспекты флуктуирующей асимметрии билатерально симметричных организмов. — Журн. общ. биол. 65(5): 433–441. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17641674>
17. Урбах В.Ю. Биометрические методы. 1964. М. 415 с.
18. Соколова Г.Г., Ерёмкина А.А. 2014. Влияние загрязнения воздушной среды на развитие листьев древесных растений в условиях г. Горно-Алтайска. — Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 13: 208–213. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22657238>

Assessing the State of Urban Environment in Saint-Petersburg by the Indicator of *Betula pendula* (Betulaceae) Leaf Fluctuating Asymmetry

M. M. Dorofeeva^{a, b, *}, S. A. Bonetskaya^b

^a Komarov Botanical Institute Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

^b Saint Petersburg state forest engineering University, Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: dorofeevamm@gmail.com

Abstract—Using digital image processing techniques (Samarkina et al., 2019), *Betula pendula* Roth leaf blade parameters were measured, and their area and fluctuating asymmetry indicators were calculated for 25 sample plots in St. Petersburg. We used Matlab-based software that automatically calculates leaf area and leaf blade asymmetry index using the matching points position on the right and left edges of the leaf blade. The high prospects of the method as compared to the traditional measuring of five leaf parameters have been noted. The technique does not require using special equipment and can be easily learned by specialists.

Keywords: leaf area, fluctuating asymmetry, determination methods, computer technology, *Betula pendula*, St. Petersburg

ACKNOWLEDGMENTS

This study was conducted as part of the State research assignment to the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences: research topic “Vascular plants of Eurasia: taxonomy, flora, plant resources” (No. AAAA-A19-119031290052-1).

REFERENCES

1. Erofeeva E.A. 2015. Dependence of leaf fluctuating asymmetry of *Betula pendula* (Betulaceae) on motor traffic pollution intensity. — Rastitelnye resursy. 51(3): 366–383. <http://elibrary.ru/item.asp?id=23700417> (In Russian)
2. Erofeeva E.A., Naumova M.M. 2012. Seasonal dynamics of morphological and physiological parameters of *Betula pendula* (Betulaceae) leaf under traffic pollution. — Rastitelnye resursy. 48(1): 59–70. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17686701> (In Russian)
3. Sobchak R.O., Afanasyeva T.G., Kopylov M.A. 2013. [Evaluation of recreation areas ecological state by method of *Betula pendula* Roth leaves fluctuating asymmetry]. — Tomsk State University J. 368: 195–199. http://journals.tsu.ru/vestnik/en/&journal_page=archive&id=881&article_id=1155 (In Russian)
4. Gelashvili D.B., Lobanova I.V., Erofeeva E.A., Naumova M.M. 2007. [Influence of phytopathologic state of *Betula pendula* Roth on fluctuating asymmetry of its leaf laminae]. — Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal. 2: 106–115. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9483780> (In Russian)
5. Mandra Yu.A., Eremenko R.S. 2010. Bioindicator estimation the state of the environment in Kislovodsk City on the basis of fluctuating dissymmetry analysis. — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 12(1–8): 1990–1994. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_1990_1994.pdf (In Russian)
6. Boyko A.A. 2004. [Assessment of the stability of *Betula pendula* Roth leaf development under aerotechnogenic environmental pollution]. — Lesnoy Vestnik / Forestry Bulletin. 5(36): 121–123. https://les-vest.msfu.ru/les_vest/2004/Les_vest_5_2004.pdf (In Russian)
7. Amosova I.B., Feklistov P.A. 2010. Leaf plate asymmetry of silver birch of various age in Arkhangelsk suburban forests. — Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2: 60–66. <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/599/59997e883ce455b8cbc903c1d12b0687.pdf> (In Russian)
8. Shabalina O.M., Demyanenko T.N. 2011. Estimation of environment pollution and soil factor influence on the indicators of the drooping birch (*Betula pendula* Roth) leaf fluctuating asymmetry in Krasnoyarsk. — The Bulletin of KrasGAU. 12(63): 135–140. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17240811> (In Russian)
9. Koroteeva E.V., Veselkin D.V., Kuyanceva N.B., Chashchina O.E. 2015. The size, but not the fluctuating asymmetry of the leaf, of silver birch changes under the gradient influence of emissions of the Karabash Copper Smelter Plant. — Doklady Biological Sciences. 460(1): 36–39. <https://doi.org/10.1134/S0012496615010056>
10. Veselkin D.V., Kuyanteva N.B., Chashchina O.E., Koroteeva E.V. 2016. Impact of Karabash copper smelter emissions on leaf size and fluctuating asymmetry of *Betula pendula* (Betulaceae) undergrowth. — Rastitelnye resursy. 52(1): 109–124. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25407839> (In Russian)
11. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications. — Symmetry. 2(2): 466–540. <https://doi.org/10.3390/sym2020466>
12. [Methodological recommendations for assessing the quality of the environment according to the state of living beings (assessment of the stability of the development of living organisms by the level of asymmetry of morphological structures)]. 2003. — Directive of Rosecologiya dated October 16, 2003 No. 460. Moscow. 24 p. (In Russian)
13. Samarkina E.I., Samarkin A.I., Sokolova I.G., Zharov I.N. 2019. Method for measuring leaf blade parameters by digital images using dedicated software. — Rastitelnye resursy. 4(55): 537–547. <https://doi.org/10.1134/S0033994619040101> (In Russian)
14. Ecological portal of St. Petersburg. <http://www.infoeco.ru/index.php?id=53> (In Russian)
15. [Ecological situation in the districts of St. Petersburg]. 2003. Saint Petersburg. 720 p. (In Russian)
16. Gelashvili D.B., Chuprunov E.V., Iudin D.I. 2004. Structural and bioindicative aspects of fluctuated asymmetry of bilateral organisms. — Zh. Obshch. Biol. 65(5): 433–441. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17641674> (In Russian)
17. Urbah V.Yu. [Biometric methods]. 1964. Moscow. 415 p. (In Russian)
18. Sokolova G.G., Eryomina A.A. 2014. The influence of air pollution on the development of woody plant leaves under conditions of Gorno-Altaysk City. — Problems of Botany of South Siberia and Mongolia. 13: 208–213. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22657238> (In Russian)