

2021

Т. 13, № 4

**МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ
И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ**



БИОСФЕРА

ISSN 2077-1371 / www.21bs.ru

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ
СОСТОЯНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ
СОЦИО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ
НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

**С.Д. Синюшкина, Н.И. Зазнобина,
Д.Б. Гелашвили, И.Н. Калашников**

INTEGRAL ANALYSIS OF THE CONDITIONS

*OF A REGIONAL SOCIO-
ENVIRONMENTALLY-ECONOMIC
SYSTEM EXEMPLIFIED WITH
NISHEGORODSKAYA OBLAST*

*S.D. Siniushkina, N.I. Zaznobina,
D.B. Gelashvili, I.N. Kalashnikov*

**ПРОБЛЕМЫ АКТУАЛИЗАЦИИ
ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПРАКТИК
В ЯМАЛО-НЕНЕЦКОМ
АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ**

Е.В. Абакумов, Е.Н. Моргун

*THE PROBLEMS OF UPDATING
AGRICULTURAL PRACTICES IN THE
YAMAL-NENETS AUTONOMOUS REGION*

Ye.V. Abakumov, Ye.N. Morgun

**ЭКОЛОГО-ФИТОХИМИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ ЦВЕТКОВ
БУЗИНЫ ЧЕРНОЙ *SAMBUCUS
NIGRA L.* В УСЛОВИЯХ
УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ**

Н.А. Виноградова

*ECOLOGICAL AND PHYTOCHEMICAL
CHARACTERISTICS OF BLACK
ELDERBERRY (*SAMBUCUS NIGRA L.*)
FLOWERS UNDER URBANIZED
CONDITIONS*

N.A. Vinogradova

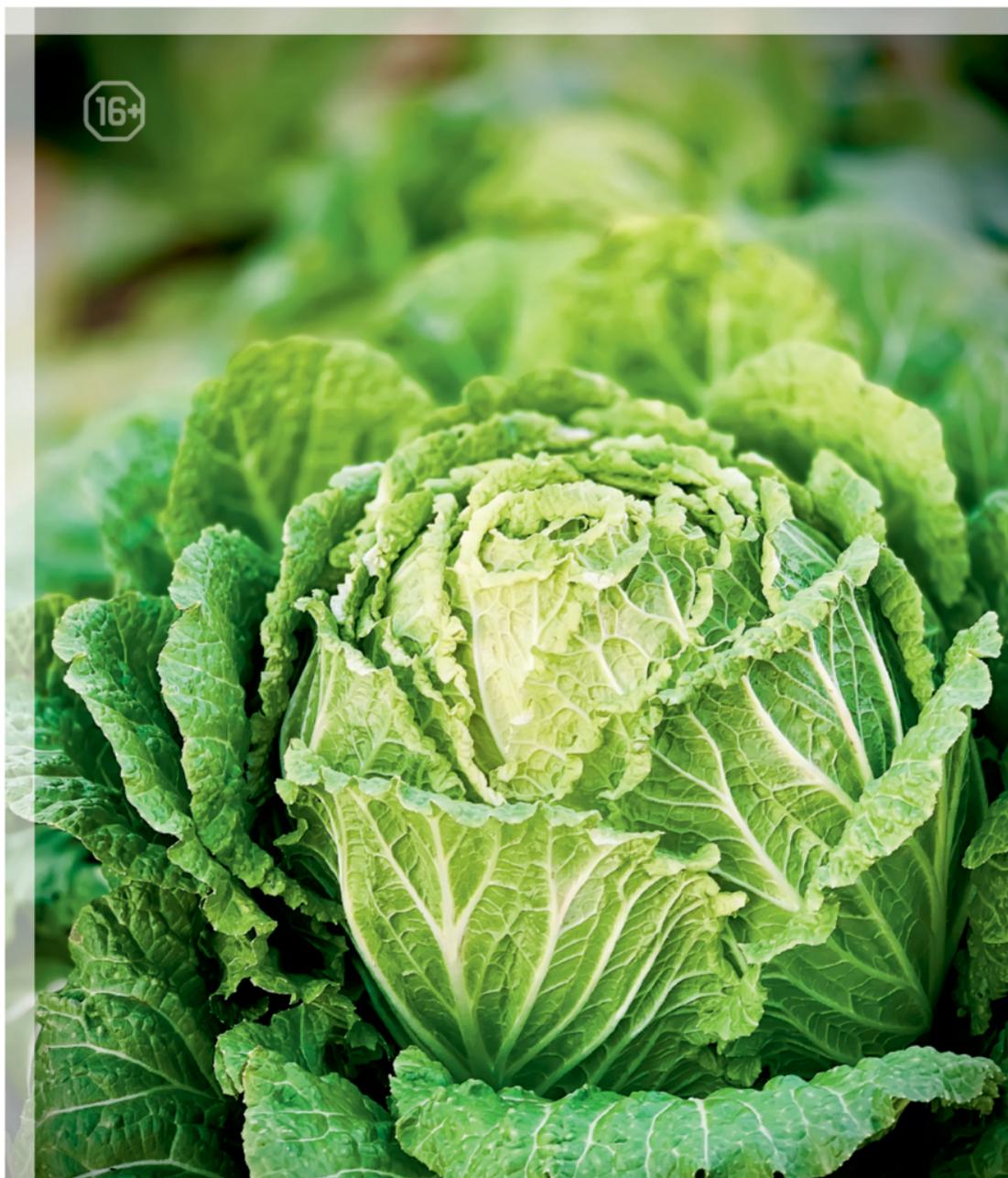


ФОТО: David Holifield, unsplash.com

© ФОНД НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ «XXI ВЕК»
РОССИЙСКАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

БИОСФЕРА

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ
ПО ПРОБЛЕМАМ ПОЗНАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ БИОСФЕРЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ РЕСУРСОВ

Том 13, № 4

Санкт-Петербург
2021



BIOSPHERE

INTERDISCIPLINARY JOURNAL OF BASIC AND APPLIED SCIENCES DEDICATED
TO COMPREHENSION AND PROTECTION OF THE BIOSPHERE AND TO USAGE OF RESOURCES THEREOF

Vol. 13, No. 4

Saint Petersburg
2021

© «XXI CENTURY» RESEARCH FOUNDATION
RUSSIAN ECOLOGICAL ACADEMY

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

EDITORIAL BOARD

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Г.С. РОЗЕНБЕРГ (ТОЛЬЯТТИ)

EDITOR-IN-CHIEF

G.S. Rozenberg (Togliatti)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ

ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

А.Г. Голубев (С.-Петербург)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

A.G. Golubev (Saint Petersburg)

СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:

И.М. Татарникова

EDITORIAL SECRETARY:

I.M. Tatarnikova

ДИЗАЙН: Е.А. КОРЧАГИНА

DESIGN: YE.A. KORCHAGINA

ВЕРСТКА: Т.А. Слащева

LAYOUT: T.A. Slascheva

КОРРЕКТОР: Н.А. Натарова

PROOFREADING: N.A. Natarova

АДМИН САЙТА:

И.В. Перескоков

SITE ADMIN: I.V. Pereskocov

РОССИЙСКОЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО В РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

DOMESTIC EDITORIAL BOARD



В.Н. Большаков (Екатеринбург) V.N. Bolshakov (Ekaterinburg)

Л.Я. Боркин (С.-Петербург) L.Ja. Borkin (Saint Petersburg)

А.К. Бродский (С.-Петербург) A.K. Brodsky (Saint Petersburg)

Ю.С. Васильев (С.-Петербург) Yu.S. Vasilyev (Saint Petersburg)

Р.М. Вильфанд (Москва) R.M. Vilfand (Moscow)

В.А. Драгавцев (С.-Петербург) V.A. Dragavtsev (Saint Petersburg)

Г.В. Жижин (С.-Петербург) G.V. Zhizhin (Saint Petersburg)

Г.А. Ивахненко (С.-Петербург) G.A. Ivakhnenko (Saint Petersburg)

Г.А. Исаченко (С.-Петербург) G.A. Isachenko (Saint Petersburg)

Н.А. Кашулин (Апатиты) N.A. Kashulin (Apatity)

С.В. Кривовичев (С.-Петербург) S.V. Krivovichev (Saint Petersburg)

Н.Н. Марфенин (Москва) N.N. Marfenin (Moscow)

М.А. Надпорожская (С.-Петербург) M.A. Nadporozhskaya (Saint Petersburg)

Ю.К. Новожилов (С.-Петербург) Yu.K. Novozhilov (Saint Petersburg)

Г.В. Осипов (Москва) G.V. Osipov (Moscow)

В.А. Павлюшин (С.-Петербург) V.A. Pavliushin (Saint Petersburg)

К.М. Петров (С.-Петербург) K.M. Petrov (Saint Petersburg)

О.Н. Пугачев (С.-Петербург) O.N. Pugachev (Saint Petersburg)

Ю.А. Рахманин (Москва) Yu.A. Rakhmanin (Moscow)

А.А. Редько (С.-Петербург) A.A. Redko (Saint Petersburg)

А.В. Селиховкин (С.-Петербург) A.V. Selikhovkin (Saint Petersburg)

Г.А. Софронов (С.-Петербург) G.A. Sofronov (Saint Petersburg)

В.М. Тарбаева (С.-Петербург) V.M. Tarbayeva (Saint Petersburg)

И.А. Тихонович (С.-Петербург) I.A. Tikhonovich (Saint Petersburg)

М.Д. Уфимцева (С.-Петербург) M.D. Ufimtseva (Saint Petersburg)

Г.Н. Фельдштейн (С.-Петербург) G.N. Feldstein (Saint Petersburg)

Е.Я. Фрисман (Биробиджан) Ye.Ya. Frisman (Birobijan)

Л.П. Чурилов (С.-Петербург) L.P. Churilov (Saint Petersburg)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL
ADVISORY BOARD

М.Д. Голубовский (Окленд, США)

M.D. Golubovsky (Oakland, CA, USA)

М. Клявинш (Рига, Латвия)

M. Klavins (Riga, Latvia)

К. Оболевский

(Быгдоць, Польша)

K. Obolevsky (Bydgoszcz, Poland)

Я. Олексин (Курник, Польша)

J. Oleksyn (Kornik, Poland)

А.А. Протасов (Киев, Украина)

A.A. Protasov (Kiev, Ukraine)

В. Реген (Берлин, Германия)

W. Regen (Berlin, Germany)

Ю.Г. Тютюнник (Киев, Украина)

Yu.G. Tyutyunnik (Kiev, Ukraine)

О. Чертов

(Бинген-на-Рейне, Германия)

O. Chertov

(Bingen am Rhein, Germany)

Журнал зарегистрирован

Федеральной службой

по надзору в сфере связи

и массовых коммуникаций:

ПИ № ФС77-32791

от 08 августа 2008 г.

Registered by RF Federal Service

for Communication and Mass

Media Surveillance on 08 August

2008 as PI No FS77-32791

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

197110, Санкт-Петербург,

Большая Разночинная ул., д. 28;

Тел./факс: (812) 415-41-61

Эл. почта: biosphaera@21mm.ru

Электронная версия:

http://21bs.ru (ISSN 2077-1460)

POSTAL ADDRESS:

28 Bolshaya Raznochinnaya, 197110,

Saint Petersburg, Russia;

Phone/fax: +7 (812) 415-41-61;

E-mail: biosphaera@21mm.ru

Online version:

http://21bs.ru (ISSN 2077-1460)

СОДЕРЖАНИЕ

A3

СОДЕРЖАНИЕ
CONTENTS

ТЕОРИЯ / THEORY

150

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ
РЕГИОНАЛЬНОЙ СОЦИО-ЭКОЛОГО-
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
(НА ПРИМЕРЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

**С.Д. Синюшкина, Н.И. Зазнобина,
Д.Б. Гелашвили, И.Н. Калашников**
INTEGRAL ANALYSIS OF THE CONDITIONS
OF A REGIONAL SOCIO-ENVIRONMENTALLY-
ECONOMIC SYSTEM EXEMPLIFIED
WITH NISHEGORODSKAYA OBLAST
S.D. Siniushkina, N.I. Zaznobina, D.B. Gelashvili,
I.N. Kalashnikov

ПРАКТИКА / PRACTICE

160

**ПРОБЛЕМЫ АКТУАЛИЗАЦИИ
ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПРАКТИК В ЯМАЛО-
НЕНЕЦКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ**

Е.В. Абакумов, Е.Н. Моргун
The problems of updating agricultural practices
in the Yamal-Nenets autonomous region
Ye.V. Abakumov, Ye.N. Morgun

170

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДА
БИРОБИДЖАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Д.М. Фетисов, Д.В. Жучков, М.В. Горюхин
ESTIMATING THE GREENNESS LEVEL OF BIROBIDZHAN
CITY USING REMOTE SENSING DATA
D.M. Fetisov, D.V. Zhuchkov, M.V. Goryukhin

180

**ЭКОЛОГО-ФИТОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ЦВЕТКОВ БУЗИНЫ ЧЕРНОЙ *SAMBUCUS NIGRA*
L. В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ**

Н.А. Виноградова
ECOLOGICAL AND PHYTOCHEMICAL
CHARACTERISTICS OF BLACK ELDERBERRY
(*Sambucus nigra* L.) FLOWERS UNDER URBANIZED
CONDITIONS
N.A. Vinogradova

188

ПРИРОДА / ПРИРОДА

**ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ
ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ,
СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 3. ВЛИЯНИЕ
НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ И КОРНЕВЫЕ
СИСТЕМЫ**

Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин
STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF
ARBOREAL PLANTS TO ANTHROPOGENIC FACTORS:
DAMAGES, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 3.
IMPACT ON THE RADIAL INCREMENT AND ON THE
ROOTAGE
R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin

206

**ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ
ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ,
СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 4. ВЛИЯНИЕ
НА ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВЫРАБОТКУ
АДАПТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ ДРЕВОСТОЕВ**

Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин
STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF
ARBOREAL PLANTS TO ANTHROPOGENIC FACTORS:
DAMAGE, ADAPTATIONS AND STRATEGIES.
PART 4. IMPACT ON THE CONDITIONS AND THE
DEVELOPMENT OF ADAPTIVE STRATEGIES OF
FORESTS
R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin

ПРИЛОЖЕНИЯ / APPENDICES

A4

БЛАГОДАРНОСТЬ РЕЦЕНЗЕНТАМ
ACKNOWLEDGEMENT OF REVIEWERS 2021

A5

СВОДНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 13
COMBINED CONTENTS OF VOLUME 13

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СОЦИО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)

С.Д. Синюшкина¹, Н.И. Зазнобина^{2*}, Д.Б. Гелашвили²,
И.Н. Калашников¹

¹ Приволжский исследовательский медицинский университет Минздрава России,
Нижний Новгород, Россия;

² Национальный исследовательский нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

* Эл. почта: ecology@bio.unn.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2021; принята к печати 21.11.2021

Для оценки ситуации в регионе с учетом ее экономической, социально-демографической и экологической составляющих, выявления причин отсталости по тем или иным показателям и принятия мер для улучшения обстановки целесообразно рассматривать каждую административно-территориальную единицу (АТЕ) в регионе как целостную социо-эколого-экономическую систему. На примере АТЕ Нижегородской области предложен способ комплексного анализа состояния и развития таких систем. Этот способ предусматривает расчет значений обобщенной функции желательности (ОФЖ) и их оценку с помощью метода главных компонент и SWOT-анализа. На основании рассчитанных значений ОФЖ для периода 2016–2018 годов среди АТЕ выявлены «лидеры» и «аутсайдеры». При этом 78% всех АТЕ попадают в две нижних из пяти градаций ОФЖ, то есть характеризуются плохой обстановкой. Полученные результаты подтверждаются методами математической статистики и могут быть истолкованы аналитически при использовании метода стратегического планирования. Предложенный подход позволит выявить «болевы точки» и «точки роста» и внести соответствующие коррективы для принятия управленческих решений по поддержанию устойчивого развития на региональном уровне.

Ключевые слова: социо-эколого-экономические системы, функция желательности, метод главных компонент, SWOT-анализ, рейтинг, Нижегородская область.

INTEGRAL ANALYSIS OF THE CONDITIONS OF A REGIONAL SOCIO-ENVIRONMENTALLY-ECONOMIC SYSTEM EXEMPLIFIED WITH NISHEGORODSKAYA OBLAST

S.D. Siniushkina¹, N.I. Zaznobina^{2*}, D.B. Gelashvili², I.N. Kalashnikov¹

¹ Privolzhskiy Medical Research University of the Ministry of Health of the Russian Federation and ² N.I. Lobachevskiy State University of Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)

E-mail: ecology@bio.unn.ru

In order to assess the state of affairs in a region with account for the economic, socio-demographic and environmental aspects, to find out the causes of backwardness, and to work out ameliorating measures, it is reasonable to regard each administrative-territorial unit (ATU) as an integral socio-environmentally-economic system (SEES). ATUs in the Nizhegorodskaya Oblast were chosen to evaluate the suggested approach to integral analysis of SEES conditions and developmental degree. The approach implies calculating the values of the generalized desirability function (GDF) and their assessment using principal components and SWOT analyses. The calculated GDF values for the years 2016–2018 made it possible to distinguish leaders and outsiders among ATUs. Among all ATUs, 78% fall into the two lower classes of GDF gradation, which means that conditions are poor there. The results were confirmed by statistical analysis and were interpreted analytically using SWOT analysis. The suggested methodology makes it possible to distinguish "pain spots" and "points of increase" and correct decision making aimed to promote sustainable development at a regional level.

Keywords: socio-environmentally-economic system, desirability function, principal component analysis, SWOT analysis, rating, Nizhegorodskaya Oblast.

Введение

Антропогенное воздействие на природу приобрело такой масштаб, что в настоящее время понятие о природных экосистемах можно заменить понятием о социо-эколого-экономических системах (СЭЭС), представляющих собой совокупности образований биологической, географической, экономической и социальной природы, в основу которого положен принцип сбалансированности, обуславливающий рассмотрение СЭЭС как единого целого [9]. С одной стороны, СЭЭС предполагает рациональное природопользование на основе ресурсосберегающих технологий и безотходного производства, что обуславливает технико-экономические отношения; с другой стороны, в рамках СЭЭС отношения между людьми базируются на определении прав собственности на факторы производства, порождая производственные отношения, и с третьей стороны, СЭЭС должны характеризоваться бережным отношением к природе, охране окружающей среды, высоким уровнем сознания и духовного развития, здоровья и положительными демографическими процессами, определяющими эколого-социальные отношения. Каждая страна, каждый регион, каждый город можно рассматривать как целостную СЭЭС, в которой выделяются самостоятельные социо-демографическая, экологическая и экономическая подсистемы, состояние которых оценивается совокупностью соответствующих показателей.

Анализ СЭЭС осуществляется на основе официальных статистических данных по экологическим, экономическим, социально-демографическим индикаторам, которые часто бывает трудно сопоставить. Для корректного сравнения исследуемых объектов применяют процедуру свертывания информации, предусматривающую использование функции желательности [1, 3]. Эффективность применения обобщенной функции желательности (ОФЖ) для решения задач прикладной экологии была продемонстрирована в работах отечественных [2, 7, 8, 10, 11] и зарубежных ученых [12–14], а также подробно рассмотрена и обоснована в наших работах [4–6].

Для того чтобы сформировать полное представление о сложившейся в регионе ситуации, представляется актуальным рассматривать каждую составляющую его административно-территориальную единицу (АТЕ) как целостную СЭЭС.

Цель данного исследования – предложить способ комплексного анализа состояния и развития региональных СЭЭС систем на примере АТЕ Нижегородской области, позволяющий составить их рейтинги по степени социо-эколого-экономического развития.

Комплексный анализ подразумевает трехкомпонентное решение следующих задач:

– расчет значений ОФЖ, которая рассматривается в теории нечетких множеств как функция принадлежно-

сти и позволяет объективно сравнивать между собой разноразмерные показатели;

– оценка полученных значений ОФЖ с помощью метода главных компонент, позволяющего сократить размерность пространства признаков при минимальной потере полезной информации;

– аналитический анализ полученных значений ОФЖ с помощью SWOT-анализа – метода стратегического планирования, который используется для выявления сильных и слабых сторон, возможностей и угроз для СЭЭС на данном этапе исследования.

Материалы и методы исследования

Ключевым для оценки СЭЭС в АТЕ является выбор наиболее репрезентативных показателей согласно целям устойчивого развития. Исходным материалом для выбора послужила база данных показателей Федеральной службы государственной статистики по Нижегородской области (<https://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst22/DBInet.cgi#1>) за 2016–2018 годы.

Нижегородская область – сложное административно-территориальное образование, включающее районы и города областного значения. В качестве объектов исследования были выбраны 38 районов Нижегородской области и 9 городов областного значения. При этом с целью адекватной оценки СЭЭС в АТЕ Нижегородской области и устранения эффекта «гандикапа» были исключены из анализа гг. Нижний Новгород, Дзержинск, Бор, характеризующиеся высокими социо-экономическими показателями, которые при расчете ОФЖ занизили бы значения показателей для районов «периферии». Данный подход позволил выявить проблемные районы области, где необходимо пересмотреть политику в той или иной сфере.

Для оценки состояния СЭЭС и объективного сравнения разноразмерных показателей, характеризующих обстановку в районах, применяли процедуру свертывания информации с использованием функции желательности. Это способ перевода натуральных значений в единую безразмерную числовую шкалу с границами $0 \div 1$. Для идеально функционирующей системы «желательная» величина D должна быть равна 1, увеличение значений «нежелательных» показателей приводит к уменьшению величины D [2–4].

Методика предполагает определение частной (d) и обобщенной (D) функции желательности. Если увеличение текущего значения натурального показателя (x_i) является «желательным», то для расчета частной функции желательности применяют формулу 1:

$$d_i = \frac{2 \cdot (x_i \cdot x_{\max})}{x_i^2 + x_{\max}^2}, \quad (1)$$

где: x_{\max} – максимальное значение индикатора в сравниваемом ряду.

В случае, когда увеличение текущего значения натурального показателя (x_i) является «нежелательным», применяется формула 2:

$$d_i = \frac{2 \cdot (x_i \cdot x_{\min})}{x_i^2 + x_{\min}^2}, \quad (2)$$

где: x_{\min} – минимальное значение индикатора в сравниваемом ряду.

В общем виде ОФЖ рассчитывается по нижеприведенной формуле, в которой учитываются веса частных функций желательности:

$$D = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^n d_i^{\gamma_i}} = \sqrt[k]{d_1^{\gamma_1} \cdot d_2^{\gamma_2} \cdot d_3^{\gamma_3} \dots d_n^{\gamma_n}}, \quad (3)$$

где: n – число показателей;
 d_i – частная функция желательности;
 γ_i – весовой коэффициент.

В связи с тем, что достоверные и надежные оценки весовых коэффициентов для показателей, примененных в настоящей работе, не существуют, они были опущены (то есть приняты равными 1).

Поскольку значения ОФЖ задаются на диапазоне 0÷1, для разбиения диапазона ОФЖ на 5 классов было удобно использовать критические значения ОФЖ (функции Харрингтона), имеющие ординаты 0,8; 0,63; 0,37; 0,2. Эти классы имеют внятное смысловое название и позволяют дать приемлемую характеристику социо-эколого-экономической ситуации: очень плохая – 0,00–0,20, плохая – 0,21–0,37, удовлетворительная – 0,38–0,63, хорошая – 0,64–0,80, очень хорошая – 0,81–1,00.

Список показателей, выбранных для оценки социо-эколого-экономического развития районов Нижегородской области, представлен в табл. 1.

Показатель считается «желательным», если при его увеличении происходит улучшение какого-либо пара-

Табл. 1

Список показателей для оценки социо-эколого-экономического развития АТЕ Нижегородской области

<p>Экономические показатели:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Протяженность автодорог общего пользования местного значения, км (–)¹ – Текущие затраты на охрану окружающей среды, рубли (+)² – Протяжение уличной водопроводной/канализационной сети, замененной и отремонтированной за год (+) 	<p>Экологические показатели:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Число объектов, имеющих стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха (–) – Вывезено за год твердых коммунальных отходов, тонны (+)
<p>Социо-демографические показатели:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> – Естественная убыль населения (–) – Общий коэффициент смертности (–) – Численность населения на 01.01 текущего года (+) – Общий коэффициент рождаемости (+) – Плотность населения, чел./км² (+) – Площадь жилых помещений, м² (+) – Число населенных пунктов без водопроводов (–) – Число населенных пунктов без канализаций (–) – Общая протяженность улиц, проездов, набережных, км (+) 	<ul style="list-style-type: none"> – Число больных мочекаменной болезнью (–) – Число лечебно-профилактических организаций (+) – Численность обучающихся в общеобразовательных организациях (+) – Число общеобразовательных организаций (+) – Численность воспитанников учреждений дошкольного образования (+) – Число учреждений дошкольного образования (+) – Число спортивных сооружений (+)

Примечание: ¹(–) – увеличение индикатора нежелательно; ²(+) – увеличение индикатора желательно.

метра социо-эколого-экономического развития. Для таких показателей при расчете частной функции желательности использовали формулу (1). «Численность населения» и «коэффициент рождаемости» отражают положительные демографические тенденции в районе, а «плотность населения» и «площадь жилых помещений» позитивно характеризуют социальные условия жизни. Показатели «Число общеобразовательных организаций» и «Число учреждений дошкольного образования» отражают возможности образования как одного из важнейших социальных институтов и оценивают их уровень в конкретном районе. «Число ЛПО» характеризует степень обеспеченности населения квалифицированной медицинской помощью. «Число спортивных сооружений» позволяет оценить возможности использования в районе спорта как инструмента для решения социальных задач. «Общая протяженность улиц, проездов, набережных» характеризует степень развитости инфраструктуры района. «Одинокое протяжение замененной и отремонтированной уличной водопроводной/канализационной сети» и «Текущие затраты на охрану окружающей среды» характеризуют экономическую составляющую социальной (ремонт инженерных коммуникаций, необходимых для нормальной жизни населения) и экологической (охрана окружающей среды) сфер, отражая денежные средства, направленные на их поддержку.

Показатель считается «нежелательным», если его увеличение оказывает неблагоприятное влияние на социо-эколого-экономическое развитие. Для таких показателей при расчете частной функции желательности использовали формулу (2). «Естественная убыль» и «коэффициент смертности» отражают отрицательную демографическую динамику, «число населенных пунктов, не имеющих водопроводов /канализации» – неблагоприятную обстановку в жилищно-коммунальном хозяйстве, а мочекаменная болезнь была выбрана как одна из основных нозологических форм, заболеваемость которой в Нижегородской области в последние годы неуклонно растет. Таким образом, все эти «нежелательные» показатели отражают негативное влияние на социальную обстановку в районах и, соответственно, на жизнь и здоровье населения. Показатель «число объектов, имеющих стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха» отнесен к группе «нежелательных», поскольку промышленные выбросы загрязняют окружающую среду, что отрицательно влияет на экологическую обстановку.

Показатели подбирались таким образом, чтобы охватить основные аспекты социо-эколого-экономического развития административно-территориальных единиц Нижегородской области и получить полную, объективную оценку их состояния.

На следующем этапе исследований для понижения размерности данных методом главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) был проведен анализ СЭЭС на основе частных функций желательности при помощи статистического пакета STATISTICA 10.

На заключительном этапе исследования был проведен SWOT-анализ [15] – метод стратегического планирования, предполагающий оценку сильных и слабых сторон АЕТ Нижегородской области по экологическому, экономическому и социо-демографическому развитию – факторам внутренней среды объекта, на которые влияет СЭЭС. Также SWOT-анализ подразумевает рассмотрение возможностей и угроз – факторов внешней среды, которые могут влиять на СЭЭС. SWOT-анализ позволяет выявить «точки роста» и «болевые точки», которые необходимо принять во внимание для принятия решений властями по развитию СЭЭС и региона в целом.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена карта Нижегородской области, на которой отображена характеристика социо-эколого-экономической обстановки в административно-территориальных образованиях, определенная на основе границ градации рассчитанной ОФЖ. В целом, ситуация в регионе не самая благоприятная: лишь 19% районов характеризуются «удовлетворительной» социо-эколого-экономической обстановкой, 79% – «плохой», 2% – «очень плохой».

На основе рассчитанных значений ОФЖ впервые был составлен рейтинг административно-территориальных единиц Нижегородской области (рис. 2), и среди них были выделены «лидеры» и «аутсайдеры» по состоянию социо-эколого-экономического развития (табл. 2). Наибольшие значения ОФЖ получены для девяти административно-территориальных единиц, в том числе для г. Выксы, а также для Кстовского, Богородского, Кулебакского, Городецкого, Володарского, Павловского, Лысковского и Балахнинского районов, где социо-эколого-экономическая ситуация характеризуется как «удовлетворительная», в то время как Варнавинский район характеризуется наименьшим значением ОФЖ среди всех административно-территориальных образований Нижегородской области и соответственно «очень плохой» социо-эколого-экономической ситуацией.

Если рассматривать социо-эколого-экономическую ситуацию в районах области и городах областного значения по отдельным показателям (табл. 2), то можно отметить следующую тенденцию: районы «лидеры» относятся преимущественно к «центральным» или «южным». В то же время практически все «северные» районы в соответствии со статическими данными являются «аутсайдерами».

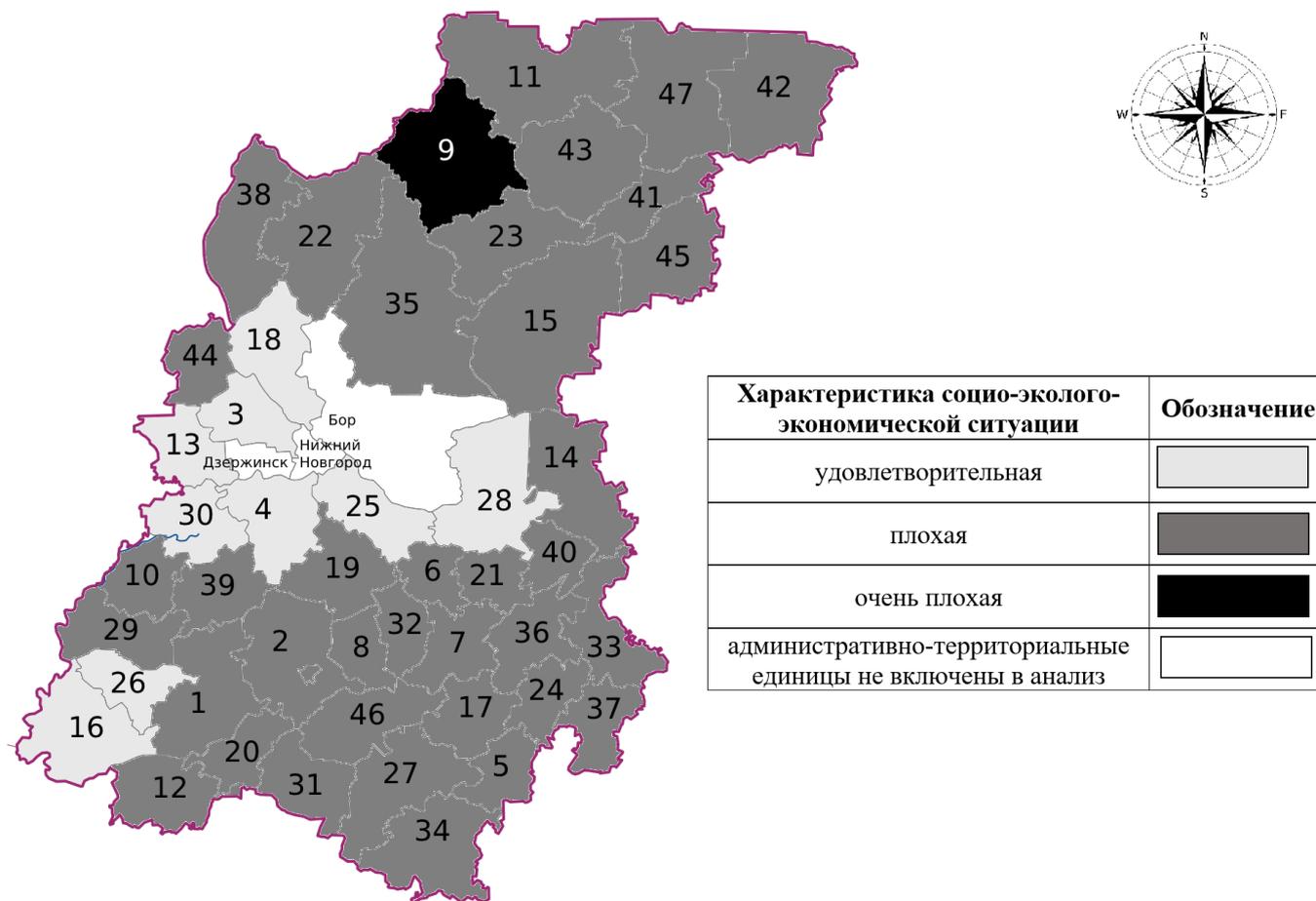


Рис. 1. Социо-эколого-экономическая обстановка в Нижегородской области в 2016–2018 годах. Административно-территориальные единицы Нижегородской области:

- | | | |
|---------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 1. Ардатовский р-н | 17. Гагинский р-н | 33. Пильнинский р-н |
| 2. г. Арзамас* | 18. Городецкий р-н | 34. Починковский р-н |
| 3. Балахнинский р-н | 19. Дальнеконстантиновский р-н | 35. г. Семенов |
| 4. Богородский р-н | 20. Дивеевский р-н | 36. Сергачский р-н |
| 5. Большеболдинский р-н | 21. Княгининский р-н | 37. Сеченовский р-н |
| 6. Большемурашкинский р-н | 22. Ковернинский р-н | 38. Сокольский р-н |
| 7. Бутурлинский р-н | 23. Краснобаковский р-н | 39. Сосновский р-н |
| 8. Вадский р-н | 24. Краснооктябрьский р-н | 40. Спасский р-н |
| 9. Варнавинский р-н | 25. Кстовский р-н | 41. Тонкинский р-н |
| 10. Вачский р-н | 26. г. Кулебаки | 42. Тоншаевский р-н |
| 11. Ветлужский р-н | 27. Лукояновский р-н | 43. Уренский р-н |
| 12. Вознесенский р-н | 28. Лысковский р-н | 44. г. Чкаловск |
| 13. Володарский р-н | 29. г. Навашино | 45. Шарангский р-н |
| 14. Воротынский р-н | 30. Павловский р-н | 46. Шатковский р-н |
| 15. Воскресенский р-н | 31. г. Первомайск | 47. г. Шахунья |
| 16. г. Выкса | 32. г. Перевоз | |

* Город областного значения.

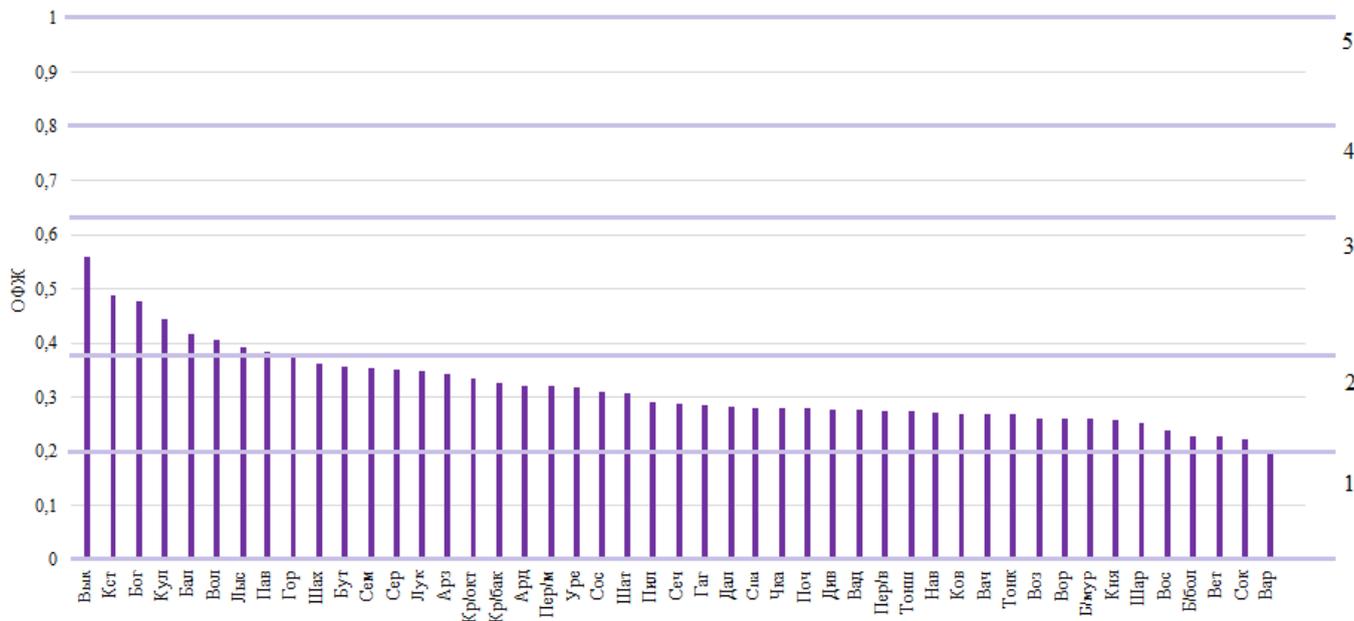


Рис. 2. Рейтинг АЕТ Нижегородской области по социо-эколого-экономическому развитию, построенный по усредненным значениям ОФЖ в 2016–2018 годах. Показаны границы классов, характеризующих социо-эколого-экономическую ситуацию: 1 – очень плохая; 2 – плохая; 3 – удовлетворительная; 4 – хорошая; 5 – очень хорошая

Табл. 2

АЕТ Нижегородской области – лидеры и аутсайдеры рейтинга по состоянию СЭЭС
(цифрами указаны значения *D*)

Лидеры		Аутсайдеры	
<i>Социальные показатели</i>			
г. Выкса	0,59	Воскресенский р-н	0,27
Володарский р-н	0,51	Гагинский р-н	0,27
Кстовский р-н	0,51	Княгининский р-н	0,27
г. Кулебаки	0,50	Тонкинский р-н	0,26
Большеболдинский р-н	0,49	Сокольский р-н	0,25
<i>Экономические показатели</i>			
Бутурлинский р-н	0,65	Воротынский р-н	0,04
Гагинский р-н	0,51	Сокольский р-н	0,04
г. Выкса	0,45	Варнавинский р-н	0,03
Краснооктябрьский р-н	0,41	Спасский р-н	0,03
Кстовский р-н	0,40	Тоншаевский р-н	0,02
<i>Экологические показатели</i>			
Тоншаевский р-н	0,79	Вачский р-н	0,28
г. Кулебаки	0,70	Дивеевский р-н	0,26
Лукояновский р-н	0,66	Сеченовский р-н	0,23
Володарский р-н	0,60	Варнавинский р-н	0,25
г. Выкса	0,56	Шарангский р-н	0,30

Экономическое развитие определенной АЕТ, связанное с наращиванием промышленного потенциала или туризма, влечет в первую очередь финансирование социальной сферы. При этом экологическая составляющая района может испытывать недостаток в финансировании природоохранных мероприятий. Однако, как прослеживается на примере самого «северного» района Нижегородской области – Тоншаевского, при слабом экономическом развитии данная территория характеризуется «очень хорошей» экологической обстановкой. Это объясняется наличием в «северных» районах Нижегородской области обширных хвойных лесных массивов. Так, в Тоншаевском районе доля лесов составляет 73,8% площади. Кроме этого, на его территории расположен заказник регионального значения «Пижемский», созданный для восстановления и поддержания экологического равновесия в бассейне реки Пижмы и на окружающих территориях, для охраны типичных биоценозов южно-таежных темнохвойных лесов, верховых, переходных и низинных болот, редких видов животных и растений.

На рис. 3 представлен совместный график факторных координат (параметры) и наблюдений (районы) в факторном пространстве, полученный в ходе анализа методом главных компонент.

При анализе графика выявлены показатели, вносящие наибольший вклад в социо-эколого-экономическую обстановку соответствующих административно-территориальных образований:

– «число объектов, имеющих стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха» – Варнавинский, Ветлужский, Воротынский, Сосновский районы, г. Навашино;

– «естественная убыль», «протяженность автодорог», «количество населенных пунктов, не имеющих канализаций/водопроводов» – Дивеевский, Княгининский, Большеболдинский районы, г. Первомайск, г. Перевоз;

– «коэффициенты рождаемости и смертности», «количество вывезенных ТБО», «затраты на охрану окружающей среды», «количество дошкольных и школьных образовательных организаций» – Кстовский, Павловский, Балахнинский, Уренский, Ковернинский районы, г. Выкса;

– «количество ЛПУ», «протяженность улиц», «протяжение уличной водопроводной и канализационной сети, которая заменена и отремонтирована» – Богородский, Городецкий, Лысковский районы, г. Шахунья, г. Семенов, г. Арзамас.

Анализ нормативных правовых актов органов местного самоуправления АЕТ Нижегородской области за 2016–2018 годы показал, что наибольший вклад в обстановку в районах, являющихся лидерами по значению ОФЖ, вносят по большей части социальные показатели, что может быть объяснено активной политикой в области социальной сферы, которая проводится в этих районах.

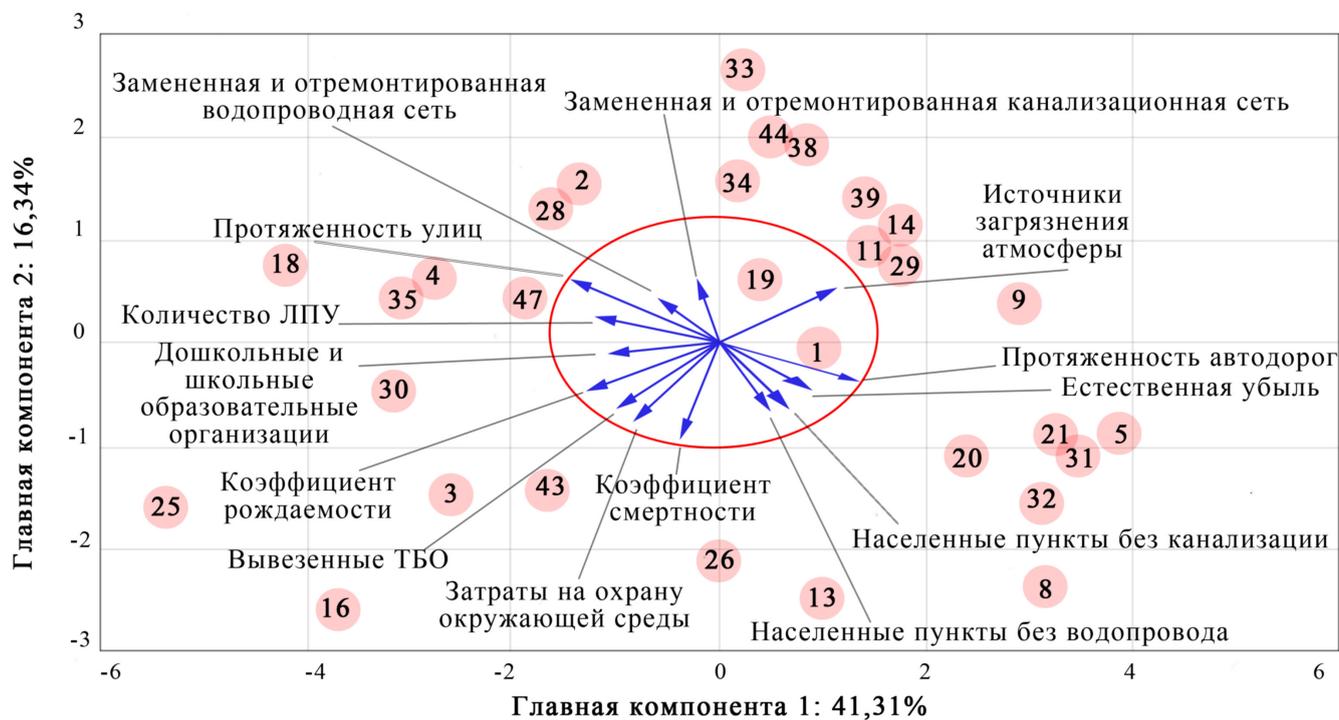


Рис. 3. Совместный график факторных координат и наблюдений. Цифры на поле рисунка соответствуют номерам административно-территориальных единиц Нижегородской области, указанных на рис. 1

Так, например, в г. Выксе общая социально-экономическая ситуация в последние годы характеризуется умеренными показателями роста в большинстве секторов экономики, что в свою очередь благоприятно влияет на уровень жизни населения. В целях улучшения демографической ситуации реализуется план мероприятий в связи со стратегией демографического развития. Ведется работа по улучшению качества городской среды, в том числе реализована программа «Пять шагов благоустройства». Администрацией округа разработана социальная поддержка жителей округа, а также программы «Молодая семья» и «Охрана окружающей среды на территории городского округа город Выкса Нижегородской области». Экологическая обстановка в соответствии со значением ОФЖ является удовлетворительной.

В Кстовском районе также осуществляется план мероприятий, направленных на улучшение демографической ситуации, в рамках реализации Концепции демографического развития Нижегородской области. Эта программа преследует цели по снижению смертности от различных причин, профилактике и своевременному выявлению профессиональных заболеваний, снижению уровня младенческой, детской и материнской смертности, а также по увеличению рождаемости, поддержке семей, укреплению института семьи, мотивированию к здоровому образу жизни. Стоит отметить, что по значениям ОФЖ экологическое состояние в Кстовском районе характеризуется как удовлетворительное.

В Богородском, Балахнинском районах и г. Кулебаки реализуется программа по социальной поддержке



Рис. 4. SWOT-анализ АЕТ Нижегородской области, являющихся лидерами рейтинга по состоянию СЭЭС



Рис. 5. SWOT-анализ АЕТ Нижегородской области, являющихся аутсайдерами рейтинга по состоянию СЭЭС

граждан, в том числе молодых семей, старшего поколения, лиц с ограниченными возможностями здоровья. Экологическая обстановка в Богородском и Балахнинском районах в соответствии с рассчитанными значениями ОФЖ – удовлетворительная, в г. Кулебаки – хорошая.

Демографическая ситуация в Варнавинском районе, который является аутсайдером в соответствии с нашими расчетами, сохраняет тенденцию превышения смертности над рождаемостью. Экономическая обстановка в соответствии с ОФЖ характеризуется как «очень плохая». Это, в частности, обусловлено такими показателями, как «текущие затраты на охрану окружающей среды», «одиночное протяжение уличной водопроводной/канализационной сети, которая заменена и отремонтирована за отчетный год». Несмотря на невысокий показатель ОФЖ по экологическим показателям, в районе есть условия для улучшения обстановки: отсутствие крупных промышленных предприятий и других мощных источников загрязнения окружающей среды, низкий уровень антропогенной нагрузки.

SWOT-анализы для административно-территориальных единиц Нижегородской области, являющихся лидерами и аутсайдерами в соответствии с рассчитанной ОФЖ, представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Заключение

Таким образом, рейтинг АЕТ Нижегородской области, построенный на основе комплекса показателей официальной статистики с применением обобщенной функции желательности, подтверждается методами математической статистики и может быть объяснен при использовании метода стратегического планирования. Комплексное выявление социо-эколого-экономических проблем и перспектив развития районов

дает возможность принимать грамотные управленческие решения для выявления «болевых точек» и «точек роста», являющихся лимитирующими в поддержании устойчивого развития на региональном уровне. Так, например, в Тоншаевском районе очень благоприятная экологическая обстановка, но при этом крайне низкие экономические показатели. Поэтому необходимо более тщательное и детальное рассмотрение бюджета района для последующей его активизации, а также стоит сделать акцент на улучшение социальных условий жизни населения – проведение подобного рода мероприятий позволит сбалансировать социо-эколого-экономическую ситуацию в районе.

В Кстовском районе, наоборот, хорошо развиты социальная и экономическая составляющие, в то время как экологическая обстановка не обнадеживает. Соответственно, необходимо принятие управленческих решений для проведения природоохранных мероприятий в крупных масштабах, активное внедрение очистных сооружений на производствах, снижение уровня антропогенного воздействия на окружающую среду и т. д.

Варнавинский район, характеризующийся наихудшим социо-эколого-экономическим развитием, относится к «аутсайдерам» по каждому аспекту в отдельности, поэтому в данном районе необходимы разработка и внедрение радикальных мер по развитию данной СЭЭС.

Реализация предложенного подхода позволит получить удобный инструментарий для комплексного анализа состояния и развития разномасштабных и разноразмерных социо-эколого-экономических систем, а также составления их рейтинга, что имеет важное значение в процедуре управления местными, региональными и федеральными СЭЭС.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Адлер ЮА, Маркова ЕВ, Грановский ЮВ. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука; 1976.
2. Булгаков НГ. Индикация состояния природных экосистем и нормирование факторов окружающей среды: Обзор существующих подходов. Успехи современной биологии. 2002;122(2):115-35.
3. Воробейчик ЕЛ, Садыков ОФ, Фарафонов МГ. Экологическое нормирование техногенных загрязнений. Екатеринбург: Наука; 1994.
4. Гелашвили ДБ, Зазнобина НИ, Лисовенко АВ. Количественные методы оценки состояния урбоэкосистем. В кн.: Экологический мониторинг. Методы биологического и физико-химического мониторинга. Ч. VII. Н. Новгород: ННГУ; 2011, с. 80-110.
5. Зазнобина НИ, Молькова ЕД, Якимов ВН, Гелашвили ДБ. Сравнительная динамика социо-эколого-экономических систем регионов Приволжского федерального округа на основе обобщенной функции желательности. Известия Самарского НЦ РАН. 2016;18(2):675-80.
6. Зазнобина НИ, Молькова ЕД, Басуров ВА, Гелашвили ДБ. Рейтинговый анализ стран «БРИКС» по социо-эколого-экономическим показателям на основе обобщенной функции желательности. Проблемы региональной экологии. 2018;(3):137-42.

7. Королев АА, Розенберг ГС, Гелашвили ДБ, Панютин АА, Иудин ДИ. Экологическое зонирование территории Волжского бассейна по степени нагрузки сточными водами на основе бассейнового принципа (на примере Верхней Волги). Известия Самарского НЦ РАН. 2007;9(1):265-9.
8. Носов ВН, Булгаков НГ, Максимов ВН. Построение функции желательности при анализе данных экологического мониторинга. Известия РАН Сер биол. 1997;(1):69-74.
9. Розенберг ГС, Черникова СА, Краснощеков ГП, Крылов ЮМ, Гелашвили ДБ. Мифы и реальность «устойчивого развития». Проблемы прогнозирования. 2000;(2):130-54.
10. Федоров ВД, Сахаров ВБ, Левич АП. Количественные подходы к проблеме оценки нормы и патологии экосистем. В кн.: Человек и биосфера. М.: Изд-во МГУ; 1982, с. 3-42.
11. Фрумин ГТ, Баркан ЛВ. Комплексная оценка загрязненности Ладожского озера по гидрохимическим показателям. Водные ресурсы. 1997;24(1):315-9.
6. Zaznobina NI, Molkova ED, Basurov VA, Gelashvili DB. [Rating analysis of the BRICS countries, socio-ecological-economic indicators on the basis of the generalized desirability function]. Problemy Regionalnoy Ekologii. 2018;(3):137-42. (In Russ.)
7. Korolev AA, Rozenberg GS, Gelashvili DB, Panyutin AA, Iudin DI. [Ecological zoning of the Volga basin territory on the sewage loading degree on the basin principle basis (by the top Volga example)]. Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2007;9(1):265-9. (In Russ.)
8. Nosov VN, Bulgakov NG, Maksimov VN. [Construction of the desirability function in the analysis of environmental monitoring data]. Izvestiya RAN Seriya Biologicheskaya. 1997;(1):69-74. (In Russ.)
9. Rozenberg GS, Chernikova SA, Krasnoshchekov GP, Krylov YuM, Gelashvili DB. [Myths and reality of «Sustainable development»]. Problemy Prognozirovaniya. 2000;(2):130-54. (In Russ.)
10. Fedorov VD, Sakharov VB, Levich AP. [Quantitative approaches to the problem of assessing the norm and pathology of ecosystems]. In: Chelovek i Biosfera. Moscow: Izdatelstvo MGU; 1982. P. 3-42. (In Russ.)

Общий список литературы/Reference List

1. Adler YuA, Markova EV, Granovskiy YuV. Planirovaniye Eksperimenta pri Poiske Optimalnykh Usloviy. Moscow: Nauka; 1976. (In Russ.)
2. Bulgakov NG. [Indication of the state of natural ecosystems and regulation of environmental factors: An overview of existing approaches]. Uspekhi Sovremennoy Biologii. 2002;122(2):115-35. (In Russ.)
3. Vorobeychik EL, Sadykov OF, Farafontov MG. Ekologicheskoye Normirovaniye Tekhnogennykh Zagryazneniy. Yekaterinburg: Nauka; 1994. (In Russ.)
4. Gelashvili DB, Zaznobina NI, Lisovenko AV. [Quantitative methods for assessing the state of urban ecosystems]. In: Ekologicheskii Monitoring. Metody Biologicheskogo i Fiziko-Khimicheskogo Monitoringa. Ch. VII. Nizhniy Novgorod: NNGU; 2011. p. 80-110. (In Russ.)
5. Zaznobina NI, Molkova ED, Yakimov VN, Gelashvili DB. [The comparative dynamics of social-ecological-economic systems of Privolzhskiy federal district regions on the basis desirability generalized function]. Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2016;18(2):675-80. (In Russ.)
11. Frumin GT, Barkan LV. [Comprehensive assessment of pollution of Lake Ladoga by hydrochemical indicators]. Vodnye Resursy. 1997;24(1):315-9. (In Russ.)
12. Akteke-Öztürk B, Weber GW, Köksal G. Optimization of generalized desirability functions under model uncertainty. Optimization J Math Programm Operat Res. 2017;66(12):2157-69.
13. Akteke-Öztürk B, Weber GW, Köksal G. Generalized desirability functions: a structural and topological analysis of desirability functions. Optimization J Math Programm Operat Res. 2020;69(1):115-30.
14. Padilla-Atondo JM, Limon-Romero J, Perez-Sanchez A, Tlapa D, Baez-Lopez Y, Puente C, Ontiveros S. The impact of hydrogen on a stationary gasoline-based engine through multi-response optimization: a desirability function approach. Sustainability. 2021;13(3):1385.
15. Wehrich H. The TOWS Matrix – A tool for situational analysis. Long Range Planning. 1982;15(2):54-66.

ПРОБЛЕМЫ АКТУАЛИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПРАКТИК В ЯМАЛО-НЕНЕЦКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ

Е.В. Абакумов¹, Е.Н. Моргун²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург (Россия);

² ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард (Россия)

Эл. почта: morgun148@gmail.com; e_abakumov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2021; принята к печати 09.12.2021

Исследованы особенности сельскохозяйственной деятельности на разновозрастных агроценозах и залежных землях Ямало-Ненецкого автономного округа с учетом постагрогенной трансформации экосистем в криогенных условиях. Земледельческие практики в ЯНАО во многом соответствуют принятым в финской Лапландии, Южной Гренландии в отдаленных рыбацких поселениях Аляски. Под огороды и поля в ЯНАО выбирают хорошо дренированные участки с супесчаными, легко- и среднесуглинистыми, дерново-луговыми или дерново-подзолистыми почвами, легкопрогреваемыми и не заплывающими при выпадении обильных осадков. Глубина залегания многолетнемерзлых пород снижается на распаханых участках и зависит от давности их освоения. Содержание доступных форм фосфора и калия в верхнем слое залежных почв даже через 5–20 лет остается очень высоким. Применение агротехник (мульчирование, дренаж, внесение навоза и компостов из рыбы) повышает плодородие почв. На сегодняшний день на территории ЯНАО земледельческие практики находятся в упадке по таким причинам, как отдаленность (проблемы логистики), зависимость от погодных условий, сложности в обработке полей, отсутствие рынка сбыта сельскохозяйственной продукции, ограничение в выборе продукции из-за природных условий и специфики аграрной отрасли. Коренные малочисленные народы Севера образуют системную целостность с ландшафтами, поэтому могут существовать и развиваться только при сохранении традиционного образа жизни, целью которого является воспроизводство жизненного уклада в гармонии с природой и социальным окружением.

Ключевые слова: земледельческие практики, агроценозы, залежные почвы, Ямало-Ненецкий автономный округ, многолетнемерзлые породы.

THE PROBLEMS OF UPDATING AGRICULTURAL PRACTICES IN THE YAMAL-NENETS AUTONOMOUS REGION

Ye.V. Abakumov¹, Ye.N. Morgun²

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg (Russia)

² Arctic Research Centre of Yamal-Nenets Autonomous Region, Salekhard (Russia)

E-mail: morgun148@gmail.com; e_abakumov@mail.ru

Agricultural practices in agrocenoses of different ages and in fallow lands of Yamal-Nenets Autonomous Region of the Russian Federation were studied with account for post-agrogenic transformations of soils under cryogenic conditions.

Agricultural practices in the YNAR are much consistent with those in Finnish Lapland, Southern Greenland, and remote fishing villages in Alaska. Well-drained areas with sandy, light and medium loamy, sod-meadow or sod-podzolic soils, which are easily warmed and not floating in cases of heavy rainfall, are selected for gardens and fields. The depth of permafrost is reduced in plowed areas and depends on the age of their development. The content of available forms of phosphorus and potassium in the upper layer of fallow soils remains very high even through 5-20 years. The use of agricultural techniques, including mulching, drainage, and application of manure and compost derived from fish, increases soil fertility. Currently, agriculture in YNAR decays for such reasons as remoteness (logistics problems), dependence on weather conditions, difficulties in field cultivation, lack of market for agricultural products, and limited choice of products due to natural conditions and the specifics of the agricultural industry. The small indigenous peoples and the landscapes of the North are inseparable and may be sustainable only based on the traditional ways of life harmonized with the natural and social environments.

Keywords: agricultural practices, agroecosystems, fallow soils, Yamal-Nenets Autonomous Region, permafrost.

Введение

Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) является ключевой опорной зоной Российской Федерации в Арктике и представляет особый интерес как территория, где происходило как масштабное освоение земель и их мелиорации, так и, за последние годы, неконтролируемый перевод их в залежное состояние и последующее выведение из сельскохозяйственного использования. Все это привело к формированию хронорядов почв с разной степенью воздействия агрогенных факторов. Действующие и залежные агроэкосистемы в ЯНАО являются уникальными объектами, которые представлены моделями развития, деградации, проградации и, в целом, эволюции компонентов биогеоценозов во времени и пространстве в связи с разнонаправленной динамикой агрогенного воздействия. Комплексное изучение агропотенциала почвенного покрова в ЯНАО с целью последующей экологизации сельскохозяйственных практик и увеличения продуктивности агроэкосистем в условиях сурового заполярного климата будет способствовать развитию зеленой экономики округа.

Мониторинг почв в Ямало-Ненецком автономном округе, пригодных для выращивания овощных культур, приобретает дополнительную значимость в связи с необходимостью решения проблем продовольственной безопасности населенных пунктов, находящихся в зависимости от транспортной инфраструктуры в связи с их удаленностью от производителей сельскохозяйственной продукции. Эта значимость усиливается жесткой конкуренцией за рынки сбыта сельскохозяйственной продукции, особенно в зонах рискованного земледелия. Ввиду зависимости ЯНАО от внешних поставок пищевых продуктов необходимо определить условия освоения его территорий для обеспечения продовольственной независимости округа доступностью собственной экологически чистой овощной продукции.

Данные о сельскохозяйственных практиках в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа должны лечь в основу системы бонитировки почв его агроландшафтов, которая, с учетом географической и агроэкологической специфики почвенного покрова, должна быть адаптированной к региональным условиям [2].

Материалы и методы

В период 2015–2020 годов обследовались агроценозы Приуральского, Ямальского, Шурышкарского и Надымского районов ЯНАО, изучались почвы рекреационно функциональных зон (поля, огороды, разновозрастные залежи) и аналогичные фоновые почвы за пределами населенных пунктов. Подходы к анализу сельскохозяйственных практик основаны на использовании сравнительно-географического, эколого-экономического, картографического и других методов, описанных в [2].

Результаты и обсуждение

По свидетельствам сотрудников Ямальской сельскохозяйственной станции, в начале 1990-х годов только в г. Салехарде насчитывалось больше сотни огородов [4]. Около тысячи приусадебных участков возделывались в Пуровском, Красноселькупском, Шурышкарском и Надымском районах. На сегодняшний день, согласно данным департамента агропромышленного комплекса ЯНАО, суммарная площадь продуктивных агроценозов составляет около 4,8%¹. Больше всего развиты сельскохозяйственные практики в Шурышкарском районе: в населенных пунктах (особенно по Большой Оби) огороды есть практически у всех жителей. Так, в селе Горки (Шурышкарский район, ЯНАО) активно выращивают картофель, капусту, кабачки, морковь, свеклу. По сведениям, полученным от местного населения, в советское время у многих было по 4 огорода на относительно больших площадях. Овощи активно покупало государство для школ-интернатов. Многие старожилы продолжают заниматься выращиванием картофеля, капусты, редиса, моркови, редьки, укропа и обеспечивают себя овощами на всю зиму.

В исследуемых районах под огороды и поля, как правило, выбирают хорошо дренированные, незатопляемые паводковыми водами участки, расположенные достаточно высоко относительно рек и других водоемов, незаболоченные территории тундры, закустаренные и залесенные участки высоких речных террас. Почвы на таких участках в основном супесчаные, легко- и среднесуглинистые, дерново-луговые или дерново-подзолистые, обладающие относительно высоким плодородием и системой дренажа, при этом они хорошо аккумулируют тепло, легче обрабатываются, меньше уплотняются и не заплывают при выпадении обильных осадков. На таких почвах моховая подушка маломощная, а растительность представлена злаковыми травами или включает их. Закустаренные площади более затратные для освоения, зато почва на таких участках плодородная, в то время как площади с незначительным растительным покровом (особенно лишайниковые фитоценозы) легче разрабатываются, но требуют внесения большого количества органических удобрений.

При выборе участков под огороды жители Шурышкарского и юга Приуральского районов, как и в районах Южной Гренландии [5], предпочитают возделывать склоны хорошо прогреваемых солнцем южных направлений, где температурный режим почв более благоприятный.

Установлено, что наличие многолетнемерзлых пород (далее – ММП) оказывает влияние на рост и развитие сельскохозяйственных растений на северных

¹ Сайт департамента агропромышленного комплекса ЯНАО: <https://dapk.yanao.ru/>

территориях, предопределяет тепловые и физико-химические процессы, ослабляет микробиологическую активность, подавляет процессы нитрификации, особенно в естественных условиях, где преобладает грибковое разложение органического вещества. При этом, как отмечают исследователи, глубина залегания ММП понижается на распаханых участках и зависит от давности их освоения [4, 6]. Так, по данным сотрудников Ямальской сельхозопытной станции на целинной тундре ММП залегают на глубине 20–30 см, на супесчаных дренированных участках уходят до 1 м, на вновь освоенных – до 1,2–1,5 на старопашотных – от 2–2,5 м [4].

По результатам наших исследований, проведенных в 2019–2020 годах в Приуральском и Шурышкарском районах ЯНАО, на староосвоенных почвах агроценозов глубина залегания ММП опускалась на 80–90 см

по сравнению с целинными аналогами, на «молодых» залежных почвах – на 7–17 см (табл. 1), что соотносится с результатами исследований в других циркулярных регионах [6]. Такие исследования необходимо продолжить, в том числе и в других районах ЯНАО.

Интересен также тот факт, что в июле 1986 года ММП в почве на поле Ямальской сельхозопытной станции отмечалось на глубине 165 см [3], в июле 2020 года – на глубине 143 см.

Влияние ММП на почвенное плодородие предопределяет изменение температурного, водного и микробиологического режимов. Лесотундровые почвы с подавленным микробиологическим процессом очень важно содержать в рыхлом состоянии. Физические свойства можно улучшать внесением навоза, перегноя, опилок, соломы и т. д. При этом значительно улучшается химический состав почв. Так, опрос жи-

Табл. 1

Глубина залегания многолетнемерзлых пород (ММП) на целинных и окультуренных почвах Приуральского и Шурышкарского районов ЯНАО в 2019–2020 годах

Название площадки	Название почвы	Глубина залегания ММП, см	Название фитоценоза
<i>г. Салехард, Приуральский район</i>			
<i>Фон</i> Целинная (зрелая) тундра	Зедоксиморфная глеевая грубогумусированная криотурбированная	55	Ерниково-ивово-моховой
<i>Агроценоз</i> Поле, 2-летняя залежь	Агродерново-подбур иллювиально-железистый	143	Злаково-разнотравный
<i>с. Мужы, Шурышкарский район</i>			
<i>Фон</i> Зрелая северная тайга за пределами села	Дерново-подбур глеевый грубогумусовый иллювиально-железистый	48	Березово-лиственничный кустарниково-кустарничковый сфагновый лес с редким кедром
<i>Агроценоз</i> Огород, 3–4-летняя залежь	Дерново-подбур постагрогенный иллювиально-железистый	65	Разнотравный
<i>д. Ямгорт, Шурышкарский район</i>			
<i>Фон</i> Зрелая северная тайга за пределами деревни	Подбур иллювиально-железистый	74	Лиственничник моховой
<i>Агроценоз</i> Огород, 4-летняя залежь	Дерново-подбур постагрогенный	91	Разнотравный
<i>Агроценоз</i> Огород, 6-летняя залежь	Агродерново-подбур иллювиально-железистый	81	Разнотравный
<i>Агроценоз</i> Поле, 2-летняя залежь	Агродерново-подбур иллювиально-железистый	<80	Рудерально-травно-злаковый луг
<i>с. Овгорт, Шурышкарский район</i>			
<i>Фон</i> Зрелая северная тайга за пределами села	Дерново-подбур иллювиально-грубогумусированный	50	Темнохвойный брусничный лес с примесью березы
<i>Агроценоз</i> Огород, 3–4-летняя залежь, огород разрабатывался более 20 лет	Агродерново-подбур иллювиально-железистый	130	Разнотравный

телей Шурышкарского района (село Мужи, д. Ямгорт) показал, что мульчирование соломой, полиэтиленовой пленкой и опилками значительно улучшает урожайность таких культур, как картофель, свекла и морковь. В ходе экспедиций 2019–2020 годов нами отмечены удачные попытки выращивания даже такой теплолюбивой культуры, как садовая клубника (рис. 1).

В селе Горки (Шурышкарский район) для выращивания клубники некоторые огородники под грядками прокладывают трубы с горячей водой, и таким образом почва прогревается достаточно для созревания этой культуры.

Интенсивное использование в Шурышкарском районе таких агрономелиоративных мероприятий, как дренаж (рис. 2, 3), также повышает урожайность сельскохозяйственных культур. Аналогичные практики применяют и в финской Лапландии [7].



Рис. 1. Использование агротехнологии мульчирования на агродерново-подбуре иллювиально-железистом при выращивании клубники (село Мужи, Шурышкарский район, ЯНАО)

На территории, расположенной на 513 км севернее, в Ямальском районе, агрономелиоративные приемы к положительному результату не привели (рис. 4). По отзывам местных жителей, на возделываемом участке не выросло ничего, кроме сорняков.

Почвы полей и огородов Шурышкарского и Приуральского районов ЯНАО из-за повышенной кислотности регулярно известкуют (из расчета 300–500 г/м² примерно каждые 3–5 лет), а при осенней или весенней перекопке ежегодно вносят органические удобрения – навоз, торф, перегной, компосты, птичий помет (10–15 кг/м² навоза, или 10–12 кг/м² торфоизвесткового компоста). В деревнях ЯНАО в течение всего года собирают пищевые отходы в компостные бочки, а затем весной при вспашке вносят в почву. В деревне Ямгорт, которая является этнической рыбацкой деревней народа ханты, компосты делают из рыбных остатков. В ряде



Рис. 2. Использование агрономелиоративных мероприятий (дренаж) на дерново-подбуре агрогенном при выращивании огородных культур (село Мужи, Шурышкарский район, ЯНАО, 65° северной широты)



Рис. 3. Использование агрономелиоративных мероприятий (дренаж) на дерново-подбуре агрогенном при выращивании огородных культур (деревня Ханты-Мужи, Шурышкарский район, ЯНАО, 65° северной широты)

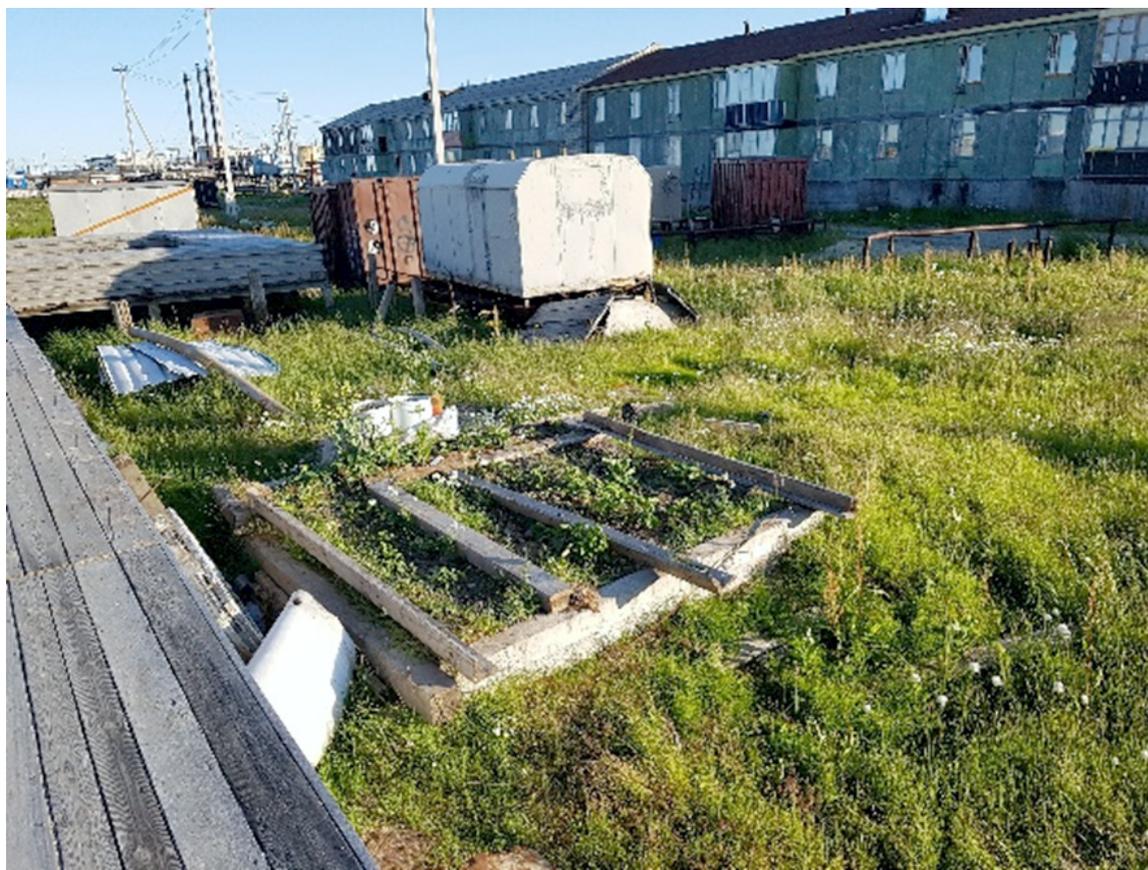


Рис. 4. Попытки использовать агромелиоративные мероприятия (дренаж) на редоксиморфной глеевой грубогумусированной криотурбированной почве при выращивании огородных культур (село Мыс Каменный, Ямальский район, ЯНАО, 68° северной широты)

труднодоступных этнических поселений (д. Ямгорт, с. Катравож и др.) коров могут подкармливать запаренной рыбой, что также сказывается на качестве навоза. Подобная практика повсеместно распространена и в отдаленных рыбацких поселениях Аляски [8].

В полярных земледельческих практиках обязательно внесение золы в количестве 1,5–2,0 кг/м². Зола понижает кислотность почвы и не только является калийным удобрением, но и содержит большое количество микроэлементов. Крестьяне собирают золу из печей и вносят в почву вместе с минеральными удобрениями перед боронованием. Из минеральных удобрений наиболее распространено применение аммиачной селитры (15–20 г/м²), суперфосфата (30–40 г/м²), калия (35–40 г/м²). Для суглинистых почв (рис. 5) обязательно вносят песок.

Почвенный разрез, показанный на рис. 5, заложен на 3–4-летней залежи (огород в с. Мужы). Огород возделывался с 1985 по 2015 год. В течение 30 лет выращивали репу, капусту, морковь. Ежегодно вносили навоз конский и коровий (смешанный), периодически – компосты, песок, торф. В результате за 30 лет сформировался дерново-подбур постагрогенный иллювиально-

железистый. Агрофитоценоз включает мятликовые *Poaceae* Barnhart (soc): вейник *Calamagrostis holmii* Lange, мятлик *Poa alpina* L., овсяницу *Festuca ovina* L., пырейник *Elymus kronokensis* (Kom.) Tzvel., луговик *Deschampsia borealis* (Trautv.) Roshev.; а также крапиву *Urtica dioica* (sp), ромашку *Matricaria hookeri* (sp), лютик *Ranunculus borealis* Trautv. (un); одуванчик *Taraxacum* (rar). Проективное покрытие – 100–80%. Средняя высота травостоя – 10–15 см. Название фитоценоза – разнотравно-злаковый луг.

Почвенный профиль, показанный на рис. 6, заложен на 6-летней залежи (огород в деревне Ямгорт), где за почти 20 лет сформировался агродерново-подбур постагрогенный иллювиально-железистый. Проективное покрытие травяного яруса – 100%, средняя высота травостоя – 25–30 см. Видовой состав относительно богат: пырей *Elytrigia répens* (soc), одуванчик *Taraxacum officinale* (sp), крапива *Urtica dioica* (cop1), мятлик *Poa trivialis* (cop1), подорожник *Plantago média* (sp), лютик *Ranunculus borealis* Trautv. (sp), иван-чай *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. (cop1), жабрица *Séseli libanótis* (rar). Название фитоценоза – злаково-рудеральнотравный луг.



Рис. 5. Дерново-подбур постагрогенный иллювиально-железистый на 3–4-летней залежи в с. Мужы Шурышкарского района.
 P (0–2 см) – дерн, темно-серого цвета. Горизонт содержит много корней травянистой и кустарничковой растительности, детрит. Влажный; бесструктурный; уплотненный; переход резкий; граница ровная.
 O (2–19(21) см) – темно-серого цвета с белесыми вкраплениями. Пронизан корнями травянистой и кустарничковой растительности. Влажный, уплотненный, мелкозернистый, легкий суглинок; переход резкий; граница волнистая.
 BF1 (19(21)–27 см) – светло-серый горизонт с белесоватым оттенком. Супесь, влажный, рыхлый, бесструктурный. Переход ясный; граница ровная.
 BF2 (27–29 см) – гумусовый погребенный горизонт с включениями дресвы и древесного угля, содержит обломки деревянной доски. Присутствует детрит. Горизонт содержит корни травянистой кустарничковой растительности. Горизонт увлажненный; уплотненный; супесь. Переход резкий; граница ровная.
 C (29–41 см) – темно-бурый, редкие корни травянистой растительности, редоксиморфные пятна до 1 см. Уплотненный, вложенный, плитовидный, переход постепенный, граница волнистая.
 C2 (41–65 см) – горизонт светло-бурого цвета, глина, глыбистая, влажная, плотная.
 C ММП (65–... см) – бурый.

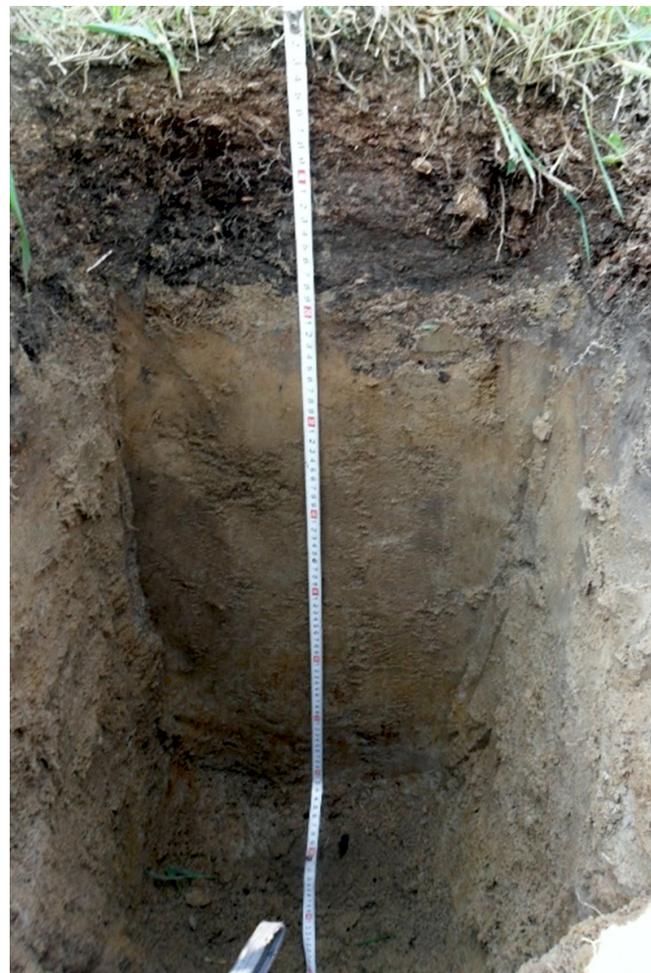


Рис. 6. Агродерново-подбур постагрогенный иллювиально-железистый на 6-летней залежи в деревне Ялгорт Шурышкарского района.
 P (0–18(24) см) – гумусовый горизонт темно-серого цвета с черным оттенком, содержит детрит. Характеризуется частыми органогенными включениями, включает корни растений, по структуре горизонт является мелкозернистым, по гранулометрическому составу – легкий суглинок, горизонт увлажненный и рыхлый. Переход ясный по цвету; граница сильно волнистая.
 BF (18(24)–41 см) – горизонт темно-бурого цвета с коричневым оттенком, имеются корни растений. Горизонт характеризуется редоксиморфными признаками в виде рыжих пятен и пленок, диаметром до 3 см; горизонт пронизан оглееными прослойками сизого цвета, с вышележащего горизонта поступают языки гумуса. По структуре горизонт плитовидный, по гранулометрическому составу – легкий суглинок, увлажненный и плотный. Переход постепенный; граница ровная.
 Cg (41–81 см) – горизонт бурый с сизо-коричневым оттенком, имеются очень редкие органогенные включения слаборазложившихся корней растений, по всему горизонту – редоксиморфные признаки в виде рыжих пятен, диаметром до 10 см. По структуре горизонт глыбисто-плитовидный, по гранулометрическому составу – средний суглинок. Процесс оглеения развит гораздо сильнее, нежели в вышележащем горизонте.
 СММП (81–... см) – буроватый.



Особо интересным является поле Ямальской сельскохозяйственной станции в пределах города Салехарда, которое выделено с 1932 года и вошло в систему Полярного земледелия СССР [1]. Ежегодно там проводили эксперименты по внесению навоза и минеральных удобрений ($N_{120}P_{90}K_{90}$) в разных пропорциях [3]. В среднем навоз вносили в количествах от 60 до 120 т/га, также осуществляли известкование. Агрохимическими анализами было установлено, что внесение навоза и минеральных удобрений эффективно повышает плодородие почвы, внесение минеральных удобрений по навозному фону обеспечивает относительно большой запас азота, фосфора и калия [3]. При сравнении содержания азота, фосфора и калия в почве 2020 года (2-летняя залежь) с данными 1986 года [3] установлено, что за 34 года содержание подвижного фосфора в верхнем (0–20 см) слое почвы (агродерново-подбур иллювиально-железистый оглеенный) увеличилось в 2 раза, а в сравнении с целинным аналогом – в 11,3 раза (за 88 лет). Содержание подвижного калия уменьшилось в 1,3 раза, и при сравнении с фоном – уменьшилось 1,95 раза. Содержание нитратного азота за 34 года уменьшилось в 1,3 раза; в тундровой почве – не выявлено.

В 2012 году были обследованы некоторые агроценозы Приуральского и Шурышкарского районов, в том числе в деревне Ямгорт (Шурышкарский район)². За 8 лет окультуривания содержание аммонийного азота выросло в 1,86 раза; подвижного фосфора – в 45,5 раза; подвижного калия – в 12,9 раза.

Примечательно, что при сравнении с огородами в той же деревне Ямгорт содержание подвижного фосфора и калия на поле выше практически в 10 раз; нитратного азота – в 2,4 раза. Очевидно, это связано с более интенсивным использованием огородов, несоблюдением там ротации культур, отсутствием достаточных доз вносимого навоза, а также нарушением оптимальных сроков внесения удобрений. Кроме того, по свидетельствам населения, данный огород периодически подвергается затоплению паводковыми водами.

Для оценки агропотенциала и реализации мер по локализации производства органической продукции в удаленных районах ЯНАО в 2018–2020 годах был изучен ряд агропочв (в залежном состоянии и в состоянии активного сельскохозяйственного использования) с использованием морфологических, агрохимических и метагеномных методов [9–12]. Содержание доступных форм фосфора и калия в верхнем слое залежных почв даже через 5–20 лет остается очень высоким ($>250 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$) [11].

² Отчет о НИР «Осуществление мониторинга земельных участков Ямало-Ненецкого автономного округа, пригодных для внедрения технологий культивации картофеля». Тюмень; ГНУ ВНИИВЭА РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ; 2012:1-20.

Эффективность биологического земледелия в разных сельскохозяйственных зонах прямо зависит от наличия в хозяйствах и растениеводства, и животноводства. В советское время в Шурышкарском районе для удобрения огородов навоз предоставляли совхозы; кроме того, многие жители держали по несколько коров, а навоз использовали для удобрения. На сегодняшний день в поселениях исследуемых районов животноводство практически полностью исчезло; осталось не больше 2–3 коров на деревню. Поэтому проблема с удобрением почвы стоит сейчас очень остро: жители или совсем бросают истощенные земли (иногда начинают с нуля обрабатывать соседние участки), а многие, кто владеет собственными автомобилями, по зимнику возят навоз в мешках (в багажниках, в прицепах) из Салехарда, где пока еще сохранился действующий коровник. В тех населенных пунктах, которые находятся недалеко от границы с Ханты-Мансийским автономным округом, покупают привозной навоз, который подвозят на баржах летом или по зимнику зимой. Сроки внесения навоза при этом смещаются, что тоже не лучшим образом сказывается на системе обработки почвы и на урожайности.

Для полного обеспечения органическими удобрениями необходимо содержать не менее 1 головы крупного рогатого скота на гектар. В странах, специализирующихся на биологическом земледелии, соотношение минеральные удобрения/навоз составляет 5410 кг/1 т. Стоимость навоза в Шурышкарском районе значительно варьирует: в с. Горки, где сохранился свой совхоз, самосвал навоза (5–6 т) стоит 5000 руб., тракторный прицеп (около 4 т) – 3000 руб. В с. Питляр, где нет своих животноводческих ферм, стоимость тракторного прицепа с навозом (4 т) стоит уже 10000 руб. В Красноселькупском районе (с. Толька, Ратта), в Приуральском районе (с. Аксарка, п. Белоярск) используют навоз с собственных коровников бесплатно.

Любопытны практики хранения овощей в разных районах ЯНАО: так, в Шурышкарском районе, где ММП располагаются локально, население придерживается традиционных способов хранения – в подвалах. В Приуральском районе, где распространение ММП повсеместно, хранение овощей прямо зависит от типа дома: если здание на сваях, то погреб приходится дополнительно утеплять, так как в холодный период там все промерзает, если же дом построен по старому образцу, на фундаменте, то подвал нагревается от дома и образуется «воздушная подушка», поэтому необходимость в дополнительном утеплении отпадает. Кроме того, инвазии крыс и мышей в Заполярье привели к тому, что населению приходится укреплять подвалы камнем или металлом. В более северных поселениях, таких как Новый Порт (Ямальский район), подвалов-овощехранилищ вообще нет, а вырытые



Рис. 7. Затапливаемая улица п. Товопогол Приуральского района ЯНАО

тоннели в ММП используются как естественные мерзлотники для хранения замороженной рыбы.

Но особенно интересный способ хранения у рыбаков народов ханты и коми-зырян, проживающих в маленьких гуртах и небольших рыбацких поселках, таких как пос. Товопогол в Приуральском районе: поскольку река Обь регулярно разливается и затапливает улицы, рыть там подвалы нецелесообразно (рис. 7). При этом каждый хозяин возделывает огород, но картофеля и других овощей выращивают столько, чтобы успеть быстро съесть. Когда запасы картофеля подходят к концу, рыбаки покупают небольшое количество (не более 1–2 мешков) в соседнем селе Аксарка (находится на возвышенности и не затапливается), а мешок с картофелем бросают в реку. Зимой в воде плюсовая температура, и картофель может храниться таким вот образом. Этот способ является единственно возможным в подобных условиях, при этом у него существуют недостатки – хранить картофель более 2–3 недель невозможно; кроме того, по отзывам местных жителей, клубни картофеля постоянно атакуют «разные личинки», и приходится часть выбрасывать.

Проблемой для земледелия юга Шурышкарского района является также роющая деятельность кротов и полевых грызунов, которые уничтожают сельскохозяйственные культуры. Кроме того, нередки такие социальные явления, как саботаж местных жителей: к примеру, по сведениям одного из арендаторов полей, жители этнической деревни Ямгорт начали регулярно выпасать коров и лошадей на его полях, в связи с чем владелец вынужден был отказаться от дальнейшей эксплуатации этих территорий.

Еще одна острая проблема для развития сельскохозяйственных практик – отток молодежи в города. Сельское население, которое с советских времен активно занималось огородничеством, стареет, а молодежь выращивать овощи не стремится. Лишь небольшой процент местных жителей, которые живут в деревнях и не имеют работы, продолжают выращивать сельскохозяйственную продукцию на огородах.

На сегодняшний день механизм государственного регулирования аграрного сектора развивается путем системы дотирования. Однако на территории ЯНАО сельскохозяйственные практики находятся в упадке по та-

ким причинам, как отдаленность (проблемы логистики), зависимость от погодных условий, сложности в обработке полей, отсутствие рынка сбыта сельскохозяйственной продукции, низкая эластичность сбыта и медленный рост потребительских возможностей, ограничение в выборе продукции из-за природных условий и специфики аграрной отрасли.

Выводы

– Коренные малочисленные народы Севера образуют системную целостность с ландшафтами, поэтому могут существовать и развиваться только при сохранении традиционного образа жизни, целью которого является воспроизводство жизненного уклада в гармонии с природой и социальным окружением.

– Разновозрастные агроценозы и залежные почвы на территории ЯНАО представляют значительный интерес с точки зрения оценки постагрогенной трансформации экосистем в криогенных условиях.

– Глубина залегания ММП снижается на распаханых участках и зависит от давности их освоения.

– Комплексное внесение органоминеральных удобрений повышает почвенное плодородие, внесение минеральных удобрений по навозному фону обеспечивает относительно большой запас азота, фосфора и калия.

Благодарности/Acknowledgements. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-ЯНАО № 19-416-890002 «Микробиом залежных почв агроэкосистем Ямало-Ненецкого автономного округа: разнообразие, свойства, таксономия».

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о вкладе авторов. Абакумов Е.В. – концепция и руководство исследованием, анализ полученных данных, написание текста; Моргун Е.Н. – сбор и обработка материалов, анализ полученных данных, написание текста.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Абакумов ЕВ, Моргун ЕН. О необходимости создания научного стационара полярного земледелия на Ямале. Биосферное хозяйство: теория и практика. 2020;(12):66-74.
2. Моргун ЕН, Абакумов ЕВ. Исследования в области сельского хозяйства и урожайность сельскохозяйственных культур в ЯНАО: ретроспективный анализ (1932–2019 гг.). Научный Вестник ЯНАО. 2019;(3):4-10.
3. Тихановский АН. Влияние удобрений и извести на качество и продуктивность рапса ярового на Обском Севере. Достижения науки и техники в АПК. 1991;(3):18.
4. Черных НИ, Громик ВД. Огородничество на Ямальском Севере: Рекомендации. Новосибирск РАСХН; 1993.

Общий список литературы/Reference List

1. Abakumov EV, Morgun EN. [On the need to create a scientific station for polar agriculture in Yamal]. Biosfernoye Khoziaystvo Teoriya i Praktika. 2020;(12):66-4. (In Russ.)
2. Morgun EN, Abakumov EV. [Research in the field of agriculture and crop yields in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: A retrospective analysis (1932–2019)]. Nauchnyi Vestnik YaNAO;2019;(3):4-10. (In Russ.)
3. Tikhonovsky AN. [The effect of fertilizers and lime on the quality and productivity of spring

- rape in the North Ob Region]. Dostizheniya Nauki i Tekhniki v APK;1991;(3):18. (In Russ.)
4. Chernykh NI, Gromik VD. Ogorodnichestvo na Yamalskom Severe: Rekomendatsii. [Gardening in the Yamal North: Recommendations]. Novosibirsk; RAAS; 1993. (In Russ.)
5. Bojesen MH, Olsen A (Eds.). Agriculture in Greenland – Possibilities and Needs for Future Development and Research. Synthesis Report for Greenland Agricultural Initiative (GRAIN) in cooperation with Greenland Perspective; 2019.
6. Poeplau C, Schroeder J, Gregorich E, Kurganova I. Farmers' perspective on agriculture and environmental change in the Circumpolar North of Europe and America. Land. 2019;8(12). doi:10.3390/land8120190.
7. Edwards CJW. Methods of maintaining settled agriculture in Finnish Lapland. Arctic. 1972;25(1):8-20. URL:jstor.org/stable/40508021.
8. Stevenson KT, Alessa L, Kliskey AD, Rader HB, Pantoja A, Clark M. Sustainable agriculture for Alaska and the Circumpolar North: Part I. Development and status of northern agriculture and food security. Arctic. 2014;67(3):271-95. doi: 10.14430/arctic4402.
9. Abakumov E, Nizamutdinov T, Morgun E, Loktev R, Kolesnikov R. Agrochemical and pollution status of urbanized agricultural soils in the central part of Yamal region: Energies. 2021;14. doi: 10.3390/en14144080.

10. Nizamutdinov T, Morgun E, Pechkin A, Kostec-ki J, Greinert A, Abakumov E. Differentiation of trace metal contamination level between different urban functional zones in permafrost affected soils (the example of several cities in the Yamal region, Russian Arctic). *Minerals*. 2021;11. doi: 10.3390/min11070668.
11. Nizamutdinov T, Abakumov E, Morgun E. Morphological features, productivity and pollution state of abandoned agricultural soils in the Russian Arctic (Yamal Region). *One Ecosystem*. 2021;6. doi: 10.3897/oneeco.6.e68408.
12. Abakumov E, Zverev A, Morgun E, Alekseev I. Microbiome of abandoned agricultural and mature tundra soils in southern Yamal region, Russian Arctic. *Open Agriculture*. 2020;5(1):335-44. doi: 10.1515/opag-2020-0034.



ОЦЕНКА УРОВНЯ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДА БИРОБИДЖАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Д.М. Фетисов*, Д.В. Жучков, М.В. Горюхин

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан, Россия

* Эл. почта: dfetisov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.11.2021; принята к печати 06.12.2021

В работе представлены результаты оценки распределения зеленых насаждений по функциональным зонам среднего по численности населения города Биробиджана. Для выявления, картирования и оценки распространения зеленых насаждений применялись результаты расчета нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) с использованием мультиспектрального снимка Sentinel 2. Для Биробиджана характерна большая разница в значениях вегетационного индекса (от $-0,5$ до $+1$) и преобладание участков с высокими показателями озелененности. Они отмечаются у разных типов функциональных зон, но в основном соответствуют природно-рекреационным, сельскохозяйственной, индивидуальной застройки и зоне специального назначения. В городе наблюдается контрастность в пространственном распределении зеленой инфраструктуры. Центральные, общественно-деловые и коммерческие, а также производственные и коммунально-складские зоны выделяются сочетанием застроенных мест с массивами плотной древесной растительности. Нередко они представлены фрагментами сохранившейся естественной растительности. Кроме того, контрастность проявляется в том, что для застроенной части города характерны низкие показатели распространения древесных насаждений. Следовательно, в г. Биробиджане выполнение экологических функций в значительной степени берет на себя естественная растительность, представленная в природно-рекреационных зонах на 70% площади города.

Ключевые слова: NDVI, город, растительность, зеленые насаждения, уровень озеленения.

ESTIMATING THE GREENNESS LEVEL OF BIROBIDZHAN CITY USING REMOTE SENSING DATA

D.M. Fetisov, D.V. Zhuchkov, M.V. Goryukhin

Institute for Comprehensive Analysis of Regional Problems, Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences, Birebidzhan, Russia

* E-mail: dfetisov@gmail.com

The urban greenness distribution between functional areas of a medium-size city Birebidzhan was assessed. To this end, normalized difference vegetation index (NDVI) values were calculated based on Sentinel 2 multispectral imaging. Birebidzhan is characterized by a large scatter of NDVI values (from -0.5 to $+1$). Areas with high levels of greenery are prevalent. They are found in different types of functional zones, but are specific mainly to natural recreational, agricultural, and individual build-up zones as well as to special areas. The spatial distribution of green infrastructure is highly contrast. The downtown part as well as the industrial and storage zones feature a combination of built-up areas with dense woody vegetation, which is often represented by fragments of preserved natural vegetation. In addition, a feature of the contrast is that low level of tree greenness is characteristic for the built-up districts of the city. Thus, in the city of Birebidzhan, ecological functions are largely performed by the natural vegetation present in the natural recreational zones on 70% of the city's area.

Keywords: NDVI, urban area, vegetation, green infrastructure, greenness index.

Введение

Малые и средние города имеют особое значение в системе расселения России. В условиях ускоренного создания промышленной базы в советское время на территории Сибири и российского Дальнего Востока они часто становились основными центрами сосредоточения населения в окружении малоосвоенных пространств. В настоящее время в Приамурье (Амурская и Еврейская автономная области, Хабаровский край)

уровень урбанизации составляет около 70%. Большая часть городского населения проживает в крупных и больших городах. Однако из 19 городов, расположенных в изучаемом регионе, 16 по численности населения относятся к категории малых и средних.

Город как урбэкосистема включает природные и техногенные составляющие. Среди природных компонентов растительность выполняет несколько важных функций: санитарно-гигиеническую, структур-

но-планировочную, архитектурно-эстетическую и рекреационную. Исследования состояния зеленых насаждений городов Приамурья носят фрагментарный характер. Ведется изучение общего жизненного состояния урбанофлоры и влияния на него экологических условий, пространственного распределения растительного покрова и его соответствия градостроительным нормам. В основном исследованиями охвачены большие города [6–11, 13], в меньшей степени – средние города [1, 3, 4], а в малых исследования не проводились.

Цель настоящего исследования – определение уровня представленности зеленых насаждений в типичном среднем городе Приамурья по функциональным градостроительным зонам с применением данных мультиспектральных космических снимков. Исследования экологического состояния малых и средних городов Приамурья с использованием данных дистанционного зондирования Земли не проводились. В качестве модельной территории был выбран г. Биробиджан. По численности населения (70,4 тыс. чел.) он относится к категории средних городов. Растительный покров (в первую очередь, дендрофлора, состав и состояние древесных насаждений) в нем сравнительно хорошо изучен с помощью инвентаризационных методов [1–4].

Объект и методы исследования

Биробиджан является административным центром Еврейской автономной области. Его площадь составляет около 170 км². В пределах городской черты хорошо представлены условно естественные природные ландшафты (57%) [1]. Планировочная структура города, как и у других дальневосточных городов, складывалась хаотично. Ее экологическая нерациональность имеет унаследованный характер. Промышленные зоны соседствуют с селитебными. Загрязнения от ТЭЦ, расположенной в центре населенного пункта, затрагивают как близлежащие жилые массивы, так и расположенные с подветренной стороны в восточной части Биробиджана. Исследования показали, что с учетом городских лесов на одного жителя приходится более 560 м² зеленых насаждений [2]. Однако в селитебных территориях этот показатель снижается до 4 м², что в пять раз ниже установленных законодательством норм [2].

Для выявления, картирования и оценки распространения зеленых насаждений г. Биробиджана использовались результаты расчета нормализованного относительного индекса растительности (normalized difference vegetation index, NDVI), широко применяемого для количественных оценок растительного покрова как в научной, так и производственной (сельское и лесное хозяйство) деятельности [5, 15–17, 19–21]. Расчет NDVI основан на данных спектральных каналов в красной (Red) и ближней инфракрасной (near infrared, NIR) зонах:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

NDVI отражает активность вегетации растений. Он связан с показателями продуктивности, биомассы, структурой растительного покрова. NDVI обычно используют для оценки состояния растительности (плохое – удовлетворительное – хорошее). В исследованиях урбозкосистем NDVI применяют для определения состояния зеленых насаждений, их структуры, разреженности (фрагментированности) застройкой и открытыми пространствами с искусственным покрытием (дороги, площади, стоянки и др.). Величина NDVI находится в пределах от –1 до +1. Присутствию растительного покрова соответствуют положительные значения [16]. В большинстве работ по изучению городской растительности с использованием NDVI выполняется дихотомическая классификация: с растительным покровом («зеленая инфраструктура») – без растительного покрова («серая инфраструктура») – застроенные участки, дороги, пустоши с открытой почвой и др.).

NDVI рассчитывали с использованием мультиспектрального снимка Sentinel 2 в период активной вегетации 26 июня 2021 года. Выбор связан с тем, что его красный и ближний инфракрасный каналы имеют разрешение 10 м, что важно для исследования небольшого по площади города [18]. Класс продукта – Level-2A, то есть он доступен с уже выполненной атмосферной коррекцией – проведен учет искажающих изображение земной поверхности свойств атмосферы (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products>). Это необходимая процедура для повышения качества распознавания снимка и корректности получаемых результатов.

Для изучения растительного покрова г. Биробиджана выполняли расчет средних, максимальных и минимальных значений NDVI и стандартного отклонения по выделенным функциональным зонам. Также оценивали озелененность (степень представленности зеленых насаждений) как отношение числа пикселей с растительным покровом к общему числу пикселей по отдельным участкам функциональных зон города [5]. В зарубежной научной литературе этот показатель называют greenness index (индекс озелененности) [14]. Выбор граничного значения индекса для отделения территорий с растительным покровом был выполнен на основе полевых исследований, проведенных летом 2021 года, и дешифровки космоснимка. Было выбрано значение NDVI 0,3 и более для выделения зеленых насаждений г. Биробиджана, 0,75 и более – для древесной растительности. Под зелеными насаждениями, согласно ГОСТ 28329-89 «Озеленение городов. Термины и определения» (от 10.11.1989 № 3336), понимается «совокупность древесных, кустарнико-

вых и травянистых растений на определенной территории». Они включают как природные экосистемы, так и искусственные сообщества. Часть зеленых насаждений, представленная древостоями, отнесена к древесной растительности. Расчеты и картирование проводились в программе Quantum GIS 3.10.

Пространственными объектами для проведения исследования стали территории функционального зонирования города. Карта градостроительного зонирования Биробиджана принята решением Городской

думы от 09.12.2008 № 858 «Об утверждении правил землепользования и застройки муниципального образования “Город Биробиджан” Еврейской автономной области» (рис. 1).

Полосы транспортных коммуникаций (железных и главных автомобильных дорог) не включены в градостроительное зонирование. На карте они занимают порядка 8% площади города и не учтены при подсчете площадей при пространственном анализе озелененности Биробиджана.



Рис. 1. Градостроительное зонирование г. Биробиджана

Цифрами обозначены:

- 1–8 – функциональные зоны: 1) индивидуальной застройки; 2) малоэтажной застройки; 3) многоэтажной застройки; 4) центральные, общественно-деловые и коммерческие; 5) производственные и коммунально-складские; 6) специального назначения; 7) природно-рекреационные; 8) сельскохозяйственная;
9–10 – дороги: 9) железные; 10) автомобильные;
11 – граница города

Результаты Значения NDVI и характеристика растительного покрова г. Биробиджана

Для Биробиджана характерен большой диапазон значений NDVI: от $-0,5$ до 1 (рис. 2). По наименьшим значениям NDVI ($-0,5 \dots -0,3$) выделяются пространства, полностью лишённые растительного покрова и перекрытые небольшим слоем воды по естественным причинам (карьеры по добыче щебня, строительные площадки, заполняющиеся грунтовыми водами и атмосферными осадками) или по технологическим требованиям (золотвал городской ТЭЦ). Они расположены в зонах специального назначения и рекреационно-ландшафтных

территорий. Здания, широкие участки дорог, площади, промышленные зоны, места складирования гравия и щебня тоже определяются как не имеющие растительного покрова, со значениями NDVI $-0,3 \dots 0$.

Положительные значения NDVI означают присутствие вегетирующего растительного покрова в пикселе. При значениях от 0 до $+0,3$ зеленые насаждения г. Биробиджана сильно разреженные. В таких случаях характерно преобладание застройки и пространств с искусственным покрытием.

У травянисто-кустарниковой растительности в основном на газонах и открытых неблагоустроенных пространствах в сочетании с тротуарами, дорогами и постройками значения NDVI находятся в диапазоне

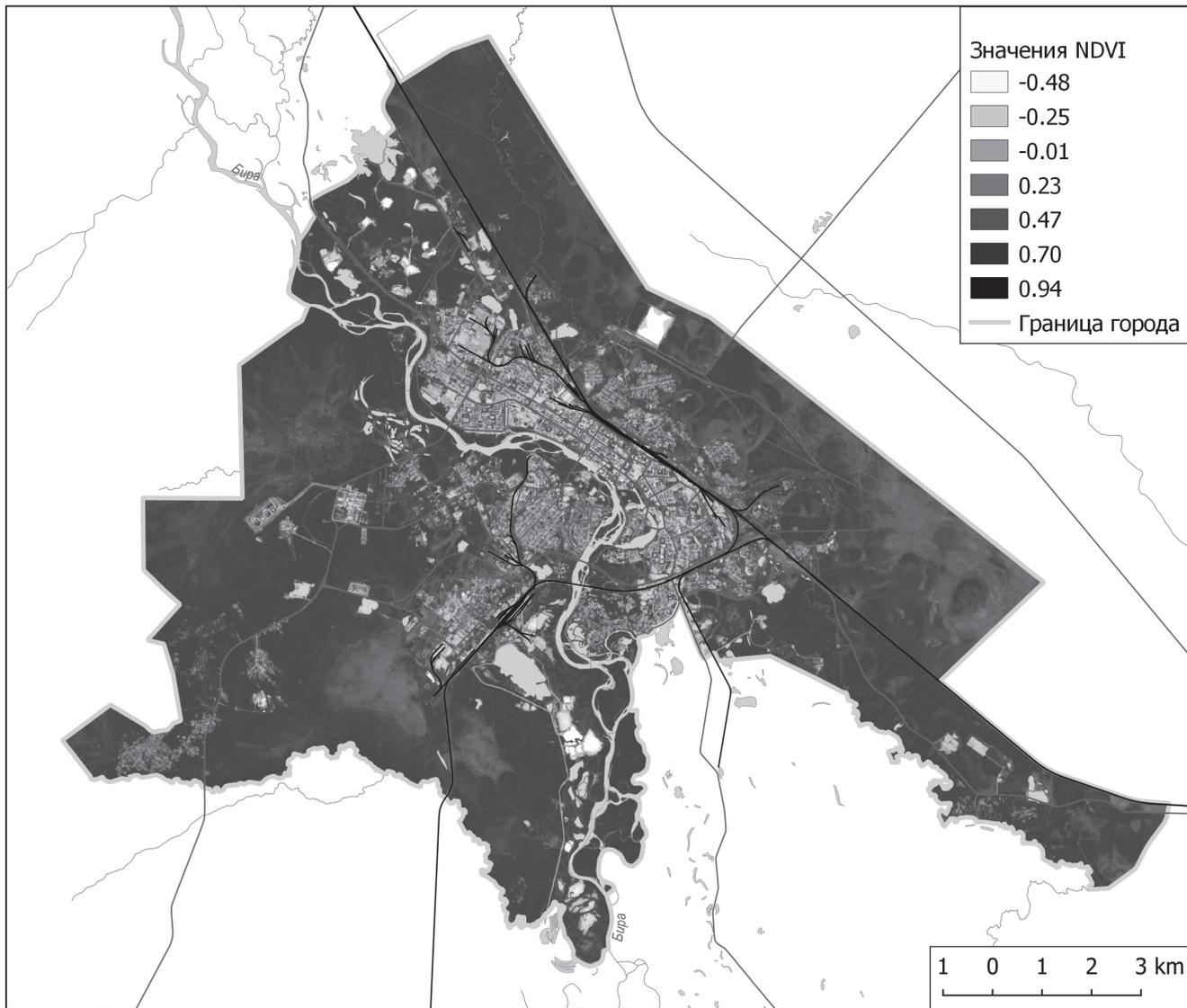


Рис. 2. Распределение значений NDVI в границах г. Биробиджана

от +0,3 до +0,5. Она выделяется повсеместно на застроенных территориях по разным функциональным зонам города, окружая здания и дороги.

Значения NDVI от +0,5 до +0,75 характерны для открытых лугов и болот, занимающих пониженные участки в зоне рекреационно-ландшафтных территорий, а также для селитебных массивов с частной одноэтажной застройкой (зона индивидуальной застройки), где преобладают в основном травянистые растения, включая культурные и сорные виды.

Самые высокие значения NDVI (от +0,75 до +1) характерны для лесной растительности. Она приурочена к зонам рекреационно-ландшафтных территорий и открытых пространств. В Биробиджане, который находится на границе зон дальневосточных хвойно-широколиственных лесов и подтайги, она разнообразна. В западной части города на отрогах Малого Хингана произрастают смешанные широколиственные леса. В их составе – дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), клен мелколистный (*Acer mono* Maxim.), береза даурская (*Betula davurica* Pall.), ясень маньчжурский (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), липа амурская (*Tilia amurensis* Rupr.) и другие виды. На востоке города леса занимают небольшие повышения (рёлки) над низменным рельефом и состоят из

березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.), лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr.), дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), клена мелколистного (*Acer mono* Maxim.). В поймах рек Большая Бира и Икура, на берегах которых расположен Биробиджан, леса многопородные – ильм японский (*Ulmus laciniata* (Trautv.) Mayr.), ясень маньчжурский (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), ива Шверина (*Salix schwerinii* E. Wolf), ива росистая (*Salix rorida* Laksch.) и др. [12]. Помимо естественной растительности по высоким значениям NDVI определяются искусственные массивы древесных насаждений внутри городской застройки – в пределах скверов, парков, аллей, неиспользуемых участков. Они созданы в зонах много- и малоэтажной застройки, открытых пространств, центральных общественно-деловых и коммерческих.

Распределение растительного покрова по функциональным зонам города

Зона индивидуальной застройки. Среднее значение NDVI данной зоны +0,6 при разбросе по отдельным участкам от +0,3 до +0,9. Важно учитывать, что генеральный план города включает территории перспективного развития. Поэтому участки с NDVI +0,7

Табл. 1

Характеристика территорий функционального зонирования г. Биробиджана

Зоны	Состав и функции	Площадь, км ²	Средний NDVI	Средняя озелененность, %
Жилые	Застройка:			
	индивидуальная	12,9	+0,6	92
	малоэтажная	1,0	+0,5	76
	многоэтажная	3,6	+0,5	71
Центральные, общественно-деловые и коммерческие	Обслуживание и деловая активность городского центра, учебных и научных комплексов, учреждений здравоохранения, спортивных и спортивно-зрелищных учреждений	1,8	+0,5	65
Производственные и коммунально-складские	Производственные и коммунально-складские объекты классов II, III, IV, V санитарной вредности	9,4	+0,5	68
Специального назначения	Кладбища, объекты ограниченного доступа, золоотвалы и скотомогильники, объекты инженерной инфраструктуры	7,3	+0,7	90
Природно-рекреационные	Особо охраняемые природные территории, открытые пространства, рекреационно-ландшафтные территории	119,5	+0,7	92
Сельскохозяйственные		0,3	+0,7	97

и выше на самом деле в настоящее время не освоены и заняты естественной растительностью. Озелененность, то есть доля пикселей, отнесенных к категории «растительность», в среднем составляет 92% (табл. 1). В зависимости от плотности застройки этот показатель меняется от 33 до 100%.

Зону малоэтажной застройки составляют жилые массивы со зданиями в 2–4 этажа. Зеленые насаждения представлены газонами и в скверах. Среднее значение NDVI здесь, в сравнении с предыдущей зоной, ниже и составляет +0,5. Средний показатель озелененности – 76%. Отмечаются значительные различия в плотности растительного покрова между разными участками этой зоны. Доля зеленых насаждений меняется от 18 до 100%, среднее значение NDVI меняется от +0,1 (разреженная растительность) до +0,8 (густая растительность). В трех четвертях таких выделов растительный покров занимает более половины их площади.

Зона многоэтажной жилой застройки. В распределении растительного покрова имеет сходство с предыдущей зоной. Среднее значение NDVI +0,5. По отдельным участкам данной зоны оно колеблется от +0,3 до +0,8. Озелененность составляет 71% и меняется по выделам от 39 до 100%. При этом у более чем половины участков зоны многоэтажной застройки г. Биробиджана показатель озелененности превышает 60%.

Центральные, общественно-деловые и коммерческие зоны. Сюда включаются территории делового центра, образовательных и научных учреждений, спортивные объекты и медицинские организации, инфраструктура городских и региональных органов власти. Среднее значение NDVI +0,5. Для данного типа характерны очень большие различия в значениях индекса отдельных участков от –0,007 (растительный покров отсутствует) до +0,9 (практически без застройки). Стандартное отклонение – 0,2. Предположительно, причиной являются различия в функциональном назначении территорий, объединенных в одной зоне. Если пространства крупных торговых центров представлены застройкой и стоянками для автомобилей практически без участия растительного покрова, то земельные участки организаций здравоохранения, как правило, имеют зеленые насаждения. Средняя озелененность этой зоны 65%, но значения по отдельным входящим участкам сильно колеблются от 6% (почти полностью застроенные) до 100% (резервные).

Производственные и коммунально-складские зоны характеризуются средним значением NDVI +0,5. Для данного типа территории это хороший показатель, сравнимый с таковым у селитебных зон, в которых зеленые насаждения создавались планомерно. Средняя озелененность – 68%. Объяснением этой ситуации может быть то, что часть бывших промышленных предприятий города находится в разрушенном и заросшем

состоянии, а новые еще полностью не освоили выделенные участки. Вместе с тем, как и в предыдущей зоне, распределение растительного покрова между разными участками неравномерно. Среднее значение NDVI меняется от +0,1 до +0,9, а озелененность – от 12 до 100%.

Зоны специального назначения. По особенностям растительного покрова это неоднородная функциональная зона. Она включает золоотвалы с ограниченными по площади зелеными насаждениями и, например, кладбища с плотным растительным покровом. Среднее значение NDVI высокое (+0,7). Озелененность – 90%. Функциональные различия включенных в эту зону территорий проявляются в значительных вариациях среднего значения вегетационного индекса по отдельным участкам – от 0,2 до 0,8. Озелененность в пространстве также меняется от 39 до 100%.

Природно-рекреационные зоны охватывают целым поясом освоенные застроенные территории г. Биробиджана, а также включают пойму и участки долины рек Большая Бира и Икура. Это одна из наиболее озелененных зон с сохранившейся естественной растительностью. Среднее значение NDVI составляет +0,7. По отдельным участкам оно меняется от +0,1 до +0,9, но у подавляющего большинства – от +0,6 и выше. Озелененность, в среднем 92%, в пространстве меняется от 11 до 100%. Но минимальными показателями (11–12%) характеризуются только два участка открытых пространств. На остальных растительный покров преобладает.

Сельскохозяйственная зона – одна из наименее представленных по площади в Биробиджане. Среднее значение NDVI +0,7. Все участки характеризуются преобладанием растительного покрова, стандартное отклонение – 0,1. Озелененность – 97%.

Таким образом, для большинства зон характерны застроенные участки с минимальными значениями NDVI в сочетании с массивами деревьев с максимальными значениями этого индекса.

Ранжирование функциональных территорий по уровню озелененности

По степени озелененности участки функциональных зон г. Биробиджана ранжируются на четыре категории (рис. 3).

– *Низкий уровень озелененности.* Доля растительного покрова – до 40%. К этой категории отнесены отдельные участки центральных, общественно-деловых и коммерческих, а также производственных и коммунально-складских зон, мало- и многоэтажной застройки, природно-рекреационных зон. Их общая площадь – около 0,9 км² (0,5% от площади города).

– *Средний (40–60%).* В этой группе представлены участки всех типов зон за исключением индивидуаль-

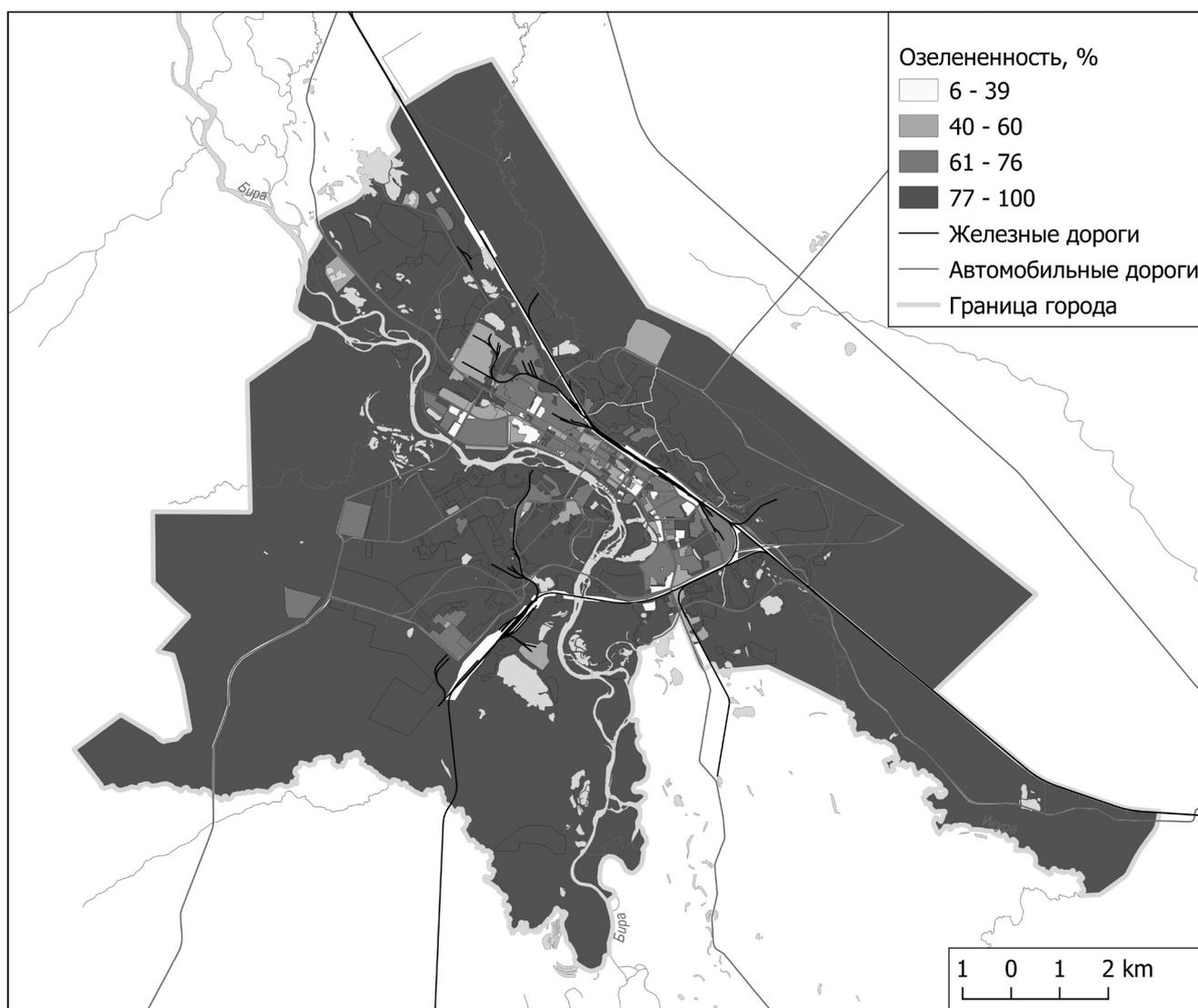


Рис. 3. Уровни озелененности г. Биробиджана по функциональным зонам

ной застройки. Однако по количеству преобладают центральные, общественно-деловые и коммерческие, а также производственные и коммунально-складские зоны, многоэтажной застройки. Их совместная площадь примерно 3,5 км² (2%).

– *Высокий (61–76%)*. В эту категорию попали участки всех типов зон. Их площадь – более 6 км². Это примерно 4% площади города.

– *Очень высокий (более 76%)*. Это преобладающая по площади категория, занимающая 85% территории г. Биробиджана. В ней представлены разные типы функциональных зон, но основу составляют природно-рекреационные, сельскохозяйственная, зона индивидуальной застройки и зоны специального назначения.

Распределение древесной растительности по функциональным зонам

В городе древесная растительность представлена естественной лесной и искусственными древесными насаждениями в скверах, садах, парках и других территориях. Эта категория зеленой инфраструктуры выполняет ключевые экологические функции в урбоэкосистемах. В связи с этим актуален анализ представленности древесных насаждений в разных зонах города (рис. 4).

По результатам анализа в Биробиджане можно выделить зоны, характеризующиеся такими уровнями представленности древесной растительности:

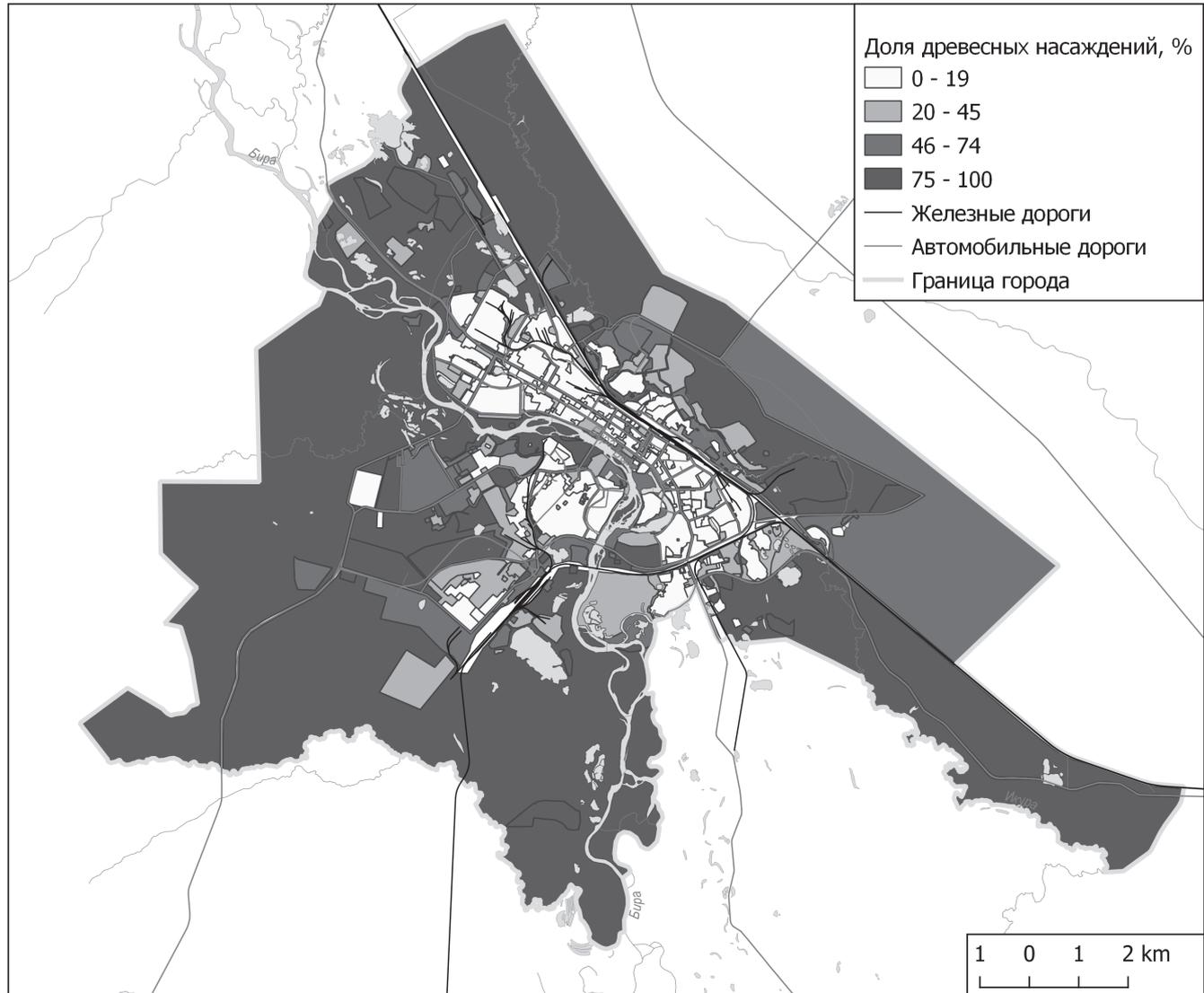


Рис. 4. Уровни представленности древесной растительности по функциональным зонам г. Биробиджана

– *Низкий.* Доля древесных насаждений не превышает 19% площади участков функциональных зон г. Биробиджана. На рис. 4 видно, что низким показателем характеризуется, главным образом, основная застроенная часть города. В итоге, в эту группу вошли в первую очередь территории зон жилой застройки, центральных, общественно-деловых и коммерческих, а также производственных и коммунально-складских зон. Их общая площадь – около 15 км² (9% площади города).

– *Средний (20–45%).* В этой группе представлены разные функциональные зоны. В данном случае на значение показателя влияет, помимо застройки, распространение луговой растительности в поймах и на

террасах рек. В сумме на нее приходится 6% площади Биробиджана (11 км²).

– *Высокий (46–74%)* уровень характерен для участков функциональных зон города на площади 23 км² (14% территории Биробиджана). В основном в эту группу входят природно-рекреационные и производственные и коммунально-складские зоны. Для нее характерно преобладание естественной растительности.

– *Очень высокий (75–100%)* выявлен для 63% площади города (107 км²). В эту группу включены участки природно-рекреационных зон; жилая зона представлена единичными фрагментами индивидуальной и малоэтажной застройки.

Заключение

Для г. Биробиджана характерно преобладание территорий с высокими показателями озелененности. Вероятно, это является характерной чертой малых и средних городов Приамурья. Проверка этой гипотезы будет целью дальнейших исследований. Наблюдается контрастность в пространственном распределении зеленой инфраструктуры в городе и, следовательно, в выполнении ею экологических функций. Контрастность проявляется двояко. Во-первых, для центральных, общественно-деловых и коммерческих, а также производственных и коммунально-складских зон отмечена значительная амплитуда в значениях NDVI, что говорит о соседстве на одних и тех же территориях плотной застройки с зелеными массивами (нередко с сохранившейся естественной растительностью). Во-вторых, для освоенной части города, где сконцентрированы основные части зон жилой застройки, центральных, общественно-деловых и коммерческих, а также производственных и коммунально-складских зон, характерны низкие показатели распространения древесных насаждений. Таким образом выполнение экологических функций

городских зеленых насаждений в Биробиджане обеспечивается в значительной степени естественной лесной растительностью природно-рекреационных зон, занимающих 70% площади города и расположенных в основном на его окраине. С учетом хаотичности планировочной структуры населенного пункта такая поляризованность в пространственном распределении растительного покрова может способствовать развитию напряженной экологической ситуации в городе. Низкие показатели представленности древесных насаждений в зонах жилой застройки, а также производственных и коммунально-складских, говорят о дефиците озелененных территорий общего пользования (используемых населением для отдыха) и о проблемах в выполнении своих функций озелененными территориями специального назначения (включая санитарно-защитные зоны) и санитарно-защитными зонами промышленных предприятий и других объектов. Следовательно, для совершенствования зеленой инфраструктуры Биробиджана остается актуальной реализация мероприятий по увеличению площади древесного озеленения в застроенных частях.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Калманова ВБ. Анализ формирования зеленого каркаса в планировочной структуре г. Биробиджана. Региональные проблемы. 2019;22(3):70-7.
2. Калманова ВБ. Геоэкологическое картографирование урбанизированных территорий (на примере г. Биробиджана). ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2015;(21):566-74.
3. Калманова ВБ. Экологическое состояние дендрофлоры как показатель качества городской среды (на примере г. Биробиджана). Региональные проблемы. 2013;16(1):79-86.
4. Калманова ВБ. Экологическое состояние дендрофлоры парка культуры и отдыха г. Биробиджана. Региональные проблемы. 2017;20(1):19-26.
5. Кравчук ЛА, Яновский АА, Баженова НМ, Пац АЧ. Дифференцированная оценка зеленой инфраструктуры г. Минска с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Природопользование. 2019;(2):152-67.
6. Кузнецов ОВ, Маркелов ГЯ. Оценка зеленых насаждений Хабаровска с использованием материалов ДЗЗ и ГИС-технологий. Геоматика. 2013;(1):32-8.
7. Морозова ГЮ, Дебелая ИД. Анализ проблем озеленения современного города (на примере Хабаровска). Вестник ДВО РАН. 2018;(4):32-8.
8. Морозова ГЮ. Мониторинг урбанизированной среды: структура популяций растений. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009;11(1-6):1170-3.
9. Морозова ГЮ. Проблемы озеленения дальневосточных городов. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010;12(1-3):772-5.
10. Низкий СЕ, Сергеева ЛА. К вопросу о плотности зеленых насаждений общего пользования города Благовещенска. Аграрный вестник Урала. 2012;3(95):52-3.
11. Павлова ЛМ, Котельникова ИМ, Куимова НГ, Тимченко НА. Оценка санитарного состояния древесных насаждений г. Благовещенска. Вестник Поморского университета. Серия: Естественные науки. 2010;(1):55-62.
12. Рубцова ТА. Флора Еврейской автономной области. Хабаровск: Антар; 2017.
13. Третьякова АС, Баранова ОГ, Сенатор СА, Панасенко НН, Суткин АВ, Алихаджиев МХ. Урбанofлористика в России: современное состояние и перспективы. Turczaninowia. 2021;24(1):125-44.

Общий список литературы/Reference List

1. Kalmanova VB. [Analysis of the green frame formation in the planning structure of Birobidzhan]. *Regionalnye Problemy*. 2019;22(3):70-7. (In Russ.)
2. Kalmanova VB. [Geoecological mapping of urban areas as exemplified with Birobidzhan]. *InterKarto*. InterGIS. 2015;(21):566-74. (In Russ.)
3. Kalmanova VB. [Ecological condition of the arboreal flora as indicator of the urban environment quality as exemplified with Birobidzhan]. *Regionalnye Problemy*. 2013;16(1):79-86. (In Russ.)
4. Kalmanova VB. [Ecological condition of dendroflora in the town park of Birobidzhan]. *Regionalnye Problemy*. 2017;20(1):19-26. (In Russ.)
5. Kravchuk LA, Yanovskiy AA, Bazhenova NM, Pats Ach. [Differentiated assessment of the green infrastructure of Minsk using data of remote sensing of the Earth]. *Prirodopolzovaniye*. 2019;(2):152-67. (In Russ.)
6. Kuznetsov OV, Markelov GYa. [Estimation of green plantings of Khabarovsk using remote sensing data and GIS technologies]. *Geomatika*. 2013;(1):32-8. (In Russ.)
7. Morozova GYu, Debelaya ID. [The analysis of the modern city gardening problems (exemplified with Khabarovsk)]. *Vestnik DVO RAN*. 2018;(4):32-8. (In Russ.)
8. Morozova GYu. [Monitoring of the urbanized inhabitancy: structure of plant populations]. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2009;11(1-6):1170-3. (In Russ.)
9. Morozova GYu. [Problems of gardening of the far-east cities]. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2010;12(1-3):772-5. (In Russ.)
10. Nizkiy SE, Sergeeva LA. [On the issue of density of general use green plantations in the city of Blagoveshchensk]. *Agrarnyy Vestnik Urala*. 2012;3(95):52-3. (In Russ.)
11. Pavlova LM, Kotelnikova IM, Kuimova NG, Timchenko NA. [Sanitary state assessment of tree plantations in Blagoveshchensk]. *Vestnik Pomorskogo Universiteta. Seriya Yestestvennye Nauki*. 2010;(1):55-62. (In Russ.)
12. Rubtsova TA. *Flora Evreyskoy Avtonomnoy Oblasti*. Khabarovsk: Antar; 2017. (In Russ.)
13. Tretyakova AS, Baranova OG, Senator SA, Panasenko NN, Sutkin AV, Alihadzhiyev MH. [Studies of urban flora in Russia: current state and prospects]. *Turczaninowia*. 2021;24(1):125-144. (In Russ.)
14. Abutaleb Kh, Mudede MF, Nkongolo N, Newete SW. Estimating urban greenness index using remote sensing data: A case study of an affluent vs poor suburbs in the city of Johannesburg. *Egyptian J Remote Sensing Space Sci*. 2021;(24):343-51.
15. Bechtel A, Puttmann W, Carlson TN, Ripley DA. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environ*. 1997;62(3):241-52.
16. Bhandaria AK, Kumara A, Singh GK. Feature extraction using normalized difference vegetation index (NDVI): A case study of Jabalpur City. *Procedia Technol*. 2012;(6):612-21.
17. Hashim H., Latif ZA, Adnan NA. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *Int Arch Photogrammetry Remote Sens Spat Inform Sci*. 2019;(XLII-4/W16):237-40.
18. Kuc G, Chormański J. Sentinel-2 imagery for mapping and monitoring imperviousness in urban areas. *Int Arch Photogrammetry Remote Sens Spat Inform Sci*. 2019;(XLII-1/W2):43-7.
19. Lynch P, Blesius L, Hines E. Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. *Remote Sens*. 2020;(12):2503.
20. Patón D. Normalized difference vegetation index determination in urban areas by full-spectrum photography. *Ecologies*. 2020;(1):22-35.
21. Wenzhe Z, Haochuan L. Urban vegetation coverage monitoring technology based on NDVI. *Adv Engin Res*. 2018;(163):1611-18.

ЭКОЛОГО-ФИТОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦВЕТКОВ БУЗИНЫ ЧЕРНОЙ *SAMBUCUS NIGRA* L. В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ

Н.А. Виноградова

Донецкий национальный медицинский университет имени М. Горького,
Донецк, ДНР

Эл. почта: Arina0@meta.ua

Статья поступила в редакцию 15.10.2021; принята к печати 15.11.2021

Исследовано влияние условий урбанизированной среды (Донецкий регион) на содержание биологически активных веществ, тяжелых металлов и антиоксидантную активность цветков бузины черной *Sambucus nigra* L. Содержание свинца, кадмия и ртути во всех анализированных образцах не превышает предельно допустимое для лекарственного растительного сырья, при этом выявлено снижение коэффициентов накопления свинца и кадмия при повышении уровня этих токсикантов в почве, а концентрация ртути не зависит от зоны произрастания растений. Содержание действующих веществ во всех цветках *S. nigra*, заготовленных на Донбассе, соответствует требованиям действующей Государственной фармакопеи Российской Федерации. При этом в условиях урбанизированной среды в цветках *S. nigra* выявлено повышение содержания каротиноидов, флавоноидов и оксикоричных кислот, уменьшение содержания других фенольных соединений (антоцианов и танинов), а концентрации аскорбиновой и свободных органических кислот максимальны при умеренной техногенной нагрузке. Выявлена высокая антиоксидантная активность цветков *S. nigra*, причем наибольшей активностью обладают цветки, заготовленные в условиях умеренной антропогенной нагрузки. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования в фармации растений *S. nigra*, произрастающих в условиях урбанизированной среды Донбасса.

Ключевые слова: бузина черная, урбанизированная среда, биологически активные вещества, антиоксидантная активность, тяжелые металлы.

ECOLOGICAL AND PHYTOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF BLACK ELDERBERRY (*SAMBUCUS NIGRA* L.) FLOWERS UNDER URBANIZED CONDITIONS

N.A. Vinogradova

Maxim Gorky National Medical University of Donetsk, Donetsk Peoples' Republic

E-mail: Arina0@meta.ua

The impacts of the urbanized environment of Donetsk region on the contents of biologically active substances and heavy metals in black elderberry (*Sambucus nigra* L.) flowers and on the total antioxidant activity of their preparations were evaluated. The contents of lead, cadmium and mercury in all samples studied were within the tolerable limits specified for herbal medicinal raw products. The accumulation coefficients of lead and cadmium were found to decrease with increasing soil levels of these toxicants, whereas the level of mercury did not depend on the degree of soil pollution. The contents of active substances in all samples collected in Donbas conform to the requirements of the State Pharmacopoeia of the Russian Federation. In fact, the contents of carotenoids, flavonoids and hydroxycinnamic acids are increased in *S. nigra* flowers collected in urbanized areas; however, the contents of other phenolic substances (anthocyanins and tannins) are decreased. The contents of ascorbic and free organic acids are highest under moderately urbanized conditions, so as the antioxidant activity of *S. nigra* flower preparations is. The results suggest that prospects for the pharmaceutical use of *S. nigra* flowers collected in urbanized areas of Donbas are promising.

Keywords: black elderberry, urbanized environment, biologically active substances, antioxidant activity, heavy metals.

Введение

В настоящее время каждый третий лекарственный препарат на мировом рынке изготовлен на основе растительного сырья [8]. Преимуществами фитопрепаратов перед синтетическими являются широкий

спектр действия, малая токсичность, возможность длительного применения без существенных побочных явлений [12]. Сокращение территорий, не испытывающих антропогенной нагрузки, обуславливает необходимость анализа возможности использования

лекарственных растений, произрастающих в урбанизированной среде. Актуальным это является для такого крупного горнопромышленного региона на востоке Европы, как Донбасс.

Бузина черная (*Sambucus nigra* L.) – вид, часто встречающийся в урбанизированной среде. Его достоинствами являются неприхотливость к условиям произрастания, устойчивость к техногенной нагрузке и высокая декоративность на протяжении всего сезона вегетации [11, 18]. Необходимо отметить широкое применение *S. nigra* для лечения и профилактики респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, а также при диабете и ожирении [22]. Цветки *S. nigra* разрешены для использования в официальной медицине, о чем свидетельствует наличие соответствующей фармакопейной статьи в Государственной фармакопее Российской Федерации последнего (XIV) издания [4]. Настой цветков *S. nigra* применяют как потогонное и диуретическое средство, экстракт входит в состав комплексных лекарственных препаратов (Ново-Пассит, Синупрет и др.). Однако, несмотря на достаточные сырьевые запасы растений *S. nigra* на территории Донбасса, их использование в лечебных целях ограничено антропогенной трансформацией природной среды региона. Донбасс характеризуется высокой плотностью населения, насыщенностью транспортными коммуникациями и степенью хозяйственного освоения территории. Заготовленное в таких условиях лекарственное растительное сырье может являться источником поступления токсичных веществ в организм человека.

К числу основных загрязнителей городских экосистем относятся тяжелые металлы, обладающие высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях, способные к биоаккумуляции и не поддающиеся биологическому разложению [14]. Из них основными фитотоксикантами считаются свинец, кадмий и ртуть, именно их содержание нормируется в лекарственном растительном сырье при оценке его чистоты [4]. Содержание тяжелых металлов в растениях во многом зависит от концентрации их подвижных форм в почве. Такие исследования позволяют отследить антропогенное загрязнение почв, представляющее угрозу для растений и человека (в случае использования этих растений в пищу или изготовления лекарственных препаратов на их основе). Кроме того, необходимо проанализировать влияние условий урбанизированной среды на содержание в растениях биологически активных веществ, обуславливающих их терапевтическое действие. Поскольку многие из фармакологически ценных веществ играют существенную роль в формировании экологической устойчивости растений, их концентрация может значительно изменяться в условиях антропогенной нагрузки [1].

Особый интерес вызывает антиоксидантная активность бузины, обусловленная содержанием фенольных соединений [6, 19, 24]. Поскольку известна существенная роль этих метаболитов в адаптации растений к стрессовым факторам [17], интересно проследить изменение концентраций различных групп фенольных соединений под влиянием антропогенной нагрузки. Это позволит расширить понимание формирования толерантности *S. nigra* к условиям урбанизированной среды, а также оценить целесообразность их использования в качестве источника антиоксидантов.

Целью исследования стало изучение влияния условий урбанизированной среды на химический состав, антиоксидантную активность и содержание тяжелых металлов в цветках *S. nigra*.

Материалы и методы

Цветки *S. nigra* заготавливали в период массового цветения в зонах Донбасса, значительно отличающихся по интенсивности антропогенного прессинга: в сельской местности вблизи поселка Павлоградское (зона, выбранная в качестве контроля); в искусственной экосистеме Донецкого ботанического сада, расположенного на окраине г. Донецка (зона умеренной антропогенной нагрузки); в аллеинном насаждении вдоль городской автотрассы с интенсивным движением (зона сильной антропогенной нагрузки).

Поскольку можно предположить, что сырье растений, произрастающих на урбанизированной территории, будет загрязнено тяжелыми металлами и представлять опасность для здоровья человека, в цветках было определено содержание свинца, кадмия и ртути методом атомно-абсорбционной спектроскопии [4]. С целью исследования особенностей накопления тяжелых металлов *S. nigra* в условиях антропогенной нагрузки различной интенсивности, атомно-абсорбционной спектроскопией определяли содержание подвижных (наиболее доступных растениям) форм металлов в почве. Для этого образцы почв отбирали из корнеобитаемого слоя на глубине 0–10 см. Экстракцию подвижных форм металлов проводили ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 [4].

Для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами целесообразно использовать сравнение с их фоновым содержанием в конкретном регионе. В частности, это необходимо при анализе уровня подвижной формы кадмия, для которой в настоящее время отсутствует общепринятая ПДК. Ранее нами было предложено в качестве фоновых концентраций для Донецкого региона использовать 0,1 мг/кг свинца и 0,3 мг/кг кадмия (содержание в почве урочища «Балка Певчая» – зоны региона, максимально отдаленной от техногенных источников загрязнения) [23]. С использованием этих значений были рассчитаны коэффициенты техногенной концентрации токсикантов и суммарные

показатели загрязнения, для растительного материала рассчитаны коэффициенты биологического накопления тяжелых металлов [9, 13].

Для определения содержания аскорбиновой кислоты и танидов (в пересчете на танин) использовали фармакопейные титриметрические методы, содержание флавоноидов (в пересчете на рутин), антоцианов (в пересчете на цианидина-3-глюкозид) и оксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую кислоту) определяли спектрофотометрически, влажность и сумму экстрактивных веществ – гравиметрически [4]. Содержание каротиноидов (в пересчете на β -каротин) определяли спектрофотометрически [3], свободных органических кислот (в пересчете на яблочную кислоту) – титриметрически [2]. Все расчеты по содержанию биологически активных веществ приведены на абсолютно сухую массу.

О суммарной антиоксидантной активности растительного материала судили по его способности ингибировать аутоокисление адреналина *in vitro* в щелочной среде и тем самым предотвращать образование активных форм кислорода в среде [16]. Полученные данные представлены в виде средних арифметических значений и их стандартных ошибок. Статистическую значимость различий между содержанием биологически активных веществ в цветках растений *S. nigra*, произрастающих в условиях умеренной и сильной антропогенной нагрузки, и контролем определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение

При анализе возможности использования в лечебных целях растений, произрастающих на урбанизированной территории, в первую очередь необходимо оценить содержание в них токсичных веществ. Согласно действующим требованиям Российской Федерации в растительном сырье, предназначенном для изготовления лекарственных препаратов, нормируют содержание таких тяжелых металлов, как свинец (не более 6,0 мг/кг), кадмий (не более 1,0 мг/кг) и ртуть (не более 0,1 мг/кг) [4]. Именно эти металлы являются основными загрязнителями городских экосистем.

Для прогнозирования чистоты растительного материала целесообразно определять в почве содержание подвижных (наиболее доступных растениям) форм тяжелых металлов, тогда как исследование уровня валовых форм металлов недостаточно информативно. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Во всех исследуемых образцах почв Донецкого региона концентрация подвижной формы свинца не превышает 0,5 ПДК, что соответствует 1-й группе по загрязненности почв [5]. При этом в почве, прилегающей к автотрассе, уровень свинца в 2 раза выше, чем в почве зоны условного контроля. Что касается кадмия, то выявлен значительный рост концентрации этого

токсиканта в условиях урбанизированной среды (в 6,8 раза при сильной антропогенной нагрузке), что позволяет рассматривать эти почвы как загрязненные.

В условиях урбанизированной среды выявлено увеличение коэффициентов техногенной концентрации кадмия (более чем в 6 раз) и свинца (в 2 раза), что свидетельствует о повышении опасности загрязнения. Суммарный показатель загрязнения составляет 4 для почвы зоны умеренной антропогенной нагрузки и 14 – для сильной, что согласно шкале [7] позволяет отнести исследуемые почвы к категории допустимых по степени загрязнения (суммарный показатель загрязнения не превышает 16). Надо отметить, что суммарный показатель загрязнения почвы зоны сильной антропогенной нагрузки приближается к категории умеренно опасных (средний уровень загрязнения).

Оценка уровня тяжелых металлов в растениях *S. nigra*, произрастающих в различных по интенсивности антропогенной нагрузки зонах (табл. 2), показывает особенности, отличные от их содержания в почве. Это может быть обусловлено тем, что для исследования выбраны цветки бузины, так как именно они используются для изготовления лекарственных препаратов.

Для анализа способности *S. nigra* поглощать металлы были рассчитаны коэффициенты биологического накопления, равные отношению концентрации токсиканта в растении к таковому в почве [9]. Для всех анализируемых цветков *S. nigra* коэффициент накопления свинца превышает единицу. Интересно, что наименьший коэффициент накопления свинца выявлен для цветков, заготовленных в условиях сильной антропогенной нагрузки, что свидетельствует о способности *S. nigra* ограничивать поступление этого токсиканта в генеративные органы при повышении его уровня в почве. В условиях умеренной антропогенной нагрузки такая же закономерность прослеживается и для кадмия (коэффициент накопления в 34 раза ниже, чем в контроле). Однако при дальнейшем резком возрастании концентрации этого токсиканта в почве (более чем в 6 раз по сравнению с контролем) растение уже не может ограничить его поступление, и концентрация кадмия в цветках начинает увеличиваться. Кроме того в цветках *S. nigra* обнаружена ртуть, причем ее концентрация одинакова для всех исследуемых образцов и не зависит от зоны сбора.

Очень важно, что содержание кадмия, свинца и ртути во всех анализируемых цветках *S. nigra* не превышает ПДК для лекарственного растительного сырья, что свидетельствует о возможности их использования в фармации.

Также при использовании лекарственных растений, произрастающих в условиях урбанизированной среды, необходимо оценить их соответствие требованиям нормативной документации по содержанию

Табл. 1

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах Донецкого региона

Интенсивность антропогенной нагрузки	Содержание тяжелых металлов, мг/кг			Коэффициент техногенной концентрации		Суммарный показатель загрязнения
	Pb	Cd	Hg	Pb	Cd	
Контроль	0,3 ± 0,1	0,4 ± 0,12	Менее 0,01	3,0	1,3	3,3
Умеренная	0,3 ± 0,1	0,6 ± 0,3	Менее 0,01	3,0	2,0	4,0
Сильная	0,6 ± 0,3	2,7 ± 0,8	Менее 0,01	6,0	9,0	14,0

Табл. 2

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в цветках растений *Sambucus nigra* L., произрастающих на территории Донецкого региона

Интенсивность антропогенной нагрузки	Содержание тяжелых металлов, мг/кг			Коэффициент биологического накопления	
	Pb	Cd	Hg	Pb	Cd
Контроль	0,6 ± 0,2	0,027 ± 0,001	0,02 ± 0,001	2,00	0,068
Умеренная	0,7 ± 0,3	0,001 ± 0,0001	0,02 ± 0,001	2,33	0,002
Сильная	0,7 ± 0,2	0,028 ± 0,001	0,02 ± 0,001	1,17	0,010

Табл. 3

Содержание биологически активных веществ в цветках *Sambucus nigra* L. в зависимости от интенсивности антропогенной нагрузки (в %, в пересчете на абсолютно сухое сырье)

Группа биологически активных веществ	Интенсивность антропогенной нагрузки		
	Контроль	Умеренная	Сильная
Аскорбиновая кислота	0,36 ± 0,02	0,43 ± 0,2*	0,29 ± 0,01*
Флавоноиды	2,06 ± 0,05	2,37 ± 0,05**	2,81 ± 0,012***
Таниды	10,15 ± 0,28	9,15 ± 0,21***	7,69 ± 0,29*
Свободные органические кислоты	9,97 ± 0,38	12,37 ± 0,55**	8,76 ± 0,35*
Каротиноиды (в мг%)	0,028 ± 0,001	0,036 ± 0,001***	0,040 ± 0,001***
Антоцианы	0,19 ± 0,01	0,17 ± 0,01	0,12 ± 0,01**
Оксикоричные кислоты	1,24 ± 0,01	1,28 ± 0,01*	1,30 ± 0,02*
Экстрактивные вещества, извлекаемые водой	30,53 ± 0,76	32,96 ± 1,36	36,70 ± 1,22**

Примечание: достоверность отличий от контроля: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

действующих веществ, так как именно они обуславливают фармакологическую ценность растительного материала. Большинство биологически активных веществ принимают участие в адаптации растений к условиям окружающей среды, что может обуславливать существенное изменение их содержания в растениях, испытывающих антропогенную нагрузку [17].

Результаты определения содержания основных групп биологически активных веществ в цветках растений *S. nigra*, произрастающих в условиях различного уровня антропогенной нагрузки, представлены в таблице 3.

Полученные результаты позволяют установить значительные различия в содержании многих групп биологически активных веществ в цветках *S. nigra* в зависимости от интенсивности антропогенной нагрузки на растения. В условиях городской среды наблюдается повышение уровня каротиноидов и таких фенольных соединений, как флавоноиды и оксикоричные кислоты, обладающих антиоксидантным действием. На фоне этого уменьшаются концентрации других исследованных фенольных метаболитов (танидов и антоцианов), по всей видимости, менее эффективных в наблюдаемых условиях, что можно объяснить общим путем биосинтеза всех фенольных соединений. Интересная динамика наблюдается для аскорбиновой и свободных органических кислот: их концентрация при умеренной антропогенной нагрузке выше контроля, а при сильной – ниже. Вероятно, это обусловлено расходом аскорбиновой кислоты в реакциях нейтрализации свободных радикалов, а органических кислот – на связывание тяжелых металлов в условиях увеличения их уровня в цветках.

Согласно Государственной фармакопее Российской Федерации стандартизация цветков *S. nigra* проводится по содержанию экстрактивных веществ, извлекаемых водой (не менее 30%), и флавоноидов (не менее 2%) [4]. Как видно из табл. 3, все исследуемые цветки, заготовленные на Донбассе, соответствуют

этим требованиям. Концентрация и флавоноидов, и экстрактивных веществ увеличивается в условиях антропогенной нагрузки.

Выявленное нами повышенное содержание биологически активных веществ, обладающих антиоксидантной активностью, в цветках растений *S. nigra*, произрастающих в городской среде, позволяет прогнозировать увеличение их способности ингибировать свободнорадикальные процессы. Это очень важно, так как универсальной реакцией всех живых организмов на воздействие неблагоприятных факторов является интенсификация свободнорадикального окисления, что приводит к развитию окислительного стресса. Устойчивость растений к условиям урбанизированной среды во многом зависит от функционирования антиоксидантной системы, важной частью которой являются низкомолекулярные антиоксиданты [10]. Растения, у которых наблюдается уменьшение концентрации низкомолекулярных антиоксидантов, являются гиперчувствительными к стрессовому воздействию [17]. Кроме того, антиоксидантная активность лекарственных растений вносит значительный вклад в их терапевтическое действие [21].

Избыточное образование свободных радикалов в организме человека может быть вызвано повышенным радиационным фоном, загрязнением окружающей среды, курением, физической нагрузкой, стрессом. Вышедшее из-под контроля свободнорадикальное окисление предшествует или сопутствует более 200 различным заболеваниям (сердечно-сосудистым, онкологическим, сахарному диабету, воспалительным, ревматоидным, нейродегенеративным и др.), а также преждевременному старению [15]. Контроль количества свободных радикалов осуществляет антиоксидантная система.

Эффективными источниками антиоксидантов являются растения [20]. Надо отметить, что исследований суммарной антиоксидантной активности растительного материала гораздо меньше, чем исследований

Табл. 4

Антиоксидантная активность цветков *Sambucus nigra* L. в зависимости от интенсивности антропогенной нагрузки

Длительность инкубации	Степень ингибирования аутоокисления адреналина (%)		
	Контроль	Антропогенная нагрузка	
		Умеренная	Сильная
3 минуты	53,95 ± 1,33	63,82 ± 2,04**	54,01 ± 1,15
5 минут	43,82 ± 1,38	63,48 ± 1,40***	46,63 ± 1,03
7 минут	45,0 ± 1,39	61,0 ± 2,11***	42,5 ± 1,04

Примечание: достоверность отличий от контроля: ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

содержания отдельных веществ-антиоксидантов. Но такие исследования важны, так как суммарная антиоксидантная активность зависит от взаимного влияния антиоксидантов различной природы друг на друга, а не только от их концентраций. В табл. 4 представлены результаты определения антиоксидантной активности (по ингибированию аутоокисления адреналина) цветков растений *S. nigra* из мест произрастания, различающихся по уровню антропогенной нагрузки.

Выявлена высокая антиоксидантная активность у всех анализируемых цветков *S. nigra*, что обуславливает их ценность в качестве источника антиоксидантов. Максимальную способность нейтрализовать свободные радикалы проявляют цветки, заготовленные в зоне умеренной антропогенной нагрузки. Это может быть частично связано с повышением концентрации ряда низкомолекулярных антиоксидантов, что может обуславливать толерантность растений этого вида к урбанизированной среде Донецкого региона.

Выводы

В условиях сильной антропогенной нагрузки коэффициенты биологического накопления свинца и кадмия цветками *S. nigra* снижаются по сравнению с контролем, что свидетельствует о наличии механизмов, ограничивающих поступление токсикантов в генеративные органы при их повышенном содержании в почве. В цветках обнаружено наличие ртути, концентрация которой не зависит от зоны произрастания растений. Несмотря на выявленное накопление свинца

цветками *S. nigra* (коэффициент биологического накопления превышает единицу), содержание тяжелых металлов во всех анализируемых цветках не превышает ПДК для лекарственного растительного сырья, что обуславливает их безопасность для использования в фармацевтическом производстве.

В цветках растений *S. nigra*, произрастающих в условиях урбанизированной среды, выявлен повышенный уровень каротиноидов, оксикоричных кислот и флавоноидов, что свидетельствует об их значительном вкладе в антиоксидантную систему растений этого вида. При этом снижаются уровни танинов и антоцианов – низкомолекулярных антиоксидантов, менее эффективных в наблюдаемых условиях. Содержание действующих веществ в цветках *S. nigra*, заготовленных в различных по интенсивности антропогенной нагрузки зонах Донбасса, соответствует требованиям Государственной фармакопеи Российской Федерации, что обуславливает их фармакологическую ценность.

Все анализируемые цветки *S. nigra* проявляют высокую антиоксидантную активность, что говорит о перспективности их использования в качестве источника антиоксидантов. Наибольшая активность выявлена для цветков, заготовленных в условиях умеренной антропогенной нагрузки, что частично связано с повышением концентрации ряда низкомолекулярных антиоксидантов. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования в фармации растений *S. nigra*, произрастающих в условиях урбанизированной среды Донбасса.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Бухарина ИЛ, Кузьмина АМ, Кузьмин ПА. Особенности содержания танинов в листьях древесных растений в техногенной среде. Химия растительного сырья. 2015;(4):71-6. doi: 10.14258/jcprgm.201504711.
2. ГОСТ 1994-93. Плоды шиповника. Технические условия. М.: Изд-во стандартов; 1995.
3. Государственная фармакопея Республики Беларусь. 2. Молодечно: Победа; 2008.
4. Государственная фармакопея Российской Федерации. XIV изд. М.; 2018.
5. Державин ЛМ, Булгакова ДС, ред. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ «Росинформрагротех»; 2003.
6. Кочикян АТ, Ананикян ВВ, Ерибескян МИ, Топчян АВ, Ревазова ЛВ. Изучение антирадикальной активности некоторых лекарственных и пищевых растений. Медицинская наука Армении. 2009;49(3):126-31.
7. Методические указания 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М.; 1999.
8. Оленина НГ, Михеева НС, Крутикова НМ. Особенности экспертизы «польза/риск» лекарственных растительных препаратов: анализ регистрационных досье. Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. 2018;8(2):84-91. doi: 10.30895/1991-2919-2018-8-2-84-91.
9. Перельман АИ. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа; 1975.
10. Радюкина НЛ. Функционирование антиоксидантной системы дикорастущих видов растений при кратковременном действии стрессоров (диссертация). Москва; 2015.

11. Савушкина ИГ, Леонов ВВ. Перспективные представители семейства Caprifoliaceae A.L. Jussien для озеленения в условиях предгорного Крыма. Ученые записки Таврического национального ун-та им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». 2009;22(3):130-9.
12. Самбукова ТВ, Овчинников БВ, Ганапольский ВП, Ятманов АН, Шабанов ПД. Перспективы использования фитопрепаратов в современной фармакологии. Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. 2017.15(2):56–63. doi: 10.17816/RCF15256-63.
13. Самойленко ГЮ. Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в почвах, сопряженных средах и дикорастущих растениях из экосистем в условиях урбанизированной территории Восточного Забайкалья: автореф. канд. дисс. Томск; 2020.
14. Скворцова ТА. Содержание тяжелых металлов в плодах *Rosa majalis* Herrm., произрастающего в парковых зонах города Оренбурга. Вестник Оренбургского государственного университета. 2017;(8):80-3.
15. Фархутдинова ЛМ. Окислительный стресс. История вопроса. Вестник Академии наук РБ. 2015.20(1):42-9.
16. Хасанова СР, Плеханова ТИ, Гашимова ДТ, Галиахметова ЭХ, Клыш ЕА. Сравнительное изучение антиоксидантной активности растительных сборов. Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2007;(1):163-6.
6. Kochikyan AT, Ananikyan VV, Eribekyan MI, Topchyan AV, Revazova LV. [Investigation of the antiradical activity of some medicinal and food plants]. Meditsinskaya Nauka Armenii. 2009;49(3):126-31. (In Russ.)
7. Metodicheskiye Ukazaniya 2.1.7.730-99. Gigiyenicheskaya Otsenka Kachestva Pochvy Naselennykh Mest. [Methodical Instructions 2.1.7.730-99. Hygienic Assessment of Soil Quality in Populated Areas]. Moscow; 1999. (In Russ.)
8. Olenina NG, Mikheeva NS, Krutikova NM. [Specific aspects of benefit-risk evaluation of herbal medicinal products: Analysis of registration dossiers]. Vedomosti Nauchnogo Tsentra Ekspertizy Sredstv Meditsinskogo Primeneniya. 2018;8(2):84-91. doi: 10.30895/1991-2919-2018-8-2-84-91. (In Russ.)
9. Perelman AI. Geokhimiya Landshafta. [Landscape Geochemistry]. Moscow: Vysshaya Shkola; 1975. (In Russ.)
10. Radyukina NL. [Functioning of the antioxidant system of wild-growing plant species under short-term action of stressors (dissertation)]. Moscow; 2015. (In Russ.)
11. Savushkina IG, Leonov VV. [Prospective members of the family Caprifoliaceae A.L. Jussien for planting in the Foothill Crimea]. Uchenye Zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. Seriya Biologiya, Khimiya. 2009;22(3):130-9. (In Russ.)
12. Sambukova TV, Ovchinnikov BV, Ganapolskiy VP, Yatmanov AN, Shabanov PD. [Prospects for phytopreparations (botanicals) use in modern pharmacology]. Obzory po Klinicheskoy Farmakologii i Lekarstvennoy Terapii. 2017.15(2):56-63. doi: 10.17816/RCF15256-63. (In Russ.)
13. Samoylenko GYu. [Characteristics of the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soils, Conjugated Environments and Wild Plants from Ecosystems in the Urbanized Territory of Eastern Trans-Baykal]. PhD Theses. Tomsk; 2020. (In Russ.)
14. Skvortsova TA. [The content of heavy metals in the fruits of *Rosa majalis* Herrm. growing in the park areas of the city of Orenburg]. Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2017;(8):80-3. (In Russ.)
15. Farkhutdinova LM. [Oxidative stress. History of research]. Vestnik Akademii Nauk Respubliki Bashkortostan. 2015;20(1):42-9. (In Russ.)
16. Khasanova SR, Plekhanova TI, Gashimova DT, Galiakhmetova EK, Klysh EA. [Comparative study of the antioxidant activity of plant collections]. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya. 2007;(1):163-6. (In Russ.)

Общий список литературы/Reference List

1. Bukharina IL, Kuzmina AM, Kuzmin PA. [Characteristics of the content of tannins in leaves of woody plants in a technogenic environment]. Khimiya Rastitelnogo Syrya. 2015;(4):71-6. doi: 10.14258/jcprm.201504711. (In Russ.)
2. GOST 1994-93. Plody Shipovnika. Tekhnicheskie usloviya. [Fructus Rosae. Technical Specifications]. Moscow: Izdatelstvo Standartov, 1995. (In Russ.)
3. Gosudarstvennaya Farmakopeya Respubliki Belarus. [State Pharmacopoeia of the Republic of Belarus]. 2. Molodechno: Pobeda; 2008. (In Russ.)
4. Gosudarstvennaya Farmakopeya Rossiyskoy Federatsii. [State Pharmacopoeia of the Russian Federation]. XIV ed. Moscow; 2018. (In Russ.)
5. Derzhavin LM, Bulgakova DS, eds. Metodicheskie Ukazaniya po Provedeniyu Kompleksnogo Monitoringa Plodorodiya Pochv Zemel Selskokhozyaystvennogo Naznacheniya. [Methodological Instructions for Comprehensive Monitoring of Soil Fertility of Agricultural Lands]. Moscow: FGNU «Rosinformagrotekh»; 2003. (In Russ.)

17. Ali MA, Fahad S, Haider I, Ahmed N, Ahmad S, Hussain S, Arshad M. Oxidative stress and antioxidant defense in plants exposed to metal/metalloid toxicity. *Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants. Production, Metabolism, Signaling and Defense Mech* Atkinson MD, Tkinson EA. *Sambucus nigra* L. *J Ecol.* 2002;(90):895-923.
18. Dawidowicz AL, Wianowska D, Baraniak B. The antioxidant properties of alcoholic extracts from *Sambucus nigra* L. (antioxidant properties of extracts). *Food Sci Technol.* 2006;39(3):308-15.
19. Mayurnikova LA, Zinchuk SF, Davydenkova NI, Gilmulina SA. Development of a functional basis of phytobeverages with an increased antioxidant activity for the correction of nutrition of patients with diabetes mellitus. *Foods and Raw Materials.* 2017;5(2):178-88.
20. Potoroko IU, Kalinina IV, Naumenko NV, Fatkul'in RI, Shaik S, Sonawane SH, Ivanova D, Kiselova-Kaneva Y, Tolstykh O, Paymulina AV. Possibilities of regulation of antioxidant activity of medicinal plant extracts. *Human Sport Medicine.* 2017;(17):77-90. doi: 10.14529/hsm17040.
21. Sidor A, Gramza-Michałowska A. Advanced research on the antioxidant and health benefit of elderberry (*Sambucus nigra*) in food – a review. *J Funct Foods.* 2015;(18):941-58. doi: 10.1016/j.jff.2014.07.012.
22. Vinogradova NA, Glukhov AZ. Ecological and phytochemical features of *Crataegus fallacina* Klovov under conditions of technogenic pollution. *Contemp Probl Ecol.* 2021;14(1):90-7. doi: 10.1134/S1995425521010091.
23. Vujanovic M, Majkic T, Zengin G, Beara I, Cvetaovic A, Mahomoodally FM, Radojkovic M. Advantages of contemporary extraction techniques for the extraction of bioactive constituents from black elderberry (*Sambucus nigra* L.) flowers. *Industr Crops Prod.* 2019;136:93-101. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.058.



ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО- ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ.

ЧАСТЬ 3. ВЛИЯНИЕ НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ И КОРНЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук, г. Уфа, Россия

Эл. почта: urv@anrb.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2021; принята к печати 18.08.2021

В третьей части обзора работ по изучению адаптивных реакций древесных растений на техногенные изменения среды описаны изменения радиального прироста стволовой древесины и корневых систем древесных растений. Основная масса исследований однозначно указывает на уменьшение радиального прироста древесных видов в ответ на промышленное загрязнение, потерю его чувствительности к климатическим сигналам, перераспределение долей ранней и поздней древесины в общем приросте, изменение длительности онтогенетических периодов, нарушение цикличности прироста в многолетней динамике, повышение числа ложных годичных колец или их выпадение, ускоренное начало старения древостоев, зависимость величины прироста от расстояния между древостоями и источниками эмиссии и от ландшафта местности, а также тесную связь между уменьшением ширины древесных колец и содержанием металлов и различных микроэлементов в кольцах, восстановление прироста после снижения объемов выбросов загрязняющих веществ. Однако нефтехимическое, радиационное и некоторые типы смешанных загрязнений способны стимулировать увеличение радиального прироста, при этом эффекты зависят от вида, возраста и жизненного состояния деревьев. Как правило, загрязнение вызывает существенное уменьшение коренасыщенности почвы всеми фракциями корней как в условиях промышленных центров, так и в опытах с искусственным внесением токсикантов в среду. Показаны различные адаптивные механизмы: перераспределение во фракционном составе в пользу увеличения долей тех или иных корневых фракций, эффект «избегания» наиболее загрязненных слоев почвенного профиля корневыми системами, активное выделение корневых экссудатов, препятствующих проникновению токсикантов в растение, и др. Нефтехимическое загрязнение способно стимулировать увеличение коренасыщенности почвы у хвойных древесных видов, однако для лиственных видов данный эффект носит видоспецифический характер, а радиоактивное загрязнение наносит более значительное повреждение корневым системам, чем радиальному приросту.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, радиальный прирост стволовой древесины, корневые системы древесных растений, адаптивные реакции.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF ARBOREAL PLANTS TO ANTHROPOGENIC FACTORS: DAMAGES, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART III. IMPACT ON THE RADIAL INCREMENT AND ON THE ROOTAGE

R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin

Ufa Institute of Biology at Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

E-mail: urv@anrb.ru

The present publication is the third of four reviews of reports addressing the responses of arboreal plants to anthropogenic factors. Here, the impact of different types of industrial pollution on the radial accretion of the trunk and on the rootage is considered. Most studies evidence unequivocally that industrial pollution leads to decreases in the radial accretion and in the sensitivity of the accretion to climatic cues, to the redistribution of the early and late wood in the total accretion, to changes in the durations of the ontogenetic periods and disorders in ontogenetic cycles, to the emergence or loss of the false annual rings, to accelerated senescence of forests, and to increases in the dependencies of accretion on the distance

between forests and the sources of pollution and on the features of landscape. The decreases in the annual rings widths strongly depend on the contents of metals and microelements in the rings. Upon a decrease in pollutant discharges, the annual accretion may become restored. With that, radionuclides, petrochemical and some types of mixed pollutants can stimulate accretion depending on plant species, age, and conditions. As a rule, industrial or experimental pollution causes significant decreases in soil contents of all rootage components. The adaptive responses of rootage to pollution include redistribution of its different components in favor of some of them upon the background of the general rootage decline. Roots may "avoid" the most polluted soil layers and may actively excrete exudates able to prevent the penetration of a pollutant into rootage. Petrochemical pollution may stimulate soil saturation with the rootage of most coniferous and only some deciduous plants in a species-specific manner. The radioactive pollution is more hazardous for rootage growth than for the radial accretion.

Keywords: industrial pollution, radial accretion of trees, tree rootage, adaptive responses.

Введение

Радиальный прирост древесных растений – интегральный показатель, который отражает не только интенсивность роста деревьев на различных этапах онтогенеза, но также влияние комплекса факторов среды и степень адаптации растений к изменениям окружающей среды. Кроме климатических (температура, осадки, циклы солнечной активности), биотических факторов (инвазии хвое- и листогрызущих насекомых) и внутренних факторов роста и развития (периоды обильного плодоношения и переходы от одного онтогенетического состояния к следующему) за последнее столетие значительное влияние на прирост стал оказывать техногенез. Быстрое развитие промышленности вызывает загрязнение окружающей среды, а в связи с этим и снижение продуктивности лесных фитоценозов. Многие авторы указывают на отрицательное влияние поллютантов на радиальный прирост древесных растений, при этом отмечается эффективность использования дендрохронологических методов при биоиндикации состояния древостоев. На сегодняшний день имеется множество подходов к оценке влияния техногенеза на радиальный прирост: используются не только различные статистические методы оценки изменения ширины годичного прироста в ответ на загрязнение, но также определяется содержание металлов и других химических элементов и радиоактивных изотопов в отдельных древесных кольцах в привязке к конкретному источнику загрязнения и т. д. [1, 4, 7, 10, 11, 23, 27, 35, 41, 53, 69, 70–72, 77, 84, 86]. В то же время в ряде случаев отмечается увеличение радиального прироста деревьев в условиях повышенного загрязнения, иногда на короткое время [1, 15, 41, 47, 51].

Рост, развитие и устойчивость растительного организма зависят не только от состояния надземных вегетативных органов. Сведения об особенностях строения, развития и функционирования корневых систем древесных растений также необходимы для оценки состояния и устойчивости растений в условиях техногенеза и изменяющейся окружающей среды [13, 18, 20, 21, 26, 28–31, 56, 57, 87, 92, 96, 110]. Промышленное загрязнение оказывает влияние на корневые системы двумя путями: прямое воздействие загрязняющих ве-

ществ и воздействие на естественную среду обитания корней – почву [20, 61, 74, 110]. Непосредственное влияние токсикантов на корневые системы древесных растений в первую очередь связано с токсичностью загрязнителя. В условиях промышленного загрязнения происходит накопление токсических веществ в почве, что приводит к изменению распределения по глубине массы поглощающих корней [13, 22, 52, 56, 87, 96], наблюдаются увеличение массы мертвых корней [56], изменения в микоризообразовании [13, 17, 75, 78, 85, 108], изменения в химическом составе корней [63, 64, 66, 96]. Выявлены видоспецифические реакции корневых систем на условия окислительно-восстановительных процессов в почве. В зависимости от изменения интенсивности роста корней в длину при снижении окислительно-восстановительного потенциала вид может быть охарактеризован как чувствительный или толерантный к данному фактору [98].

Таким образом, в последние десятилетия значительно повысился интерес к установлению влияния техногенеза на радиальный прирост при помощи дендрохронологических методов исследования, а также на подземные органы древесных видов растений. Сведения о влиянии техногенного загрязнения на радиальный прирост ствола и рост корней противоречивы: имеются данные как об отрицательном, так и о положительном влиянии конкретного фактора, как это будет рассмотрено в данном обзоре. В то же время различные изменения радиального прироста оцениваются как отражение адаптивного потенциала, а изменения корненасыщенности почвы рассматриваются как видоспецифические адаптивные механизмы компенсации повреждений надземных вегетативных органов под влиянием токсикантов.

1. Влияние техногенеза на дендрохронологические параметры древесных растений

Обзор влияния техногенеза на радиальный прирост древесных растений проведен по климатическим зонам в направлении с запада на восток. В первую очередь дан обзор таежной зоны (Мурманская область, Республика Карелия, Архангельская область, Новгородская область) и зоны тундры (Норильск). Вто-

рой пояс составляют Европейская зона в пределах зарубежных стран (Эстония, Литва, Польша, Чехия, Италия), в Российской Федерации (Воронеж-Уфа-Карабаш-Кемерово-Красноярск-Братск) и зарубежные страны Азии – Китай и Корея. Отдельно показаны адаптивные реакции к новому виду загрязнения окружающей среды прошлого столетия – радиоактивному загрязнению (включая модельные опыты по облучению деревьев).

Таяжная зона

Выявлены высокие коэффициенты корреляции между индексами прироста сосны (*Pinus sylvestris* L.) и объемами выбросов комбината «Печенганикель» (Мурманская обл.), свидетельствующие о наличии сильной отрицательной связи с выбросами диоксида серы (до $-0,94$), никелевой пыли (до $-0,65$) и медной пыли (до $-0,78$). Показаны значительные перепады в величине прироста за длительный период: падение прироста до середины 1940-х годов (начало металлургического освоения района в 1937 году) и последующая его стабилизация; в 1970–1980-х годах новый заметный спад прироста с минимумом в 1987 году (период наиболее интенсивного аэротехногенного загрязнения); стремительное увеличение прироста до середины 1990-х годов (устойчивое сокращение выбросов медной и никелевой пыли до начала 1990-х годов); резкое падение прироста в конце 1990-х годов (восстановление производства в 1995–1997 годах и увеличение выбросов) и последующее уменьшение до 2011 года [38]. Аналогичные результаты получены в зоне воздействия атмосферных выбросов комбината «Североникель» (Мурманская обл.). В период высокой аэротехногенной нагрузки 1970–1990 годов происходило достоверное снижение радиального прироста и площади годичного прироста стволовой древесины сосны (*P. sylvestris* L.), а затем резкое увеличение данных показателей в период 5–8-кратного сокращения объемов выбросов в 2000–2014 годах. Корреляционный анализ выявил значимые отрицательные связи радиального прироста и площади прироста с объемами атмосферных выбросов. Несмотря на снижение интенсивности загрязнения и восстановление прироста регистрировалась двукратная потеря продуктивности деревьев [55]. Аналогично в Новгородской области показано, что на фоне существенного снижения атмосферных выбросов в районе предприятия азотных и комплексных удобрений прирост сосны значительно увеличивался [9].

Оценка значимости климатических факторов и загрязнения выбросами железорудного комбината ОАО «Карельский окатыш» для прироста сосны обыкновенной в северной части Республики Карелия показала, что величина радиального прироста имела статистически значимую отрицательную связь с со-

держанием Cu, Cd, Ni и Fe в древесных кольцах, но не с температурой или количеством осадков. На увеличение плотности древесины оказывали влияние не только старение деревьев и изменение географического положения древостоев с юга на север, но также положительная корреляция с увеличением содержания Mn и снижением Fe и Cr в древесных кольцах. Пики содержания Pb в кольцах совпадали со временем наиболее интенсивных испытаний атомного оружия в 1950–1970-х годах, но вместе с тем выявлена положительная корреляция Zn с Pb, вопреки ожидаемой отрицательной [43].

Исследование состояния спелых сосновых насаждений в зоне Северной Тайги (устье реки Северная Двина) на различных расстояниях от Архангельского целлюлозно-бумажного комбината и ТЭЦ показало, что величина радиального прироста уменьшалась при приближении к источнику выбросов, а плотность древесины увеличивалась. Коэффициент детерминации связи между величиной прироста и расстоянием до источника эмиссии значительно снижался от заболони к сердцевине, что связано с низким уровнем аэротехногенного загрязнения в 1940-х годах. На расстоянии 8 км и дальше от источника выбросов обнаружена значительная изменчивость между приростами в заболони и в периферийной части центрального цилиндра (25–54%). Наблюдалась тесная корреляция между увеличением диаметра ствола и шириной поздней древесины (от 0,781 до 0,836), при этом выявлено снижение соотношения между долей поздней древесины и величиной прироста по мере увеличения расстояния от источника загрязнения. Установлено снижение плотности древесины от основания к верхней части дерева и от сердцевины ствола к его заболони [101].

Зона тундры

У лиственницы Гмелина в районе предприятий цветной металлургии г. Норильск (выбросы двуокиси серы и сопутствующих тяжелых металлов) в период до 1979 года в древостоях, находящихся в непосредственной близости от металлургического комбината, прирост был на 29% выше, чем в фоновых условиях (11 км к северу от г. Норильска), что объяснялось эпизодическими выбросами загрязнителей, когда сера и микродозы тяжелых металлов влияли на лиственницу как удобрения. После запуска новых мощностей в 1979 году прирост лиственницы в импактной зоне в 1981–1993 годах уменьшился на 49%, при этом в контрольных условиях он синхронно снизился на 21%, что свидетельствовало о значительном расширении территории техногенного воздействия. Таким образом, на долю промышленных выбросов приходилось 28% падения прироста. С 1990 года прирост в фоновых условиях фактически не менялся, но в импактной зоне он снизился на 42% в сравнении с контролем,

что являлось результатом хронического загрязнения повышенными уровнями выбросов. Показано, что все наблюдаемые изменения происходили в основном за счет колебаний величины ранней древесины, поздняя древесина была менее всего подвержена воздействиям стрессовых факторов [16].

Зарубежная европейская зона

В результате подщелачивания почв (рН 7,8–8,1) и высоких концентраций К, Са и Mg в почве после 40-летнего щелочного пылевого загрязнения (рН 13,2–12,7) от цементного завода в Эстонии выявлено значительное снижение радиального прироста сосны в период больших объемов выбросов пыли (1966–1991 годы). Влияние выбросов на прирост ели также было отрицательным, но слабым. При этом взаимосвязь между приростом и климатом (температура и осадки) была одинаковой в загрязненных и контрольных условиях, однако для ели значимыми климатическими переменными в условиях загрязнения являлись температура и осадки летних месяцев, а для сосны – весенняя температура и зимние осадки. Сокращение выбросов пыли в 1992 году стимулировало восстановление прироста древостоев сосны [94].

В ельниках и сосняках до начала работы завода азотных удобрений «Achema» в округе Jonava (Республика Литва) максимумы прироста были связаны с повышением температуры воздуха в начале вегетации, минимумы – с ее понижением, причем колебания прироста были близки к 11-летней ритмичности. В зонах интенсивного (3–10 км) и умеренного (11–20 км) промышленного загрязнения во время начала работы завода низкий уровень эмиссии CO, SO₂, NO₂ и NH₃ стимулировал радиальный прирост сосны обыкновенной на 15–25 и 10%, соответственно, относительно контроля. При повышении объемов выбросов до 37–40 тысяч тонн в год в зоне интенсивного промышленного загрязнения прирост уменьшился на 40–60% в ельниках и на 30–50% в сосняках, а в зоне исключительно интенсивного загрязнения – на 70%. Период повышения солнечной активности стимулировал выход древостоев в контроле из глубокой депрессии, и прирост увеличился на 20%, но у поврежденных древостоев прирост не восстановился. Значительное уменьшение объемов эмиссий сразу повлекло восстановление прироста, и он стал выше, чем в условиях контроля, причем в зоне интенсивного загрязнения он значительно превзошел прирост в зоне умеренного загрязнения. Линейная регрессия выявила уменьшение воздействия завода на прирост с увеличением расстояния от источника эмиссии. Показано, что молодняки менее устойчивы к выбросам, чем остальные возрастные группы, а хвойные древесные породы в большей степени подвержены угнетению, чем лиственные. Так, в зоне интенсивного загрязнения в

первые десять лет после пуска завода прирост у лиственных видов не изменился, ощутимое снижение проявилось только в последующие пять лет: у дуба и ясеня он снизился до 75% к контролю, у осины – до 71, у березы и ольхи черной – до 76, у ольхи серой – до 79%, а у тополя канадского почти не изменился. В последующие годы прирост этих видов в зоне интенсивного загрязнения стабилизировался на достигнутом уровне, а в зоне умеренного загрязнения прирост у дуба и ольхи черной незначительно увеличился, у осины и березы несколько снизился, у ольхи черной, серой и тополя канадского не изменился [47, 107].

Серия публикаций посвящена оценке радиального прироста древесных видов (сосна, ель, пихта, лиственница) в различных промышленных центрах Польши, где послевоенное интенсивное развитие тяжелой промышленности привело к существенному загрязнению окружающей среды комплексом газообразных загрязнителей (SO₂, CO, NO₂ и H₂S) и твердых примесей, включая металлы (Na, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb). Это сопровождалось резким сокращением прироста древесных колец (особенно вблизи от источников загрязнения) и накоплению в них металлов в значительных концентрациях, а также к выпадению годичных древесных колец. Давление промышленного загрязнения уменьшило восприимчивость деревьев к экологическим сигналам. Указывается, что ель является самой чувствительной среди исследованных видов, менее чувствительна сосна, наименее чувствительна лиственница. После введения безвредных для окружающей среды технологий в начале 1990-х годов уровни загрязнения воздуха уменьшились, и произошло резкое восстановление радиального прироста [62, 69, 73, 81, 99, 103, 104, 111].

Показано, что не все древесные виды пригодны для оценки дендрохронологическими методами загрязнения территорий теми или иными металлами. Например, для восстановления хронологии загрязнения ртутью по всей Чешской Республике лиственница (*Larix decidua* Mill.), характеризующаяся относительно низким и постоянным числом колец заболони, регистрировала изменения атмосферных концентраций Hg более достоверно, чем сосна (*Pinus sylvestris* L.) – порода с относительно высоким и переменным числом колец заболони. Выявлена сильная связь между годом пика Hg и числом колец заболони ($p = 0,012$, $r^2 = 0,35$), а также между годом пика Hg и пограничным слоем между заболонью и сердцевинной ($p < 0,001$, $r^2 = 0,65$), не совпадающие с изменениями уровней Hg в атмосфере; следовательно, гораздо большее число колец способствовало транслокации и сдвигу пиков Hg в древесных кольцах вспять по времени [90].

В городе Терни (Италия) радиальный прирост дуба в 1958–2009 годах значительно уменьшился у деревьев, растущих вблизи сталелитейной фабрики и уста-

новки для сжигания отходов, тогда как накопление микроэлементов (Cr, Co, Cu, Pb, Hg, Mo, Ni, Tl, W, U, V и Zn) в древесных кольцах увеличилось. Особенно ярко эти тенденции проявились в 1980-х и 1990-х годах (пик загрязнения), при этом интенсивность сигналов уменьшалась с удалением деревьев от промышленного предприятия [95].

Европейская часть Российской Федерации

В промзоне г. Воронежа вблизи заводов синтетического каучука, горно-обогачительного оборудования и ТЭЦ обнаружено не только снижение радиального прироста сосняков, но и нарушение его цикличности в многолетней динамике [48]. На примере 40-летних древостоев сосны вдоль автотрассы Воронеж-Ростов показано, что при приближении к автотрассе снижался абсолютный прирост (в основном за счет поздней древесины) и резко возрастала амплитуда колебаний прироста как по ширине всего кольца, так и по ширине поздней древесины. За последние 20 лет выявлена тенденция перераспределения доли участия ранней и поздней древесины в снижении общего прироста в сторону ранней. Наиболее глубокие и длительные депрессии прироста отмечены возле автотрассы, особенно в последнем десятилетии. Сравнение участков дороги с разной интенсивностью движения (180 и 1300 авт./ч) показало снижение общего прироста в 1,8 раза (на 44,4%) при повышении трафика [36].

В естественных условиях хребта Каратау (Южный Урал) прирост дуба сильно уменьшался после холодных зим, если сразу же наблюдались инвазии шелкопряда, а в антропогенных условиях (Уфа, Предуралье) прирост и без инвазий всегда реагировал снижением на холодные зимы [32–33]. Указывается, что достаточно сильные внешние воздействия могут ускорить или притормозить у древесных видов переход от одного этапа онтогенеза к следующему [40]. Так показано, что в условиях нефтехимического загрязнения в Уфе у сосны и дуба значительно сокращалась длительность онтогенетических периодов, у ели и липы не изменялась, а у лиственницы и березы, напротив, значительно увеличивалась. В такой разнообразии ответных адаптивных реакций прослеживаются онтогенетические стратегии адаптации древесных видов к экстремальным факторам окружающей среды. Кроме того, указывалось на снижение чувствительности прироста к климатическим сигналам в условиях загрязнения. Показано, что нефтехимическое загрязнение окружающей среды вызывало видоспецифические реакции прироста: для хвойных видов углеводородное загрязнение выступало в качестве «внекорневой подкормки» и стимулировало увеличение радиального прироста, причем у ели и лиственницы – начиная с генеративного периода (то есть влияло только на взро-

слые растения), а у сосны – на протяжении всего онтогенеза; у лиственных видов наблюдалось подавление прироста, причем у дуба и липы незначительное, но на протяжении всего онтогенеза, а у березы выявлена значительная стимуляция прироста в ювенильном и виргинильном периодах, однако, начиная с генеративного периода, различия между загрязнением и контролем полностью исчезали. Видоспецифичность данных реакций объясняется эколого-биологическими особенностями видов: сосна, лиственница (светлохвойные деревья) и береза (мелколиственное дерево) относятся к быстрорастущим пионерным видам, поэтому «внекорневая подкормка» срабатывает как стимулятор прироста; ель (темнохвойное дерево), дуб и липа (широколиственные деревья) относятся к медленнорастущим древесным видам. Поскольку у лиственных видов площадь контакта и поглощения токсиантов через ассимиляционный аппарат значительно больше, чем у хвойных, промышленное загрязнение в конечном итоге приводит к подавлению их прироста [3, 8, 44, 49].

В сосняках (*Pinus sylvestris* L.), прилегающих к Карабашскому медеплавильному комбинату (Челябинская область), наблюдалось значительное снижение прироста и нарушение характера связи прироста с климатическими факторами: при резком возрастании стандартного отклонения индексов прироста понижалось отношение «сигнал-шум», снижалась сила корреляционной связи прироста с осадками и с температурой, снижалась суммарная доля дисперсии, объясняемая климатическими переменными, пик функции отклика на осадки смещался к январю-февралю при сравнении с контролем (май-июнь), но функция отклика на температуру оставалась неизменной. В импактной зоне увеличивалась чувствительность хронологии к стрессовым факторам, а также число выпавших колец (до 0,83–2,19%). Глубокие и продолжительные минимумы прироста совпадали по времени с возникновением завода в 1910 году (9-летняя депрессия), с введением в строй комбината в 1933 году (12-летняя депрессия) и с максимальным объемом производства в 1970-е годы (11-летняя депрессия) [34].

В условиях промышленного центра Кемерово по мере приближения к наиболее загрязненным промышленным объектам при общем угнетении прироста сосны и березы отмечено, что прирост сосны подвержен угнетению значительно больше (на 62,2% по сравнению с контролем), чем у березы (на 42,1%) [39].

В условиях промышленного центра Красноярск загрязнение влияет на прирост сосны обыкновенной и рябины обыкновенной пренебрежительно мало, у ели колючей и березы повислой подавляет прирост только на начальных этапах роста (до 15 и 25 лет соответственно), а далее различия с контролем исчезали. Однако загрязнение вызывало значительное сужение

годовых колец вяза приземистого, тополя бальзамического, черемухи Маака и яблони ягодной на протяжении всего онтогенеза, что позволяет использовать их в качестве индикаторов. Загрязнение вызывало ускоренное «старение» насаждений березы, вяза, черемухи и яблони, которое характеризовалось относительно резким уменьшением ширины годовых колец с возрастом [24].

Город Братск является крупным промышленным центром со смешанным составом пылегазовых выбросов из-за близкого расположения промышленных источников относительно друг друга, в районе которых заложены пробные площади в сосновых древостоях в зонах экстремального, сильного и слабого загрязнения. Там показано значительное и достоверное увеличение прироста по мере приближения от зоны слабого к зоне экстремального загрязнения. Так, в зоне экстремального загрязнения общий прирост возрастал в 1,8 раза по сравнению с зоной слабого загрязнения, причем возрастание поздней древесины значительно больше (в 2,1 раза) по сравнению с ранней (в 1,7 раза). По мере усиления загрязнения происходило перераспределение в долях участия ранней и поздней древесины в сторону уменьшения доли ранней (с 72,3 до 68,8%) и увеличения доли поздней (с 27,7 до 31,2%) [50].

Зарубежные страны Азии

Оценка прироста сосны Массона (*Pinus massoniana* L.), растущей на загрязненных и незагрязненных местах в дельте Жемчужной реки (южный Китай), показала, что атмосферное загрязнение (SO_2 и кислотные дожди) являлось основным фактором, способствующим его уменьшению после 1980-го и особенно после 1990 года. Представлен прогноз о дальнейшем ухудшении прироста и состояния древостоев в целом [79].

Снижение ширины годовых колец сосны Тунберга (*Pinus thunbergii* Parl.) в районе города Ульсан (Южная Корея) началось в 1968–1983 годах из-за загрязнения от комплексов тяжелой и нефтехимической промышленности. Влияние газов (SO_2 , O_3 , NO_2 , CO) и суммы взвешенных частиц на величину прироста было незначительным. Оценка содержания тяжелых металлов в годовых кольцах показала, что из всех изученных металлов (Cu, Cr, Pb, Ni, Fe, Zn, Mg, Ca, Mn) самым сильным влиянием на прирост характеризовался свинец в концентрациях более 6 ppm [106].

Радиоактивное загрязнение

К новому виду загрязнения окружающей среды прошлого столетия следует отнести радиоактивное загрязнение, появление которого привлекло внимание специалистов к проблеме реакции радиального прироста на выбросы радионуклидов. В год аварии Чернобыльской АЭС зафиксировано достоверное

уменьшение слоя ранней древесины до 20% в годовых кольцах деревьев сосны обыкновенной, однако воздействие на прирост поздней древесины не выявлено. В послеварийный период (1987–1989 годы) прирост ранней и поздней древесины у здоровых деревьев восстановился, а у ослабленных, сильно ослабленных и усыхающих остался ниже контрольных показателей до 17,5%. В 2005–2009 годах положительный эффект радиации на прирост здоровых деревьев нарастал (ранней древесины – до 81%, поздней – до 80,5%), а в 2010–2015 годах сменился уменьшением (ранней древесины – до 61%, поздней – до 66,4%). Влияние радиации на раннюю древесину ослабленных деревьев достоверно не проявилось, у поздней древесины положительный эффект прослежен до 2000–2004 годов (до 36%). У сильно ослабленных и усыхающих деревьев в 2005–2009 годах отчетливо проявлялось угнетение ранней древесины (до 44,6 и 41,8%), однако изменения у поздней древесины не выявлены [6]. Аналогичные результаты существенного уменьшения ширины годовых колец сосны обыкновенной после аварии и последующего восстановления прироста, а также изменения в соотношении ранней и поздней древесины (увеличения в 1986-м и уменьшения в 1987 году) выявлены и другими авторами [14, 37, 54, 105]. Кроме того, зафиксировано повышенное количество случаев появления у деревьев сосны ложных (двойных) годовых колец древесины (1986 год) и в ряде случаев выпадение годовых колец (1988–1989 годы) [25, 42]. Вследствие того, что снижение прироста в 1986–1988 годах было характерно для деревьев с сильным повреждением хвои, высказано мнение, что повреждение ассимиляционного аппарата в большей мере влияло на потери прироста древесины, чем прямое воздействие радиации [25, 102].

Деревья дуба характеризовались большей устойчивостью к ионизирующему излучению в сравнении с сосной, поэтому радиоактивное загрязнение оказывало специфическое воздействие на их прирост: в год аварии на Чернобыльской АЭС наблюдалась резкая депрессия прироста, но во все последующие послеварийные годы значительная его стимуляция (за счет прироста поздней древесины), причем для старых деревьев этот эффект был кратковремен, а для молодых – продолжителен [36].

Модельные опыты по облучению деревьев сосны смолистой в течение нескольких лет показали уменьшение радиального прироста древесины (причем наиболее заметно в комлевой части) при 1–5 рентген/день, однако увеличение кроны дерева заметно снижало данный эффект радиации [112]. В другом опыте гамма-облучение семян сосны при 0,01 рентген/ч стимулировало наряду со снижением интенсивности роста в высоту активность камбия и более быстрый рост ксилемы и флоэмы в сравнении с контролем. Вы-

сказано предположение, что радиация подавляла в растениях синтез эндогенного ауксина, стимулирующего скорость роста в высоту, и усиливала образование гиббереллинов и/или цитокининов, регулирующих прирост по толщине ствола [67].

II. Влияние техногенеза на рост корней древесных растений

Обзор влияния техногенеза на корневые системы древесных растений проведен по климатическим зонам в направлении с запада на восток. В первую очередь дан обзор таежной зоны (Финляндия, Мурманская область). Далее рассмотрены Европейская зона в пределах зарубежных стран (Чехия, Украина) и в пределах Российской Федерации (Липецк-Стерлитамак-Уфа-Карабаш-Кемерово-Красноярск-Братск). Отдельно рассмотрены адаптивные реакции в модельных опытах по внесению токсикантов в среду.

Таежная зона

В бореальных хвойных лесах юго-западной Финляндии выявлено значительное увеличение биомассы мелких корней сосны при удалении от медно-никелевой плавильной установки – от 1 г/м² на расстоянии 0,5 км до 252 и 271 г/м² на расстоянии 4 и 8 км соответственно. На самом загрязненном участке (0,5 км) 98% мелких корней были мертвыми, а для участков на расстоянии 4 и 8 км этот показатель составлял всего 13 и 18%. Внесение удобрений и известкование загрязненного участка увеличивали выживаемость мелких корней и снижали концентрации Cu и Ni в них при сравнении с контрольным участком, но не стимулировали рост мелких корней. Существенных различий между участками на расстоянии 4 и 8 км не наблюдалось [76].

Аддитивное действие SO₂ и высоких доз тяжелых металлов в условиях Кольского полуострова усиливало их влияние на корневые системы хвойных древесных видов, что вызывало массовую гибель (до 70–75%) корней всех фракций – от самых тонких поглощающих до скелетных корней. У сосны общая масса корней уменьшалась в 1,5–3 раза, а физиологически активных корней – в 2–4 раза. При этом все жизнеспособные физиологически активные корни в условиях сильного атмосферного загрязнения «уходили» на большую глубину (1 м и более), чем в контроле (не глубже 0,25–0,3 м). Однако при этом в зоне сильного загрязнения у сосны наблюдалось на несколько порядков более интенсивное, чем в контроле, микоризообразование на корнях [57].

Зарубежная Европа

В условиях долгосрочного загрязнения воздуха в районе Есеницких гор (Чешская Республика) показано значительное изменение почвенной среды и превы-

шение предельных концентраций магния и кальция в 8 и 13 раз соответственно. Усыхание деревьев норвежской ели в первую очередь связано с уменьшением числа скелетных корней и увеличением углов между ними. Усыхающие деревья имеют в среднем пять скелетных корней с максимальными углами между ними 173°, при этом 93% всех корневых систем были сосредоточены в верхнем горизонте почвы до 10,2 см, что свидетельствовало о низкой механической стабильности почвы [59].

Вследствие острого облучения сосен после аварии на Чернобыльской АЭС прирост в корнях резко снизился в 1987 году, после чего кольца ксилемы не откладывались [37].

Европейская России вне зоны тайги

Исследования лиственницы Сукачева в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра показали снижение как общей корненаасыщенности почвы в условиях загрязнения относительно контроля (в 1,6 раза), так и массы поглощающих (в 1,4 раза), полускелетных (в 1,8 раза) и скелетных корней (в 3,3 раза). При этом в общей корневой массе в условиях загрязнения происходило перераспределение во фракционном составе в сторону увеличения доли поглощающих корней (на 10,4%) на фоне уменьшения долей полускелетных (на 1,9%) и скелетных (на 8,6%) [31]. Довольно интересным в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами является факт не только снижения корненаасыщенности лесной подстилки тонкими проводящими корнями сосны, но и полного «избегания» корнями подстилки при максимальном уровне загрязнения [13].

Крупный блок исследований посвящен изучению корневых систем древесных видов в условиях нефтехимического загрязнения Уфимского промышленного центра. Для хвойных и лиственных видов установлены следующие видоспецифические реакции.

1. У всех хвойных видов в условиях загрязнения при сравнении с контролем существенно увеличивалась общая корненаасыщенность почвенного профиля (сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. – в 1,5 раза, лиственница Сукачева *Larix sukaczewii* Dyl. – в 1,3 раза, ель сибирская *Picea obovata* Ledeb. – в 1,6 раза), и в разной степени всеми фракциями корней: у сосны незначительно – поглощающими (в 1,1 раза), но существенно – полускелетными (в 1,3 раза) и скелетными (в 1,6 раза); у лиственницы – существенно поглощающими (в 1,4 раза), полускелетными (в 1,5 раза) и скелетными (в 1,3 раза); у ели существенно – поглощающими (в 2,1 раза), полускелетными (в 1,3 раза) и скелетными (в 1,6 раза). В условиях загрязнения показано перераспределение относительно контроля у фракций корней общей корневой массы: у сосны – в сторону уменьшения долей поглощающих (на 2,3%)

и полускелетных (на 1,2%) при увеличении доли скелетных (на 3,6%) корней; у лиственницы – в сторону увеличения долей поглощающих (на 1,0%) и полускелетных (на 1,5%) при понижении доли скелетных (на 2,4%) корней; у ели – в сторону увеличения доли поглощающих (на 3,3%) при понижении долей полускелетных (на 1,3%) и скелетных (на 2,0%) корней [18, 46].

2. У лиственных древесных видов, в отличие от хвойных, нет общей адаптивной реакции в ответ на нефтехимическое загрязнение. Общая корненаасыщенность в условиях загрязнения при сравнении с контролем существенно увеличивалась у дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клена остролистного (*Acer platanoides* L.) – в 1,2 и 2,9 раза соответственно, практически не изменялась у липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth), но существенно снижалась у ивы белой (*Salix alba* L.) – в 2 раза. При этом наблюдались видоспецифические реакции корневых фракций: в условиях загрязнения у дуба существенно уменьшалась корненаасыщенность поглощающими (в 1,6 раза) корнями, но увеличивалась – полускелетными (в 1,3 раза) и скелетными (в 1,3 раза) корнями; у липы существенно увеличивалась корненаасыщенность поглощающими (в 1,5 раза) и полускелетными (в 1,8 раза) и незначительно – скелетными (в 1,1 раза) корнями; у березы существенно увеличивалась корненаасыщенность поглощающими корнями (в 1,3 раза), но незначительно уменьшалась – скелетными корнями (в 1,1 раза), масса полускелетных корней не изменялась; у ивы существенно уменьшалась корненаасыщенность всех корневых фракций (поглощающих – в 1,3, полускелетных – в 1,2, скелетных – в 2,9 раза); у клена существенно увеличивалась корненаасыщенность всех корневых фракций (поглощающих – в 2,2, полускелетных – в 1,8, скелетных – в 3,4 раза). В условиях загрязнения при сравнении с контролем показано перераспределение фракций корней в общей корневой массе: у дуба – в сторону уменьшения доли поглощающих (на 1,3%) при увеличении доли скелетных (на 1,2%) корней, полускелетные корни не изменяются; у липы – в сторону увеличения долей поглощающих (на 1,2%) и полускелетных (на 3,4%) при понижении доли скелетных (на 4,6%) корней; у березы – в сторону увеличения доли поглощающих (на 6,2%) при понижении долей полускелетных (на 0,1%) и скелетных (на 6,1%) корней; у ивы – в сторону увеличения доли поглощающих (на 24,7%) и полускелетных (на 10%) при понижении доли скелетных (на 34,6%) корней; у клена – в сторону уменьшения доли поглощающих (на 5,6%) и полускелетных (на 4,4%) при увеличении доли скелетных (на 10%) корней [2, 5, 12, 44, 58].

3. Характерной особенностью во всех указанных исследованиях являлось резкое «поднятие» к верхним почвенным горизонтам уровня максимальной кор-

ненаасыщенности в условиях загрязнения при сравнении с контролем. Обсуждаются роль углеводородного загрязнения в качестве корневой и внекорневой подкормки, а также компенсаторное увеличение корненаасыщенности почвы в условиях загрязнения при снижении жизненного состояния надземной части древостоев.

Проанализировано влияние разных типов загрязнения – полиметаллического (Липецкий промцентр) и нефтехимического (Уфимский промцентр) – на корневые системы березы. Исследования показали, что корненаасыщенность почвы в насаждениях березы в Уфимском промышленном центре значительно выше, чем в Липецком. Выявлены видоспецифические реакции: при усилении степени загрязнения в условиях полиметаллического загрязнения корненаасыщенность поглощающими корнями в слое почвы 0–50 см значительно снижалась при сравнении с контролем (284,99 и 315,97 г/м² соответственно), а в условиях нефтехимического загрязнения, напротив, значительно возрастала (887,32 и 682,21 г/м² соответственно). При этом в условиях полиметаллического загрязнения из всего почвенного профиля резко выделялся слой почвы 0–10 см, в котором корненаасыщенность почвы поглощающими корнями в 1,34 раза выше при сравнении с контролем, но далее по мере углубления корненаасыщенность снижалась в 1,08–1,65 раза при сравнении с контролем. В обоих промцентрах максимальная корненаасыщенность почвы поглощающими корнями отмечалась на глубине 0–10 см: в условиях полиметаллического загрязнения здесь сосредоточено 42,6% всей массы поглощающих корней, а в условиях нефтехимического загрязнения – 29,72%. Разница в корненаасыщенности между двумя промышленными центрами связана с преобладанием углеводородов в структуре выбросов нефтеперерабатывающих предприятий, которые могут вовлекаться в метаболизм в качестве корневой и внекорневой подкормки [19].

Экспериментальные исследования

Корневые экссудаты (особенно низкомолекулярные органические кислоты) могут изменять биодоступность стойких органических загрязнителей. В экспериментах с обработкой десяти видов городских деревьев и кустарников (лоропеталума *Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliv., гардений *Gardenia ellis* J. Ellis и *G. jasminoides* J. Ellis, фотинии *Photinia fraseri* Dress, бирючины *Ligustrum japonicum* Thunb., рододендрона *Rhododendron simsii* Planch., османтуса *Osmanthus fragrans* Lour., самшита *Buxus sinica* Siebold & Zucc., камелии *Camellia sasanqua* Thunb., бересклета *Euonymus japonicus* Thunb.) фенантроном (в концентрациях 200 и 2000 мг/кг⁻¹) в городе Пинсяне (Китай) показано, что высокая концентрация фенантрена стимулировала значительное увеличение количества соединений

в составе корневых экссудатов (256) при сравнении с низкой концентрацией (180). В составе экссудатов, полученных после обработки, доминирующими соединениями (более 92% состава) были углеводы, фенолы и сложные эфиры. Из всех веществ в составе экссудатов наибольшее количество составляли фенолы (80%), нитрилы – наименьшее. В составе вторичных корневых экссудатов обнаружены кетоны, альдегиды, амины и гетероциклические соединения, к редко встречающимся отнесены спирты, хиноны, простые эфиры, ацилы и нитрилы. Анализ основных компонентов показал, что у деревьев, обработанных фенантроном в высокой концентрации, имели место достоверные изменения в составе соединений корневых экссудатов (30,5% общих вариаций), тогда как при низкой концентрации фенантрена и в контроле изменения значительно меньше (25,6 и 15,8% общих вариаций соответственно). Из всех древесных видов *R. simsii* выделял максимальное количество соединений в составе экссудатов (89), а *L. japonicus* – наименьшее (46) [109].

Присутствие Cd в ризосфере ингибировало удлинение корня и влияло на его анатомию. Наличие Cd в ризосфере в концентрациях, которые не вызывали значительного некроза, стимулировали увеличение диаметра корня. Например, корни ивы и тополя, выращенные в среде, содержащей Cd, короче и толще, чем у растений, выращенных в среде, не содержащей Cd, что объясняется увеличением размера паренхимных клеток. Клоны ивы, характеризующиеся высокой толерантностью к Cd, имели большую долю эпидермальной и эндодермальной тканей, чем клоны, чувствительные к Cd, которые имели большую долю тканей центрального цилиндра [82, 83].

В опытах с внесением в почву водных растворов солей тяжелых металлов и микроэлементов в умеренной и избыточной концентрациях (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Mn и Hg) в молодых культурах различных пород деревьев показана, главным образом, депрессия таких параметров, как удлинение корней, производство биомассы, инициация корней и формирование корневых волосков в зависимости от архитектуры всей корневой системы. Токсичность тяжелых металлов нарушала минеральное питание корней деревьев. Обсуждаются механизмы толерантности (синтез фитохелатинов, повышение pH в ризосфере, микоризообразование) в стратегии противодействия металлам [78].

Обработка саженцев тополя *Populus euramericana* cv. «74/76» разными концентрациями O₃ и N (в виде мочевины) показала, что при увеличении концентрации только N (с 0 до 200 кг×га⁻¹ в год) значительно возросла масса мелких корней (с 6 до 9 г) и побегов (со 150 до 200 г), незначительно возросла масса крупных корней (с 31 до 32,5 г), но снижалось соотношение корень/побег (с 0,25 до 0,2). При увеличении концент-

рации только O₃ (с 0 до 80 частей на миллион) значительно снижалась масса мелких и крупных корней (с 6 до 4 и с 31 до 24 г соответственно) и побегов (со 150 до 115 г), однако соотношение корень/побег (0,25) практически не изменялось. При совместном воздействии O₃ и N показано, что постепенное увеличение концентрации N в градиенте пяти вариантов увеличения концентрации O₃ заметно снижало ингибирующее действие озона, значительно увеличивая массу мелких (на 23,0%) и крупных (на 12,8%) корней и побегов во всех вариантах опыта, но при этом значительно снижалось соотношение корень/побег (на 19,7%). Таким образом, на корневые системы оба элемента влияли значительно сильнее, чем на побеги. Мелкие корни были одинаково чувствительны как к O₃, так и к N, однако крупные корни были чувствительны только к высоким концентрациям O₃. Дисперсионный анализ показал высокую значимость N для мелких корней, а O₃ – для соотношения корень/побег, но совместное их воздействие не являлось статистически значимым для всех исследованных параметров [80].

Лабораторные и полевые эксперименты показали, что кислотные осадки оказывали значительное негативное воздействие на мелкие корни, причем длина корня была более чувствительна, чем корневая биомасса. Значительное поглощение азота и повышенное содержание тропосферного озона не оказывали воздействия на количественные параметры корней, однако повышенное содержание CO₂ имело значительный положительный эффект. Негативный эффект кислотных осадков и положительный эффект повышенного CO₂ увеличивались со временем; следовательно, эффекты являлись стойкими вопреки действию других факторов. Эктомикоризная колонизация оказалась неподходящим параметром для оценки загрязнения окружающей среды, однако положительно влияла на длину и биомассу тонких корней [68].

Экспериментально показано, что мелкие корни деревьев ели *Picea abies* (L.) H. Karst. и тополя *Populus tremula* L. хорошо адаптировались к условиям загрязнения тяжелыми металлами, но их фитостабилизационные возможности очень низки. В загрязненной почве в тонких корнях тяжелые металлы накапливались примерно в 10–20 раз больше, чем в контроле, а способность связывать тяжелые металлы достигала своего максимума уже после первого вегетационного периода. Мелкие корни ели при сравнении с тополем, как правило, накапливали больше тяжелых металлов. Медь и цинк накапливались в стенках клеток эпидермиса больше, чем в коре, однако накопившиеся в мелких корнях тяжелые металлы составляли всего 0,03–0,2% их общего количества в почвах [65].

Кислотность почвы и связанная с ней токсичность алюминия оказывали большее влияние на ель и пихту, чем на другие хвойные породы. Алюминий нака-

плывался предпочтительно в корневых кончиках, где он влиял на деление и удлинение клеток, скорость удлинения корня, минеральное питание путем ингибирования поступления Са и К. Закупоривание ксилемы каллезой в корнях ели рассматривается как один из отличительных симптомов токсичности Al. Скорость удлинения корня и образование каллезы могут быть использованы в качестве индикаторов повреждения Al. Корневые системы ели, подверженные повышенному осаждению азота и повышенной кислотности почвы, проявляли тенденцию к снижению роста мелких корней, понижению отношения живых мелких корней к мертвым, нарушению порядка разветвления, возникновению точек отмирания корня и уменьшению микоризации. Однако уменьшение осаждения азота и серы обычно приводило к стабилизации и постепенному восстановлению мелких корней. Интенсивность роста скелетных корней является мерой жизнеспособности корневой системы. Пропорция между количеством скелетных корней и другими корневыми параметрами (например, количество поглощающих корней, длина корня) указывало на периоды существенного разрастания корня. Снижение данных параметров может быть показателем ограниченного снабжения водой или питательными веществами и токсичностью почвенных условий. Формирование побочных корней (корней, сформированных в нарушенной последовательности с потерей корневых порядков) проявлялось в неблагоприятных условиях окружающей среды, например, засуха, инфекции, подкисление почвы. Побочные корни возникали от первичного корня, в основном из раневого каллуса, камбиальной ткани или паренхимной ткани флоэмы [97].

Заключение

Анализ публикаций показывает (табл. 1), что в ответ на промышленное загрязнение, как правило, наблюдается однозначное уменьшение величины радиального прироста древесных видов [3, 8, 25, 33, 34, 36, 38, 39, 42–44, 48, 55, 62, 69, 73, 79, 81, 94, 95, 99, 101, 103, 104, 106, 111, 112], потеря его чувствительности к климатическим сигналам [3, 34, 43, 47, 49, 103, 104], перераспределение долей ранней и поздней древесины в общем приросте [6, 14, 16, 36, 37, 50, 54, 101, 105], изменение длительности онтогенетических периодов и нарушение цикличности прироста [3, 40, 48, 49], появление повышенного количества ложных годовичных колец или их выпадение [25, 34, 42, 62], ускоренное начало старения древостоев [3, 24, 49], зависимость величины прироста от расстояния между древостоями и источниками эмиссии и от ландшафта местности [36, 39, 62, 69, 95, 101, 103, 104, 107], а также тесная связь между уменьшением ширины древесных колец и объемами промышленных выбросов, содержанием в годовичных кольцах металлов и различных микроэлементов [38, 43, 95, 104, 106], восстановление прироста после снижения объемов выбросов загрязняющих веществ [9, 38, 55, 62, 69, 73, 81, 94, 99, 103, 104, 107, 111]. Причем следует отметить отсутствие нейтральных реакций, а неспецифические реакции очень малочисленны.

Однако нефтехимическое, радиационное и некоторые типы смешанных загрязнений способны стимулировать увеличение радиального прироста, при этом эффекты видоспецифичны и зависят от возраста и жизненного состояния деревьев [6, 14, 16, 24, 36, 37, 47, 49, 50, 54, 67, 105, 107]. Предполагается, что угле-

Табл. 1

Распределение публикаций, использованных в обзоре, по встречаемости в результатах исследований специфических, неспецифических и нейтральных адаптивных реакций дендрохронологических параметров и корневых систем в ответ на техногенное загрязнение

Неспецифические реакции	Специфические реакции	Нейтральные реакции
<i>Дендрохронология</i>		
[50, 67]	[3, 8, 25, 33, 34, 36, 38, 39, 42–44, 48, 55, 62, 69, 73, 79, 81, 94, 95, 99, 101, 103, 104, 106, 111, 112]	
	[14, 16, 24, 36, 37, 49, 105, 107]	
	[6, 47]	
<i>Корневые системы</i>		
[2, 12, 18, 46]	[5, 13, 19, 31, 37, 57, 59, 76, 78, 80, 82, 83, 97]	[44, 58]
	[68]	

водороды в составе нефтехимического загрязнения могут действовать в качестве внекорневой подкормки на хвойные древесные виды, поскольку являются химическими аналогами естественного почвенного гумуса [49]. В настоящее время имеющиеся данные не позволяют сформировать единое мнение о влиянии хронического облучения на рост растений: одни исследователи указывают на ингибирование роста, другие отвергают какие-либо особенности в их действии, а третьи указывают на возможность позитивного действия относительно невысоких доз радиации [6]. Так, с одной стороны, в сосняках юга Нечерноземной зоны Европейской части России отмечено негативное влияние даже сравнительно малых доз радиации на радиальный прирост на следующий год после аварии на ЧАЭС [45]. С другой стороны, утверждается, что хроническая радиация при МЭД до 1,5 мР/ч не оказывает сильного ингибирующего действия на ростовые процессы, а зачастую вызывает их стимуляцию [14].

Промышленные выбросы изменяют, прежде всего, физико-химические свойства почвы, вызывая увеличение ее кислотности [60] или, наоборот, подщелачивание [91], нередко в условиях техногенеза имеют место уменьшение содержания минеральных веществ в почве [93, 100] и изменение микробиологического состава ризосферы [88, 89]. Наиболее чувствительными как к естественным, так и к антропогенным факторам являются поглощающие корни, тем не менее, загрязнение вызывает, как правило, существенное уменьшение корненасыщенности почвы всеми фракциями корней, как в условиях промышленных центров [5, 13, 19, 31, 37, 57, 59, 76, 97], так и в опытах с искусственным внесением токсикантов в среду [68, 78, 80, 82, 83]. Интересным является адаптивный механизм, когда при общем угнетении корневых систем или угнетении только отдельных корневых фракций наблюдается перераспределение во фракционном составе в пользу увеличения долей тех или иных корневых фракций [2, 5, 12, 18, 31, 44, 46, 58], а также эффект «избегания» наиболее загрязненных слоев почвенного профиля корневыми системами [13, 19, 57]. В одних

случаях наблюдается интенсивное накопление токсикантов в корнях [65, 97], а в других случаях – активное выделение корневых экссудатов, препятствующих проникновению токсикантов в растение [109].

Как и в случае с радиальным приростом, нефтехимическое загрязнение способно стимулировать увеличение корненасыщенности почвы у хвойных древесных видов [18, 46], однако для лиственных видов данный эффект носит видоспецифический характер [2, 12, 44, 58]. Но радиоактивное загрязнение наносит более значительное повреждение корневым системам, чем радиальному приросту [37].

Данный обзор показывает, что, как и в отношении морфологических и физиологических параметров, рассмотренных в предыдущих разделах, в отношении особенностей формирования радиального прироста и корневых систем древесных растений в условиях промышленного загрязнения также наблюдается адаптивный полиморфизм, направленный на множественное обеспечение биологически необходимых функций для сохранения гомеостаза и повышения толерантности к стрессовому фактору.

Благодарности. Работа выполнена по теме № АААА-А18-118022190103-0 «Адаптация древесных растений и трансформация лесных экосистем Южно-Уральского региона в контрастных природных и антропогенных условиях» в рамках государственного задания Минобрнауки России № 075-00326-19-00. В работе использована приборная база Центра коллективного пользования «Агидель» УФИЦ РАН.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-14-50218-Экспансия.

Funding. The reported study was funded by RFBR, project number 20-14-50218.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Алексеев АС. Колебания радиального прироста в древостоях при атмосферном загрязнении. Лесоведение. 1990;(2):82-6.
2. Аминова КЗ. Эколого-биологическая характеристика дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения (на примере Уфимского промышленного центра) (диссертация). Тольятти: ИЭВБ РАН; 2016.
3. Аминова КЗ, Уразгильдин РВ, Кулагин АЮ. Прирост стволовой древесины дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения. Биосфера. 2014;6(4):388-99.
4. Антанайтис ВВ, Загребев ВВ. Прирост леса. М.: Лесная промышленность; 1981.
5. Ахмадуллин РШ, Зайцев ГА. Корненасыщенность почвы в насаждениях ивы белой (*Salix alba* L.) в условиях нефтехимического загряз-

- нения Уфимского промышленного центра. Известия Уфимского научного центра РАН. 2013;(3):30-3.
6. Белов АА. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной в насаждениях Брянской области, загрязненных радионуклидами (диссертация). М.: ФБУ ВНИИЛМ; 2017.
 7. Битвинскас ТТ. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат; 1974.
 8. Бойко АА. Дендрэкологическая характеристика березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях смешанного типа загрязнения окружающей среды (Уфимский промышленный центр) (диссертация). Оренбург: ГОУ ВПО ОГПУ; 2005.
 9. Борисова ОВ. Влияние аэротехногенного загрязнения на хвойные и лиственные древостои в Новгородской области (диссертация). Тольятти: ИЭВБ РАН; 2009.
 10. Ваганов ЕА, Терсков ИА. О количественных закономерностях индивидуального роста деревьев. В кн.: Анализ динамики роста биологических объектов: Сборник статей. М.: Наука; 1978. С. 15-7.
 11. Ваганов ЕА, Шашкин АВ. Роль и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Издательство СО РАН; 2000.
 12. Васильева КА, Зайцев ГА, Кулагин АЮ. Особенности строения корневых систем клена остролистного (*Acer platanoides* L.) в условиях нефтехимического загрязнения. Вестник Удмуртского университета. Серия 6: Биология. Науки о Земле. 2011;2:55-60.
 13. Веселкин ДВ. Освоение почвы корнями хвойных при загрязнении тяжелыми металлами. В кн.: Тезисы докладов научной конференции «Б.П. Колесников – выдающийся отечественный лесовод и эколог. К 90-летию со дня рождения». Екатеринбург; 1999. С. 19.
 14. Глазун ИН. Изменчивость хвойных растений в радиоактивно загрязненных насаждениях Брянского округа зоны широколиственных лесов (диссертация). Брянск: Брянская государственная инженерно-технологическая академия; 1998.
 15. Горячев ВМ, Карасева ЮВ. Анализ естественного и антропогенного воздействия на радиальный прирост сосны обыкновенной в лесопарковой зоне Екатеринбурга. В кн.: Тезисы докладов IV молодежной научной конференции «Актуальные проблемы биологии и экологии». Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН; 1999. С. 48.
 16. Демьянов ВА, Китсинг ЛИ, Яришко ВТ. Влияние промышленного загрязнения на радиальный прирост *Larix Gmelinii* (Pinaceae). Известия РАН. Серия биологическая. 1996;(4):490-4.
 17. Еремин ВМ, Бойко ВИ. Анатомическое строение коры стебля некоторых видов семейства *Ericaceae*. Ботанический журнал. 1998; 83(8):1-15.
 18. Зайцев ГА. Особенности формирования корневых систем сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) в техногенных условиях Предуралья (Уфимский промышленный центр) (диссертация). Уфа: БашГУ; 2000.
 19. Зайцев ГА, Дубровина ОА, Логвинов КВ. Корневая система березы повислой в условиях загрязнения. В кн.: ЭКОБИОТЕХ 2019. Материалы VI Всероссийской конференции с международным участием; 2019. С. 140-3.
 20. Ильин СС. К методике изучения корневой системы растений. Ботанический журнал. 1961;46(10):1533-7.
 21. Калинин МИ. Корневедение: учебное пособие. Киев: Учебно-методический комплекс высшего образования; 1989.
 22. Качинский НА. Корневая система растений в почвах подзолистого типа. В кн.: Исследования в связи с водным и питательным режимом почв: Сборник научных трудов. Вып. 7. М.: МосХоз; 1925.
 23. Киселев ВН, Матюшевская ЕВ, Яротов АЕ, Митрахович ПА. Хвойные леса Беларуси в современных климатических условиях (дендроклиматический анализ). Минск: Право и экономика; 2010.
 24. Кладько ЮВ, Бенькова ВЕ. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки г. Красноярск. Сибирский лесной журнал. 2018;(4):49-57.
 25. Козубов ГМ, Таскаев АИ, ред. Радиационное воздействие на хвойные леса в районе аварии на Чернобыльской АЭС. Сыктывкар: Коми Научный центр РАН; 1990.
 26. Колесников ВА. Методика изучения корневой системы древесных растений. 2-е издание. М.: Лесная промышленность; 1972.
 27. Комин ГЕ. К методике дендроклиматологических исследований. Труды Института экологии растений и животных Уральского филиала АН СССР. 1970;67:234-41.
 28. Красильников ПК. К вопросу о методике изучения корневых систем древесных пород при экспедиционных геоботанических исследованиях. Ботанический журнал. 1950;35(1):57-67.
 29. Красильников ПК. Классификация корневых систем деревьев и кустарников. Лесоведение. 1970;(3):35-44.

30. Красильников ПК. Методика полевого изучения подземных частей растений (с учетом специфики ресурсоведческих исследований). Л.: Наука; 1983.
31. Кулагин АА, Зайцев ГА. Лиственница Сукачева в экстремальных лесорастительных условиях Южного Урала. М.: Наука; 2008.
32. Кучеров СЕ, Мулдашев АА. Особенности радиального прироста дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на хребте Каратау (Южный Урал). Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2011;(1):95-6.
33. Кучеров СЕ. Характеристика радиального прироста дуба в лесных насаждениях г. Уфы. В кн.: Дендрэкология: техногенез и вопросы лесовосстановления. Уфа: Гилем; 1996. С. 65-79.
34. Кучеров СЕ, Мулдашев АА. Радиальный прирост сосны обыкновенной в районе Карабашского медеплавильного комбината. Лесоведение. 2003;(2):43-9.
35. Ловелиус НВ. Изменчивость прироста деревьев. Л.: Наука; 1979.
36. Матвеев СМ, Акулов ВВ. Динамика состояния сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) вдоль пригородных автотрасс г. Воронежа 1991–2007 гг. Вестник Томского государственного университета. 2012;(364):212-8.
37. Мусаев ЕК. Реакция прироста и структуры годичных колец сосны (*Pinus sylvestris* L.) на радиоактивное воздействие в районе Чернобыльской АЭС (диссертация). Красноярск: Институт леса им. ВН Сукачева Сибирского отделения РАН; 1995.
38. Мюльгаузен ДС, Панкратова ЛА. Влияние аэротехногенного загрязнения на радиальный прирост сосны обыкновенной на Кольском севере. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле. 2016;4:124-33.
39. Неверова ОА. Морфометрическая и дендрохронологическая диагностика состояния древесных насаждений как способ индикации загрязнения урбанизированной среды. Успехи современного естествознания. Биологические науки. 2002;(1):57-64.
40. Николаева СА, Савчук ДА. Комплексный подход и методика реконструкции роста и развития деревьев и лесных сообществ. Вестник Томского государственного университета. Биология. 2009;(2):111-25.
41. Пастернак ПС, Приступа ГК, Мазепа ВГ. Влияние промышленных эмиссий на радиальный прирост сосны. Лесовод и агролесомелиоратор. 1985;(70):16-9.
42. Пастернак ПС, Молотков ПИ, Кучма НД, Подкур ПП. Лесоводственно-экологические последствия загрязнения лесов аварийными выбросами. В кн.: Чернобыль-88. Доклады 1 Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Т. 3. Ч. 2. Чернобыль; 1989. С. 36-60.
43. Рыбаков ДС. Биогеохимическая оценка экологического риска на примере *Pinus sylvestris* L. Принципы экологии. 2016;(2):70-83.
44. Сейдафаров РА. Эколого-биологические особенности липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях техногенного загрязнения (на примере Уфимского промышленного центра) (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2009.
45. Скок АВ. Изменчивость репродуктивных и ростовых процессов сосны обыкновенной в различных зонах хронического радиоактивного загрязнения ЧАЭС Южного Нечерноземья РФ (диссертация). Брянск: Брянский государственный университет им. акад. ИГ Петровского; 2005.
46. Скотников ДВ. Дендрэкологическая характеристика ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях нефтехимического загрязнения (Уфимский промышленный центр) (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2007.
47. Стравинскене ВП. Изменение радиального прироста деревьев в зоне действия промышленного загрязнения. Лесное хозяйство. 1987;(5):34-6.
48. Таранков ВИ, Матвеев СМ. Радиальный прирост древостоев сосны обыкновенной в зоне действия промышленного загрязнения. Лесной журнал. 1994;(4):48-51.
49. Уразильдин РВ, Полякова ГР, Аминова КЗ, Галиахметов РД, Кулагин АЮ. Прирост ствольной древесины сосны обыкновенной, ели сибирской и лиственницы Сукачева в условиях промышленного загрязнения. Бюллетень московского общества испытателей природы. Отделение Биологическое. 2018;123 (2):45-61.
50. Чжан СА, Рунова ЕМ, Пузанова ОА, Чжан ЛА. Изменение радиального прироста сосны обыкновенной в зоне длительного воздействия промышленного загрязнения. Хвойные бореальной зоны. 2011;29(3-4):304-8.
51. Чжан СА, Пузанова ОА, Чжан ЛА. Изменение радиального прироста сосны обыкновенной в зоне длительного воздействия промышленного загрязнения. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2013;35:28-32.
52. Шалыт МС. Методика изучения морфологии и экологии подземных частей отдельных растений и растительных сообществ. В кн.: Полевая

- геоботаника. Т. II. М.-Л.: Издательство Академии наук СССР; 1960. С. 369-447.
53. Шиятов СГ, Мазепа ВС. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев в высокогорьях Урала. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1992;(14):125-34.
 54. Щетинкин СВ, Щетинкина НА. Особенности динамики радиального прироста дуба черешчатого в условиях радиоактивного загрязнения лесов центральной лесостепи. Лесотехнический журнал. 2014;(3):130-9.
 55. Ярмишко ВТ, Лянгузова ИВ, Лянгузов АЮ. Изменение годичного прироста стволов *Pinus sylvestris* (Pinaceae) при снижении аэротехногенного загрязнения. Растительные ресурсы. 2017;(53):527-42.
 56. Ярмишко ВТ. Методы изучения подземных частей растений. В кн.: Методы изучения лесных сообществ. СПб.: Издательство НИИХимии СПбГУ; 2002. С. 139-53.
 57. Ярмишко ВТ. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: Издательство НИИХимии СПбГУ; 1997.
 58. Яшин ДА, Зайцев ГА, Зиятдинова КЗ, Уразгильдин РВ. Особенности строения корневых систем березы повислой в условиях нефтехимического загрязнения. Известия Самарского научного центра РАН. 2012;14:1581-3.
 7. Bitvinskis TT. Dendroclimaticheskiye Issledovaniya. [Dendroclimatic Studies]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1974. (In Russ.)
 8. Boyko AA. [Dendroecological Characteristics of Birch (*Betula pendula* Roth.) under Conditions of Mixed Type of Environmental Pollution in Ufa Industrial Center (dissertation)]. Orenburg: GOU VPO OGPU; 2005. (In Russ.)
 9. Borisova OV. [Impact of Aerotechnogenic Contamination on Coniferous and Deciduous Forest Stands in Novgorod Region (dissertation)]. Togliatti: IEVB RAN; 2009. (In Russ.)
 10. Vaganov YeA, Terskov IA. [On quantitative regularities of individual growth of trees]. In: Analiz Dinamiki Rosta Biologicheskikh Obyektov: Sbornik Statey. Moscow: Nauka; 1978. P. 15-7. (In Russ.)
 11. Vaganov YeA, Shashkin AV. Rol' i Struktura Godichnykh Kolets Khvoynykh. [Role and Structure of Annual Rings of Coniferous]. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN; 2000. (In Russ.)
 12. Vasilyeva KA, Zaytsev GA, Kulagin AYu. [Structure peculiarities of Norway maple root systems (*Acer platanoides* L.) under conditions of petrochemical contamination]. Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Seriya 6: Biologiya Nauki o Zemle. 2011;2:55-60. (In Russ.)
 13. Veselkin DV. [Soil conversion by coniferous roots upon contamination with heavy metals]. In: Tezisy Dokladov Nauchnoy Konferentsii «B. P. Kolesnikov – Vydayushchiysya Otechestvennyi Lesovod i Ekolog. K 90-Letiye so Dnya Rozhdeniya». Yekaterinburg: 1999. P. 19. (In Russ.)
 14. Glazun IN. [Variability of Coniferous Plants in Radioactively Contaminated Plantations of the Bryansk District of the Broad-Leaved Forests Zone (dissertation)]. Bryansk: Bryanskaya Gosudarstvennaya Inzhenerno-Tekhnologicheskaya Akademiya; 1998. (In Russ.)
 15. Goryachev VM, Karaseva YuV. [Analysis of the natural and anthropogenic impact on the radial increment of pine in the forest park zone of Yekaterinburg]. In: Tezisy Dokladov IV Molodezhnoy Nauchnoy Konferentsii «Aktualnye Problemy Biologii i Ekologii». Syktyvkar: Komi NTS UrO RAN; 1999. P. 48. (In Russ.)
 16. Demyanov VA, Kitsing LI, Yarmishko VT. [Effect of industrial contamination on radial increment of *Larix Gmelinii* (Pinaceae)]. Izvestiya RAN. Seriya Biologicheskaya. 1996;(4):490-4. (In Russ.)
 17. Yeremin VM, Boyko VI. [The anatomical structure of the bark of the stem of some species of the *Ericaceae* family]. Botanicheskiy Zhurnal. 1998;83(8):1-15. (In Russ.)
 18. Zaytsev GA. [Characteristics of the formation of root systems of pine (*Pinus sylvestris* L.) and larch
- Общий список литературы/Reference List**
1. Alekseyev AS. [Fluctuations in radial increment in forest stands upon atmospheric pollution]. Lesovedeniye. 1990;(2):82-6. (In Russ.)
 2. Amineva KZ. [Ecological and Biological Characteristics of Oak (*Quercus robur* L.) in Conditions of Technogenic Pollution Exemplified with Ufa Industrial Center (dissertation)]. Togliatti: IEVB RAN; 2016. (In Russ.)
 3. Amineva KZ, Urazgildin RV, Kulagin AYu. [Radial increment of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stem wood under anthropogenic pollution]. Biosfera. 2014;6(4):388-99. (In Russ.)
 4. Antanaytis VV, Zagreyev VV. Prirost Lesa. [Forest Increment]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1981. (In Russ.)
 5. Akhmadullin RSh, Zaytsev GA. [Root saturation of soil in plantations of white willow (*Salix alba* L.) under the conditions of petrochemical pollution of Ufa industrial center]. Izvestiya Ufmskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2013;(3):30-3. (In Russ.)
 6. Belov AA. [Dynamics of Radial Increment of Pine in Plantations of Bryansk Region Contaminated with Radionuclides (dissertation)]. Moscow: FBU VNIILM; 2017. (In Russ.)

- (*Larix sukaczewii* Dyl.) in the technogenic conditions of Ufa Industrial Center in Cis-Urals (dissertation)]. Ufa: BashGU; 2000. (In Russ.)
19. Zaytsev GA, Dubrovina OA, Logvinov KV. [The root system of birch in conditions of pollution]. In: EKOBIOOTEKH 2019. Materialy VI Vserossiyskoy Konferentsii s Mezhdunarodnym Uchastiyem; 2019. P. 140-3. (In Russ.)
 20. Ilyin SS. [On the methodology of studying the root system of plants]. Botanicheskiy Zhurnal. 1961;46(10):1533-7. (In Russ.)
 21. Kalinin MI. Kornevedeniye: Uchebnoye Posobiye. [Roots Science: A Tutorial]. Kiev: Uchebno-Metodicheskiy Kompleks Vysshego Obrazovaniya; 1989. (In Russ.)
 22. Kachinskiy NA. [The root system of plants in soils of the podzolic type]. In: Issledovaniya v Svyazi s Vodnym i Pitatelnyim Rezhimom Pochv: Sbornik Nauchnykh Trudov. Vyp. 7. Moscow: MosKhoz; 1925. (In Russ.)
 23. Kiselev VN, Matyushevskaya YeV, Yarotov AYe, Mitrakhovich PA. Khvoynye Lesa Belarusi v Sovremennykh Klimaticheskikh Usloviyakh (Dendroklimaticheskii Analiz). [Coniferous Forests of Belarus in Modern Climatic Conditions (Dendroclimatic Analysis)]. Minsk: Pravo i ekonomika; 2010. (In Russ.)
 24. Kladko YuV, Benkova VE. [Radial growth of tree species in conditions of high anthropogenic load in Krasnoyarsk city]. Sibirskiy Lesnoy Zhurnal. 2018;(4):49-57. (In Russ.)
 25. Kozubov GM, Taskayev AI, editors. Radiatsionnoye Vozdeystviye na Khvoynye Lesa v Rayone Avarii na Chernobylskoy AES. [Radiation Effects on Coniferous Forests in the Accident Area of Chernobyl NPP]. Syktyvkar: Komi Nauchnyy Tsentr RAN; 1990. (In Russ.)
 26. Kolesnikov VA. Metodika Izucheniya Kornevoyo Sistemy Drevesnykh Rasteniy. [Methodology of Studying the Root System of Woody Plants. 2nd Edition]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1972. (In Russ.)
 27. Komin GE. [On the methodology of dendroclimatological studies]. Trudy Instituta Ekologii Rasteniy i Zhivotnykh Uralskogo Filiala AN SSSR. 1970;67:234-41. (In Russ.)
 28. Krasilnikov PK. [On the issue of methodology of root systems study of tree species in expeditionary geobotanical research]. Botanicheskiy Zhurnal. 1950;35(1):57-67. (In Russ.)
 29. Krasilnikov PK. [Classification of root systems of trees and shrubs]. Lesovedeniye. 1970;(3):35-44. (In Russ.)
 30. Krasilnikov PK. Metodika Polevogo Izucheniya Podzemnykh Chastey Rasteniy (s Uchetom Spetsifiki Resursovedcheskikh Issledovaniy). [Methodology of Field Study of Underground Parts of Plants (with Account for the Specifics of Resource Research)]. Leningrad: Nauka; 1983. (In Russ.)
 31. Kulagin AA, Zaytsev GA. Listvennitza Sukacheva v Ekstremalmykh Lesorastitelnykh Usloviyakh Yuzhnogo Urala. [Larch in Extreme Forest Conditions of the Southern Urals]. Moscow: Nauka; 2008. (In Russ.)
 32. Kucherov SE, Muldashev AA. [Features of radial increment of oak (*Quercus robur* L.) on the Karatau ridge (Southern Urals)]. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Geografiya Geoekologiya 2011;(1):95-6. (In Russ.)
 33. Kucherov SE. [Characteristic of radial growth of oak in forest plantations of Ufa]. In: Dendroekologiya: Tekhnogenez i Voprosy Lesovosstanovleniya. Ufa: Gilem; 1996. P. 65-79. (In Russ.)
 34. Kucherov SE, Muldashev AA. [Radial growth of pine in the area of the Karabash copper smelting plant]. Lesovedeniye. 2003;(2):43-9. (In Russ.)
 35. Lovelius NV. Izmenchivost' Prirosta Rasteniy. [Variability in Trees Increment]. Leningrad: Nauka; 1979. (In Russ.)
 36. Matveyev SM, Akulov VV. [Dynamics of pine (*Pinus sylvestris* L.) state along the suburban highways of Voronezh city in 1991–2007]. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2012;(364):212-8. (In Russ.)
 37. Musayev YeK. [Reaction of Increment and Structure of Annual Rings of Pine (*Pinus sylvestris* L.) to Radioactive Effects in the Chernobyl NPP Area (dissertation)]. Krasnoyarsk: Institut Lesa Imeni VN Sukacheva Sibirskogo Otdeleniya RAN; 1995. (In Russ.)
 38. Myulgauzen DS, Pankratova LA. [The effect of aerotechnogenic pollution on the radial increment of pine in the Kola North]. Vestnik Sankt-Petersburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta Nauki o Zemle. 2016;4:124-33. (In Russ.)
 39. Neverova OA. [Morphometric and dendrochronological diagnostics of the state of woody plantations as a method of indicating pollution of the urbanized environment]. Uspekhi Sovremennogo Yestestvoznaniya. Biologicheskiye Nauki. 2002;(1):57-64. (In Russ.)
 40. Nikolayeva SA, Savchuk DA. [Integrated approach and methodology for reconstruction of growth and development of trees and forest communities]. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Biologiya. 2009;(2):111-25. (In Russ.)
 41. Pasternak PS, Pristupa GK, Mazepa VG. [Effect of industrial emissions on pine radial increment]. Lesovod i Agrolesomeliator. 1985;(70):16-9. (In Russ.)

42. Pasternak PS, Molotkov PI, Kuchma ND, Podkur PP. [Forest and ecological consequences of pollution of forests by accidental emissions]. In: Chernobyl-88. Doklady 1 Vsesoyuznogo Nauchno-Tekhnicheskogo Soveshchaniya po Itogam Likvidatsii Posledstviy Avarii na Chernobylskoy AES. T. 3. CH. 2. Chernobyl; 1989. P. 36-60. (In Russ.)
43. Rybakov DS. [Biogeochemical assessment of ecological risk on the example of *Pinus sylvestris* L]. Printsipy Ekologii. 2016;(2):70-83. (In Russ.)
44. Seydafariyov RA. [Ecological and biological features of lime (*Tilia cordata* Mill.) in conditions of technogenic pollution exemplified with Ufa Industrial Center] (dissertation). Ufa: IB UNTS RAN; 2009. (In Russ.)
45. Skok AV. [Variability of Reproductive and Growth Processes of Pine in Various Zones of Chronic Radioactive Contamination of ChNPP of the Southern Non-Black Earth Region of the RF (dissertation)]. Bryansk: Bryanskiy Gosudarstvennyi Universitet Imeni Akademika IG Petrovskogo; 2005. (In Russ.)
46. Skotnikov DV. [Dendroecological Characteristic of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) inder Conditions of Petrochemical P in Ufa Industrial Center (dissertation)]. Ufa: IB UNTS RAN; 2007. (In Russ.)
47. Stravinskene VP. [Change in the radial increment of trees in the area of industrial pollution impact]. Lesnoye Khoziaystvo. 1987;(5):34-6. (In Russ.)
48. Tarankov VI, Matveyev SM. [Radial increment of pine tree stands in the area of industrial pollution impact]. Lesnoy Zhurnal. 1994;(4):48-51. (In Russ.)
49. Urazgildin RV, Polyakova GR, Amineva KZ, Galiakhmetov RD, Kulagin AYu. [The increment of trunk wood of pine, spruce and larch in conditions of industrial pollution]. Byulleten Moskovskogo Obshchestva Ispytateley Prirody Otdeleniye Biologicheskoye. 2018;123(2):45-61. (In Russ.)
50. Chzhan SA, Runova YeM, Puzanova OA, Chzhan LA. [Changes in radial increment of pine in zone of long-term impact of industrial pollution]. Khvoynye Borealnoy Zony. 2011;29(3-4):304-8. (In Russ.)
51. Chzhan SA, Puzanova OA, Cpzhan LA. [Change in radial increment of pine in zone of long-term impact of industrial pollution]. Aktualnyye Problemy Lesnogo Kompleksa. 2013;35:28-32. (In Russ.)
52. Shalyt MS. [Methodology for the study of morphology and ecology of underground parts of individual plants and plant communities]. In: Poleyaya Geobotanika. T. II. Moscow-Leningrad: Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR; 1960. P. 369-447. (In Russ.)
53. Shiyatov SG, Mazepa VS. [The influence of climatic factors on the radial increment of trees in the highlands of the Urals]. Problemy Ekologicheskogo Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem. 1992;(14):125-34. (In Russ.)
54. Shchetinkin SV, Shchetinkina NA. [Characteristics of dynamics of radial increment of oak under conditions of radioactive contamination of forests of the central forest-steppe]. Lesotekhnicheskii Zhurnal. 2014;(3):130-9. (In Russ.)
55. Yarmishko VT, Lyanguzova IV, Lyanguzov AYu. [Changes in the annual increment in *Pinus sylvestris* (Pinaceae) trunks upon a decrease in aerotechnogenic pollution]. Rastitelnye Resursy. 2017;(53):527-42. (In Russ.)
56. Yarmishko VT. [Methods of studying the underground parts of plants]. In: Metody Izucheniya Lesnykh Soobshchestv. Saint Petersburg: Izdatelstvo NIIKhimii SPbGU; 2002. P. 139-53. (In Russ.)
57. Yarmishko VT. Sosna Obyknovennaya i Atmosfernoye Zagriazneniye na Yevropeyskom Severe. [Pine and Atmospheric Pollution in the European North]. Saint Petersburg: Izdatelstvo NIIKhimii SPbGU; 1997. (In Russ.)
58. Yashin DA, Zaytsev GA, Ziyatdinova KZ, Urazgildin RV. [Characteristics of the structure of the root systems of birch under conditions of petrochemical pollution]. Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2012;14(1):1581-3. (In Russ.)
59. Albrechtová P, Mauer O, Gebauer R, Hurt V, Kacálek D. A comparative study of above- and below-ground parameters of healthy and declining young Norway spruce trees in a mountain area affected by air pollution. Scand J Forest Res. 2017;32:481-7.
60. Baker DE, Chesin L. Chemical monitoring of soil for environmental quality animal and health. Adv Agronomy. 1975;27:306-66.
61. Barley KP. Influence of soil strength on growth of roots. Soil Sci. 1963;(96):175-80.
62. Barniak J, Krąpiec M. The tree-ring method of estimation of the effect of industrial pollution on pine (*Pinus sylvestris* L.) tree stands in the northern part of the Sandomierz Basin (SE Poland). Water Air Soil Pollut. 2016;227(5):166.
63. Bauch J, Schroder W. Biological alterations in stem and root fir and spruce due to pollution influence. Forest Central Blatt. 1982;(1):195-206.
64. Bengtsson B. Influence of aluminium and nitrogen on uptake and distribution of minerals in beech roots (*Fagus sylvatica*). Vegetatio. 1992;(1):35-41.
65. Brunner I, Luster J, Günthardt-Goerg MS, Frey B. Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. Environ Pollut. 2008;152:559-68.

66. Carnol M, Cudlin P, Ineson P. Impacts of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) roots. *Water Air Soil Pollut.* 1999;(1-2):11-120.
67. Chandorkar KR, Demgler NG. Effect of low level continuous gamma irradiation on vascular cambium activity in scotch pine *Pinus sylvestris* L. *Environ Exp Bot.* 1987;27(2):165-75.
68. Cudlín P, Kieliszewska-Rojucka B, Rudawska M, Grebenc T, Alberton O, Lehto T, Bakker MR, Børja I, Konôpka B, Leski T. Fine roots and ectomycorrhizas as indicators of environmental change. *Plant Biosystems.* 2007;141:406-25.
69. Danek M. The influence of industry on Scots Pine stands in the south-eastern part of the Silesia-Krakow Upland (Poland) on the basis of dendrochronological analysis. *Water Air Soil Pollut.* 2007;185:265-77.
70. Duszyński F. The record of air pollution in tree rings. *Przegląd Geograficzny.* 2014;86(3):317-38.
71. Elling W, Dittmar C, Pfaffelmoser K, Rötzer T. Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. *Forest Ecol Manag.* 2009;257:1175-87.
72. Ferretti M, Innes JL, Jalkanen R, Saurer M, Schäffer J, Spiecker H, Von Wilpert K. Air pollution and environmental chemistry – what role for tree-ring studies? *Dendrochronologia.* 2002;20(1-2):159-74.
73. Godek M, Sobik M, Błaś M, Polkowska Ż, Owczarek P, Bokwa A. Tree rings as an indicator of atmospheric pollutant deposition to subalpine spruce forests in the Sudetes (Southern Poland). *Atmos Res.* 2015;151:259-68.
74. Goodman AM, Ennos AR. Responses of the root systems of sunflower and maize to unidirectional stem flexure. *Ann Bot.* 1998;(82):347-58.
75. Gorissen BA, Joosten NN, Jansen AE. Effects of ozone and ammonium sulphate on carbon partitioning to mycorrhizal roots of juvenile Douglas fir. *New Phytologist.* 1991;(1):243-50.
76. Helmisaari HS, Makkonen K, Olsson M, Viksna A, Mälikönen E. Fine-root growth, mortality and heavy metal concentrations in limed and fertilized *Pinus sylvestris* (L.) stands in the vicinity of a Cu-Ni smelter in SW Finland. *Plant Soil.* 1999;209:193-200.
77. Innes JL, Cook ER. Tree-ring analysis as an aid to evaluating the effects of pollution on tree growth. *Can J Forest Res.* 1989;19:1174-89.
78. Kahle H. Response of roots of trees to heavy metals. *Environ Exp Bot.* 1993;33:99-119.
79. Kuang YW, Sun FF, Wen DZ, Zhou GY, Zhao P. Tree-ring growth patterns of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) during the recent decades in the acidification Pearl River Delta of China. *Forest Ecol Manag.* 2008;255:3534-40.
80. Li P, Yin R, Shang B, Agathokleous E, Zhou H, Feng Z. Interactive effects of ozone exposure and nitrogen addition on tree root traits and biomass allocation pattern: An experimental case study and a literature meta-analysis. *Sci Tot Environ.* 2020;(710):136379.
81. Łuszczynska K, Wistuba M, Malik I. Reductions in tree-ring widths of silver fir (*Abies alba* Mill.) as an indicator of air pollution in southern Poland. *Environ Socio-Econ Stud.* 2018;6(3):44-51.
82. Lux A, Šottníková A, Opatrná J, Greger M. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. *Physiol Plantarum.* 2004;120:537-45.
83. Lux A, Martinka M, Vaculik M, White PJ. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review. *J Exp Bot.* 2011;62:21-37.
84. Malik I, Danek M, Marchwińska-Wyrwał E, Danek T, Wistuba M, Krapiec M. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) growth suppression and adverse effects on human health due to air pollution in the Upper Silesian Industrial District (USID), Southern Poland. *Water Air Soil Pollut.* 2012;223:3345-64.
85. Mauer O, Palátová E. The role of root system in silver birch (*Betula pendula* Roth.) dieback in the air-polluted area of Krusne Hory Mts. *J Forest Sci.* 2003;(5):191-9.
86. McLaughlin SB, Shortle WC, Smith KT. Dendroecological applications in air pollution and environmental chemistry: research needs. *Dendrochronologia.* 2002;20(1-2):133-57.
87. Murach D. Die reaktion der Feinwurzeln von Fichten (*Picea abies* (L.) H.Karst.) auf zunehmende Bodenversauerung. *Göttinger Bodenkundliche.* 1984;7:1-126.
88. Newman EI, Andrews RE. Uptake of phosphorus and potassium in relation to root growth and root density. *Plant Soil.* 1973;38(1):49-69.
89. Newman GS, Hart SC. Nutrient covariance between forest foliage and fine root. *Forest Ecol Manag.* 2006;(2-3):136-41.
90. Nováková T, Navrátil T, Demers JD, Roll M, Rohovec J. Contrasting tree ring Hg records in two conifer species: Multi-site evidence of species-specific radial translocation effects in Scots pine versus European larch. *Sci Tot Environ.* 2021;(762):144022.
91. Nyborg M, Crepin J, Hocking D, Baker J. Effect of sulphur dioxide on precipitation and on the sulphur content and acidity of soils in Alberta, Canada. In: *Proceedings of the first international*

- symposium on «Acid Precipitation and the Forest Ecosystem». Columbus: Ohio State University; 1975. P. 767-78.
92. Onderdonk JJ, Ketcheson JW. Effect of soil temperature on direction of corn root growth. *Plant Soil*. 1973;39(1):177-86.
 93. Paavilainen E. The effect of fertilisation on the root systems of swamp pine stands. *Folia Forest Polonica*. 1967;(31):1-9.
 94. 94. analysis of the growth and growth-climate relationships of conifers in the region of alkaline dust deposition. *Forest Ecol Manag*. 2011;(262):88-94.
 95. Perone A, Coccozza C, Cherubini P, Bachmann O, Guillong M, Lasserre B, Marchetti M, Tognetti R. Oak tree-rings record spatial-temporal pollution trends from different sources in Terni (Central Italy). *Environ Pollut*. 2018;233:278-89.
 96. Persson H, Majdi H. Effects of acid deposition on tree roots in Swedish forest stands. *Water Air Soil Pollut*. 1995;85:1287-92.
 97. Puhe J. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands – a review. *Forest Ecol Manag*. 2003;175:253-73.
 98. Rezeszki SR. Root responses of flood-tolerant and flood-sensitive tree species to soil redox conditions. *Trees*. 1991;5(3):180-6.
 99. Rutkiewicz P, Malik I. Spruce tree-ring reductions in relation to air pollution and human diseases a case study from Southern Poland. *Environ Socio-Econ Stud*. 2018;6(2):22-8.
 100. Safford LO. Seasonal variation in the growth and nutrient content of yellow-birch replacement roots. *Plant Soil*. 1976;44(2):439-44.
 101. Schekalev RV, Martynyuk AA, Melekhov VI. Variability Properties of *Pinus sylvestris* L. Wood in Growing Stock under Technogenic Impact. *Russ Forestry J*. 2020;(4):113-22.
 102. Scmitt U, Grunwald C, Eckstein D. Xylem structure in pine trees crown near the Chernobyl nuclear power plant. Ukraine. *IAWA J*. 2000;21(4):379-87.
 103. Sensuła B, Opała M, Wilczyński S, Pawełczyk S. Long- and short-term incremental response of *Pinus sylvestris* L. from industrial area nearby steelworks in Silesian Upland, Poland. *Dendrochronologia*. 2015;36:1-12.
 104. Sensuła B, Wilczyński S, Monin L, Allan M, Pazdur A, Fagel N. Variations of tree ring width and chemical composition of wood of pine growing in the area nearby chemical factories. *Geochronometria*. 2017;44:226-39.
 105. Skuterud L, Goltsova NI, Naeumann R, Sikkeland T, Lindmo T. Histological changes in *Pinus sylvestris* L. in the proximal-zone around the Chernobyl Power. *Plant Sci Environ*. 1994;157:387-97.
 106. Song YJ, Kim YD, Choi KR. Estimation of the effects of air pollutants on tree ring growth in black pines (*Pinus thunbergii*). *J Ecol Environ*. 2009;32(2):109-13.
 107. Stravinskiene V, Bartkevicius E, Plausinyte E. Dendrochronological research of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth in vicinity of industrial pollution. *Dendrochronologia*. 2013;31:179-86.
 108. Wallander H, Nylund JE. Effects of excess nitrogen on carbohydrate and mycorrhizal development of *Pinus sylvestris* L. seedlings. *New Phytologist*. 1991;(3):405-11.
 109. Wang J, Farooq TH, Aslam A, Shakoor A, Chen X, Yan W. Non-targeted metabolomics reveal the impact of phenanthrene stress on root exudates of ten urban greening tree species. *Environ Res*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110370>
 110. Warnaars BC, Eavis BW. Soil physical conditions affecting seedling root growth. *Plant Soil*. 1972;(36):613-22.
 111. Wertz B. Dendrochronological evaluation of the impact of industrial imissions on main coniferous species in the Kielce Upland. *Sylwan*. 2012;156(5):379-90.
 112. Woodwell GM, Miller LN. Chronic gamma radiation affects the distribution of radial increment in *Pinus rigida* stems. *Science*. 1963;139:222-3.

ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ.

ЧАСТЬ 4. ВЛИЯНИЕ НА ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВЫРАБОТКУ АДАПТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ ДРЕВОСТОЕВ

Р.В. Уразгильдин*, А.Ю. Кулагин

Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение ФБГНУ Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Уфа, Россия

* Эл. почта: urv@anrb.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2021; принята к печати 18.08.2021

Четвертый из серии обзоров посвящен влиянию различных типов промышленного загрязнения на жизненное состояние древостоев и вопросам определения адаптивных стратегий древесных видов к техногенезу. Рассмотрены современные методические подходы к оценке жизненного состояния древостоев, выделены наиболее перспективные из них. Показано однозначное ухудшение жизненного состояния древостоев вне зависимости от древесного вида и типа загрязнения, однако степень ухудшения во многом зависит от древесного вида и типа загрязнения. Рассмотрены вопросы устойчивости биосистем к техногенезу, в основе которой лежат адаптивные реакции, протекающие на всех уровнях организации живого – от цитогенетического до экосистемного. Показано развитие теории адаптивных стратегий растений начиная с эколого-ценотических стратегий Раменского-Грайма. Отдельно рассмотрены адаптивные реакции, характеризующие металлоустойчивость растений. Промышленное загрязнение как новый для растений в историческом плане фактор вызывает необходимость разработки вопросов, связанных с адаптивными стратегиями видов к техногенезу, в основе которых лежат адаптивный потенциал, изменчивость, устойчивость и экологическая пластичность видов. Предложен авторский подход к определению и выявлению стратегий адаптации к техногенным факторам, основанный на анализе современных работ в этой области и материалов собственных многолетних исследований.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, жизненное состояние древостоев, адаптивные реакции, адаптивные стратегии.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF ARBOREAL PLANTS TO ANTHROPOGENIC FACTORS: DAMAGES, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 4. IMPACT ON THE CONDITIONS AND THE DEVELOPMENT OF ADAPTIVE STRATEGIES OF FORESTS

R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin

Ufa Institute of Biology at Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

E-mail: urv@anrb.ru

The present publication is the fourth in the series of reviews of reports addressing the impacts of different kinds of industrial pollution on the vital conditions of tree stands and the issues of determining the adaptive strategies of arboreal species to anthropogenic factors. The present-day methodological approaches to assessing the vital conditions of tree stands are considered and the most promising of them are distinguished. The deterioration of the vital conditions of tree stands has been shown to occur unequivocally irrespective of tree species and pollution type; however, the degree of deterioration is largely species and pollution specific. Tree tolerance to anthropogenic factors is based on adaptive responses at all levels of biological organization from cytogenetic to ecosystemic. The development of theories of the adaptive strategies of trees is traced starting from the Ramensky-Grime concept of phytocenotypes. A special attention in the present publication is paid to responses related to tree tolerance to metals. The industrial pollution is a novel type of stress for plants, and their responses to it are possible within the limits determined by the adaptive potential of plants developed based on species-specific adaptive strategies, including variability, stability and ecological plasticity. An original approach to determining the adaptive strategies of trees to anthropogenic factors is proposed based on current literature and original studies.

Keywords: industrial pollution, vital conditions of tree stands, adaptive responses, adaptive strategies.

Введение

Жизненное состояние древостоев в условиях техногенеза

Жизненное состояние (ЖС) дерева и всего древостоя – наиболее комплексный показатель, позволяющий судить о влиянии условий произрастания на жизнедеятельность растительного организма и функционирование всего древостоя. Воздействие атмосферного загрязнения – сложное биологическое явление, затрагивающее в первую очередь метаболические и физиологические процессы. Степень поврежденности растения определяется прежде всего двумя факторами – концентрацией токсичного вещества и длительностью его воздействия. В настоящее время имеются разнообразные методы, позволяющие сделать вывод о состоянии дерева или отдельных его частей в условиях городской среды. Из всех методик наиболее удачными как в теоретическом, так и в прикладном отношении представляются те, которые основаны на визуальной оценке различных диагностических признаков ЖС дерева. Существуют часто применяемые шкалы оценки, позволяющие оценить ЖС деревьев и насаждений по внешним признакам [1, 3, 5, 8, 16, 23, 30, 33, 39, 46, 61].

Наиболее чувствительным и, как следствие, экологически информативным органом растительного организма является лист, отражающий влияние изменчивых условий окружающей среды больше, чем какой бы то ни было другой орган [13, 14, 38]. Наличие хлорозов и некрозов на листьях и хвоинках деревьев является важным диагностическим признаком повреждения растений атмосферным загрязнением. Вследствие появления хлорозов и некрозов в результате действия других факторов (недостатка или избытка питательных веществ почвы, высоких и низких температур, засухи, подтопления корневых систем, в результате действия энтомовредителей и различных патогенов) этот признак может быть недостаточно специфичным [2, 14, 38, 40, 47]. Действие минеральных водорастворимых солей на растения нередко вызывает локальные ожоги на листьях, а при длительном воздействии – ослабление и гибель растений [23].

Наиболее важным информативным признаком служит состояние крон. В городе деревья имеют редкую или сильно изреженную крону, наблюдается увеличение доли световых листьев в кроне. По признакам состояния крон разработаны региональные критерии оценки состояния деревьев, позволяющие выявить насаждения с нарушенной устойчивостью до появления процессов усыхания [12, 26, 30, 53, 60].

Адаптации древостоев в условиях техногенеза

Известно, что каждая биологическая система в условиях изменяющейся окружающей среды стремится

к «устойчивости», «стабильности», «упругости» и «надежности». Устойчивость – это внутренне присущая системе способность выдерживать изменение, вызванное извне, или восстанавливаться после него [45]. Стабильность – способность системы не только сопротивляться изменениям среды, но и восстанавливаться после них. Упругость определяется как скорость, с которой нарушенная система возвращается к состоянию равновесия [34]. Надежность – способность организма или его отдельных систем сохранять потенции к функционированию на протяжении полного жизненного цикла, а также сохранение системы, несмотря на гибель ее элементов, с помощью их замены, дублирования и др. [17, 59]. Ключевым процессом при реализации всех четырех свойств биосистем является адаптация растений к внешним стрессам.

Адаптивная реакция организма – процесс приспособления организма и его функций к меняющимся условиям среды. Современные представления о нем основаны на развитии идей Ж.Б. Ламарка, Ч.Р. Дарвина, Э. Геккеля, У. Кэннона, К. Барнара, Г. Селье, И.П. Павлова, А.Д. Сперанского, М.К. Петровой, К.М. Быкова, И.М. Сеченова, А.А. Ухтомского, Н.Е. Введенского, Л.А. Орбели и др. Адаптивная реакция организма определяется врожденной и приобретенной приспособительными реакциями организмов на клеточном, органном, системном и организменном уровнях. Общий принцип адаптации растений к стрессам заключается в повышении устойчивости растений к фитотоксикантам согласно общей теории устойчивости (значительный вклад в разработку теории внесли В. Крокер, Н.П. Красинский, Е.И. Князева, М.Д. Томас, Ю.З. Кулагин, Г.М. Илькун, В.С. Николаевский и др.). Если бы на влияние каждого фактора растение отвечало специфической адаптацией, то это привело бы живую систему к такой избыточности и перегрузке различными морфофизиологическими структурами, которые были бы несовместимы с жизнью [19]. В процессе приспособления включаются те потенциальные свойства, которые можно представить в форме пост-адаптаций и пре-адаптаций [30]. Вследствие того, что защитно-приспособительные возможности растений не могут развиваться с той быстротой, с которой наблюдается в последнее время загрязнение атмосферы, их устойчивость в условиях индустриальной среды будет определяться их способностью использовать в первую очередь уже имеющиеся механизмы адаптации к экстремальным факторам среды. Значительная роль принадлежит и пост-адаптациям, то есть возможности организмов вновь использовать бывшие адаптивные признаки, составляющие резерв приспособляемости к изменениям среды [52]. Аллелопатическая толерантность растительных сообществ, возникшая в постоянно насыщенном разнообразными химическими соединениями воздухе, может быть

непосредственной причиной повышения выносливости в условиях промышленного загрязнения. При этом растения, оказавшись в условиях загрязненной химическими веществами атмосферы, страдают не только от нового для них качественного состава химических агентов, сколько, вероятно, от их количества. Направленный отбор форм, отличающихся повышенной устойчивостью как к природным фитонцидам в естественных биоценозах, так и к техногенным химическим выбросам в условиях промышленного загрязнения окружающей среды, – это основной путь повышения хемотолерантности растений [36].

I. Влияние техногенеза на жизненное состояние древостоев

При оценке ЖС древостоев важным моментом является выбор методического аппарата, соответствующего задачам исследования.

Методика, разработанная сотрудниками Ботанического института им. В.Л. Комарова, предполагает выделение пяти категорий деревьев – «здоровое», «поврежденное», «сильно поврежденное», «отмирающее» и «сухостой» на основании обследования внешних признаков повреждений кроны и ствола, степени развития и повреждения лишайникового покрова на стволах деревьев, локализации мертвых и отмирающих ветвей, цвета сформированных листьев, повреждений листвы и хвои [61].

Одним из наиболее распространенных подходов к оценке влияния загрязнения атмосферного воздуха на лесные экосистемы является характеристика санитарного состояния насаждений с оценкой категорий состояния деревьев по следующей шкале: здоровое (без признаков ослабления), ослабленное (в начальной стадии воздействия неблагоприятных факторов и имеющее признаки угнетения по сравнению со здоровыми деревьями), сильно ослабленное (в активной стадии повреждения неблагоприятными факторами с явно выраженными признаками ухудшения состояния), усыхающее (поврежденное в сильной степени с высокой вероятностью усыхания в текущем или следующем вегетационном периоде), свежий сухостой (усохшее в течение текущего или предыдущего вегетационного периода), погибшее (сухостой, валежник), бурелом (со сломом ствола ниже одной трети протяженности кроны, считая от вершины), ветровал (поваленные или наклоненные деревья с обрывом более трети корней) [15].

Широко распространена шкала В.С. Николаевско-го [39], согласно которой ЖС оценивается визуально (по десятибалльной шкале) по степени повреждения и состоянию ассимиляционного аппарата и крон растений. При этом учитывается: количество живых ветвей в кронах деревьев, степень облиственности (охвоенности) крон, количество живых (без некрозов) листьев (хвои) в кронах, средняя живая площадь листа (хвои).

В итоге ЖС дерева может быть охарактеризовано как хорошее, удовлетворительное, неудовлетворительное и усыхающее.

Некоторые авторы указывают на перспективность использования комплексного подхода с изучением сезонной динамики содержания токсикантов в почве и древесных растениях на разном удалении от источников выбросов для установления взаимосвязи между аккумуляцией токсикантов в почве и растениях и их ЖС [13, 22–24, 30]. Рекомендуется также использование обобщенной функции желательности Харрингтона (преобразование значений, показателей или свойств, полученных в различных единицах измерения, в безразмерную шкалу желательности), совокупности биометрических показателей деревьев и физиолого-биофизических характеристик тканей деревьев [25].

Одной из наиболее удачных и часто применяемых сегодня в практике лесоведения является методика В.А. Алексеева и соавт. [3], основанная на процентной оценке таких признаков каждого дерева, как густота кроны, очищенность ствола от мертвых сучьев и степень повреждения листьев (хлорозы, некрозы, объедания, повреждения фитопатогенами и т. д.). На основании этих признаков деревья в древостое распределяются на здоровые, ослабленные, сильно ослабленные, отмирающие, и по каждой категории вычисляется запас древостоя и дополнительно запас сухостоя. По соотношению запасов вычисляется итоговый коэффициент ЖС древостоя (L_v), по которому насаждение может быть классифицировано как здоровое ($L_v = 100-80\%$), ослабленное ($L_v = 79-50\%$), сильно ослабленное ($L_v = 49-20\%$), полностью разрушенное ($L_v = 19\%$ и ниже).

В то же время визуальные методы оценки имеют и свои очевидные недостатки. Главнейшим из них является относительный характер полученных результатов. Поэтому при описании ЖС отдельного дерева или древостоя методами визуальной оценки к словосочетанию «жизненное состояние» обязательно необходимо прибавлять слово «относительное». При выборе методики оценки ЖС необходимо учитывать, что растения, произрастающая в городской среде, испытывают стресс, который приводит к изменениям, прежде всего, ассимиляционного аппарата как наиболее чувствительного к условиям произрастания и как непосредственного контактируемого органа с токсикантами. Вне зависимости от характера применяемой к оценке ЖС методики большинство авторов указывает на ту или иную степень дигрессии насаждений в условиях урбанизированной техногенной среды [9, 12, 14, 23, 30, 38, 39, 47, 51, 53].

Результаты различных исследований свидетельствуют в основном об ухудшении ЖС древостоев промышленных центров на фоне контрольных данных.

В 2001 году 22,4% Европейских лесов были классифицированы как имеющие дефолиацию более 25%, депигментация и потемнение были редкими (7,6% наблюдаемых деревьев), а у 43–55% деревьев повреждения привели к их полному упадку. Насекомые являлись наиболее часто наблюдаемым повреждающим агентом (9,9%), атмосферное загрязнение оценивалось как причина повреждения 2,4% деревьев. По сравнению с предыдущими годами исследований дефолиация 2001 года значительно возросла на 13% участков и значительно снизилась на 8,1%, а на 78,9% участков дефолиация осталась неизменной [91]. Несмотря на региональные различия в европейском масштабе, за 10 лет мониторинга (1986–1996) было выявлено ухудшение состояния лесов для многих наиболее часто встречающихся видов деревьев, однако никакие очевидные тенденции не обнаружены для сосны *Pinus silvestris* L., ели *Picea abies* (L.) Karst., бука *Fagus sylvatica* L., дубов *Quercus petraea* L. и *Q. robur* L., а виды *Pinus pinaster* Ait., *Quercus ilex* L. и *Q. rotundifolia* Lam. напротив показали заметное улучшение [97]. Попытка формального сопоставления представленных выше данных 1986–1996 и 1994–2001 годов показала, что на большинстве участков дефолиация осталась неизменной [91, 98]. Загрязнение воздуха считается наиболее важным антропогенным фактором, влияющим на леса центральной и восточной Европы. Оценка состояния лесов в Австрии показала, что они находятся в гораздо лучшем состоянии, чем в Карпатском горном районе (от Словакии до Румынии и в западной части Украины). Данные по ели норвежской (Австрия, Словакия, Румыния), сосне шотландской (Словакия), буку и дубам сидячему и европейскому (Словакия и Румыния) свидетельствуют, что у большинства видов тенденции несущественные, однако у ели норвежской в южной части Австрии и в южной/западной части Карпат отмечались случаи значительного повышения уровня дефолиации, а для бука значительный рост дефолиации отмечен только в Румынии [91, 98, 112].

Снижение загрязнения воздуха по N до 20–50 кг/га в год и по S до 10–15 кг/га в год в районе завода по производству азотных удобрений в Литве (основные загрязнители NO_x , NH_3 , SO_2 и минеральная пыль) сразу повлекло восстановление ЖС поврежденных сосновых древостоев, особенно молодых (5–7 лет). Однако состояние старых поврежденных древостоев норвежской ели ухудшилось из-за последовавших вспышек размножения короеда-типографа *Ips typographus*. Загрязнение лесных почв также уменьшилось с уменьшением загрязнения воздуха, однако их подкисление продолжается [64].

В 1980–2011 годах в горах Крконошского национального парка (Чехия) оценивалось изменение состояния здоровья деревьев ели (*Picea abies* [L.] Karst) на основе степени дефолиации (классифицированной

на 6 уровней) на 6 исследованных участках в условиях загрязнения воздуха (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+). На всех участках с 1994 года общий объем осадения сульфатов значительно сократился с 50–80 до 8–13 кг/га в год, однако какой-либо четкой тенденции в изменении объемов осадения азота не было. Доля здоровых деревьев была очень мала на всех участках и постоянно снижалась в течение периода наблюдения, достигнув к концу на большинстве участков полного отсутствия. Доля слегка поврежденных деревьев снизилась в первые 10 лет с 54,7 до 14,7% и оставалась постоянной в течение последних 20 лет. Доля сильно поврежденных деревьев за 5 лет резко возросла с 26,1 до 50,4% и к концу исследований постепенно уменьшалась до 13,5%. Точно так же доля очень сильно поврежденных деревьев за 6 лет выросла с первоначальных 7,6 до 22,7%, а затем снизилась до 2,2%. Доля чрезвычайно сильно поврежденных деревьев достигла максимума за 7 лет (8,2%) и с тех пор постоянно снижалась до нынешних 0,5%. Доля мертвых деревьев за 30 лет возросла с 0,0 до 65,8% (на отдельных участках от 40,7 до 100%). Средняя дефолиация «живых» и «всех» деревьев автохтонных древостоев составляла 32 и 63% соответственно, а аллохтонных древостоев – 91,5 и 97,6% соответственно. Связь между дефолиацией «живых деревьев» и атмосферным осадением как серы, так и азота отсутствовала. Связь между дефолиацией «всех деревьев» и атмосферным осадением азота отсутствовала, однако существовала отрицательная взаимосвязь с осадением серы [115].

Северо-западная часть Чешской Республики известна как сильно загрязненный район. Загрязнение SO_2 , а также температуры и осадки сравнивались с данными дефолиации и жизнеспособности хвойных и лиственных древесных видов, полученными со спутниковых снимков участков мониторинга в трех регионах: Рудные горы, Соколовский бассейн, Славковский лес. Дефолиация хвойных пород в Рудных горах сильно коррелировала с концентрациями зимнего SO_2 и зимними температурами. В регионах Соколовский бассейн и Славковский лес ЖС лиственных древостоев существенно связано с летними температурами. Результаты показывают снижение значения SO_2 как причины ухудшения состояния лесов в 1990-е годы [110].

В Средиземноморских лесных экосистемах дубняков *Quercus pubescens*, *Q. ilex* и сосняков *Pinus halepensis* и *P. nigra* восточного Адриатического побережья оценена жизнеспособность деревьев по соотношению к атмосферному осадению (N, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl), содержанию питательных веществ в листе/хвое (N, P, K, Ca, Mg), дефолиации листьев/хвои и росту базальной площади ствола. Результаты показали, что осадочные концентрации элементов были самыми низкими в сосновых, а самыми высокими – в дубовых лесах, однако это не оказало

влияния на концентрации N в листе/хвое, а концентрации элементов находились в оптимальном диапазоне (за исключением высоких концентраций Ca, что отражает химию кальциевых почв региона). Никакие различия в интенсивности дефолиации между древостоями не обнаружены, но участки с более низким приращением базальной площади имеют более низкую дефолиацию. Сделать какой-либо вывод о взаимосвязи N-осаждения и роста деревьев пока не представляется возможным [80].

Проведена оценка относительного ЖС насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березы повислой (*Betula pendula* Roth) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях загрязнения Липецкого промышленного центра, где основным стационарным источником загрязнения атмосферного воздуха является Новолипецкий металлургический комбинат. В условиях загрязнения все древостои отнесены к категории «ослабленные» (сосна Lv = 70%, береза Lv = 71%, дуб Lv = 75%), в контроле – к категории «здоровые» (Lv = 85–86%). Основными диагностическими признаками, определяющими ЖС деревьев, являлись слабая степень развития кроны и повреждения хвои и листьев. У березы сильно разреженные кроны (60–65% нормы), отмечается суховершинность. У сосны отмечались значительные повреждения хвои (до 45%), представленные хлорозами и краевыми некрозами, повреждения листьев березы и дуба (до 15–20%) представлены межжилковыми хлорозами. Степень повреждения листьев дуба незначительна (до 15%), по большей части это межжилковые хлорозы. Деревья сосны характеризовались слабой очищенностью (до 45%) от мертвых сучьев [21].

Исследование состояния древостоев в условиях нефтехимического загрязнения Уфимского промышленного центра показало, что ЖС тополя дрожащего на водораздельном плато и в пойме оценивалось как «здоровое» (Lv = 89,6–100%), деревья характеризовались хорошо сформированной кроной, слабой поврежденностью листьев, хорошей очищенностью стволов от мертвых сучьев. ЖС древостоев тополя черного на водораздельном плато характеризовалось как «ослабленное» и «сильно ослабленное» (Lv = 53,9–42%), а в пойме – как «здоровое» (Lv = 90–98,5%). Основными диагностическими признаками ухудшения ЖС были снижение густоты кроны и ухудшение очищенности стволов от мертвых сучьев. ЖС древостоев тополя бальзамического на водораздельном плато и в пойме оценено как «сильно ослабленное» (Lv = 31,1–57,6%), деревья характеризовались слабо развитой кроной, плохой очищенностью от мертвых сучьев и сильным поражением листьев (чаще всего фитопатогенами). Сравнение тополей выявило такой ряд ухудшения их ЖС: тополь дрожащий > тополь черный > тополь

бальзамический. ЖС древостоев тополей зависело от положения в рельефе: в условиях поймы оно в целом лучше, чем на водораздельном плато, что связано с более благоприятными условиями произрастания [57]. В отличие от тополей, у ивы белой и клена остролистного ЖС в условиях Уфимского промышленного центра оценивается как «здоровое» (ива Lv = 100%, клен Lv = 88–98,5%), причем у ивы оно было значительно лучше, чем в контроле, что является очень важным в плане оценки возможности ее использования для создания санитарно-защитных насаждений в крупных промышленных центрах нефтехимического профиля. Наиболее чувствительными диагностическими признаками ивы и клена являлись наличие мертвых сучьев на стволе и густота кроны, наименее чувствительным являлось повреждение листьев. Однако у ивы при усилении загрязнения уменьшалось наличие мертвых сучьев на стволе и увеличивалась густота кроны, а у клена густота кроны снижалась, а количество мертвых сучьев увеличивалось. Повреждение листьев у обеих пород не превышало 5%, усыхания деревьев не происходило [6, 10]. Нефтехимическое загрязнение вызывало значительное снижение ЖС древостоев сосны (Lv = 44,8%), лиственницы (Lv = 48,1%) и дуба (Lv = 48,8%), у которых оно оценивалось как «сильно ослабленное». Менее значительное снижение ЖС древостоев наблюдалось у ели (Lv = 67,1%), липы (Lv = 54,2%) и березы (Lv = 79%), у которых оно оценивалось как «ослабленное». Для лиственницы, ели и березы основным диагностическим признаком ухудшения ЖС древостоя являлось снижение густоты кроны, остальные были менее значимыми, но у лиственницы наличие мертвых сучьев в кроне являлось вторым по значимости диагностическим признаком. Для сосны, дуба и липы все рассматриваемые диагностические признаки ухудшения ЖС древостоя являлись практически равнозначными, при этом снижение густоты кроны первично для липы, наличие мертвых сучьев в кроне первично для дуба, а повреждение хвои первично для сосны. В целом, менее всего подвержено ухудшению состояние хвои и листьев, более всего – густота кроны, а мертвые сучья в кроне занимали промежуточное положение. В контроле все древостои отнесены к категории «здоровые», диагностические признаки ухудшения состояния незначительны. По степени ухудшения ЖС в условиях загрязнения относительно контроля древесные виды образуют такой ряд снижения: береза > ель > липа > лиственница > дуб > сосна [4, 7, 20, 32, 48, 50].

В условиях загрязнения Стерлитамакского промышленного центра (полиметаллический тип загрязнения) ЖС древостоев лиственницы Сукачева оценено как «ослабленное» (Lv = 74,0%), наблюдалась плохая очищенность стволов от мертвых сучьев (в кроне присутствует 15–35% мертвых сучьев) и пониженная густота

кроны (70–85% нормы), повреждение хвои составляли 10–20% общей площади. В контроле ЖС лиственницы оценено как «здоровое» ($L_v = 89,5\%$), деревья имели хорошо сформированные кроны, очищенность ствола от мертвых сучьев хорошая, степень повреждения хвои не превышала 10% ее площади. ЖС древостоев тополя бальзамического «сильно ослабленное» ($L_v = 44,5\%$), причем прогноз свидетельствует о дальнейшем его ухудшении по мере накопления токсикантов. В контроле их состояние оценено как «ослабленное» ($L_v = 67,0\%$). Основным диагностическим признаком ухудшения состояния в промзоне являлось снижение густоты кроны (с 53–60 до 20–40%). Очищенность от мертвых ветвей и повреждение листьев как в условиях загрязнения, так и в контроле находились приблизительно на одинаковом уровне (40–55 и 20–40% соответственно), однако количество сухостоя в условиях загрязнения значительно превосходило контрольные условия. Наилучшим ЖС в условиях Стерлитамакского промышленного центра характеризовались древостои березы повислой – оценены как «здоровые» и в условиях загрязнения, и в контроле ($L_v = 90\%$ в обоих случаях). Значимые диагностические признаки ухудшения состояния березы отсутствовали, деревья характеризовались хорошо сформированной кроной (75–85%), отсутствием значительного поражения листьев (не более 5–15%) и хорошей очищенностью ствола от мертвых сучьев (0–15%). Сравнение древостоев выявило такой ряд ухудшения их ЖС: береза повислая > лиственница Сукачева > тополь бальзамический [29, 32].

По ЖС насаждения сосны и березы на отвалах Кумертауского бурогольного разреза в целом отнесены к категории «здоровые», однако у сосны на отвалах коэффициент ЖС ухудшался относительно контроля, а у березы, напротив, коэффициент ЖС на отвалах значительно возрастал относительно контроля. На отвалах Учалинского горно-обогатительного комбината насаждения сосны и березы также отнесены к категории «здоровые», однако у обоих видов на отвалах коэффициент ЖС очень слабо отличался относительно контрольных показателей, но в целом у березы он значительно выше, чем у сосны. Также следует отметить, что в условиях Учалинского горно-обогатительного комбината ЖС сосны и березы в целом значительно лучше, чем в условиях Кумертауского бурогольного разреза. Состояние древесной растительности на отвалах месторождений свидетельствует о потенциальной лесопригодности вскрышных и вмещающих пород и отсутствии фитотоксичности грунтов [43]. В отличие от лиственных древесных видов древости лиственницы Сукачева на отвалах Кумертауского бурогольного разреза отнесены по ЖС к категории «ослабленные», близкой к «сильно ослабленные». Отмечено сильное повреждение ассимиляционного ап-

парата (до 80% площади хвои хлорозные и некротические пятна), наблюдался преждевременный опад хвои, густота кроны не превышала 50%, однако очищенность стволов от мертвых сучьев хорошая (до 15%). В контроле ЖС лиственницы оценено как «здоровое», причем коэффициент ЖС значительно превосходил таковой на отвалах (85,0 и 55% соответственно), стволы хорошо очищались от мертвых сучьев (3–5% мертвых сучьев в кроне), степень повреждения хвои не превышала 5%, однако деревья имели плохо сформированные кроны (всего 50–60% нормы) [32].

В городе Кемерово (основные загрязнители – диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода и взвешенные вещества от промышленных предприятий, теплоэнергетики и автотранспорта) наблюдалось ухудшение ЖС деревьев: снижались доля живых ветвей в кроне, степень облиственности, доля живых листьев в кроне, доля живой площади листа. Угнетение древесных растений в большей степени выражено в примагистральных посадках и в районах с высокой техногенной нагрузкой. Наиболее угнетены липа (ЖС ухудшалось в среднем по городу на 16% в скверах и на 19% в примагистральных посадках) и сирень (на 13 и 15% соответственно). Установлена прямая корреляционная связь между ЖС древесных растений и интенсивностью фотосинтеза, а также между ЖС и комплексным показателем загрязнения атмосферы [28].

На основе морфологических параметров (степень дефолиации крон, пожелтение хвои, количество шишек, прирост побегов разного возраста, форма кроны) оценено ЖС лесных культур сосны обыкновенной в пригородной зоне г. Усть-Илимска, где основными загрязняющими веществами, выбрасываемыми в окружающую среду от Усть-Илимского лесопромышленного комплекса, являются диоксид серы, сероводород, диоксид азота, оксид углерода, сероводород, нефтепродукты, фенол, лигнин, скипидар, формальдегид, диметилсульфид, метилмеркаптан, метанол, таловое масло. Показано, что деревья в условиях загрязнения находились в ослабленном состоянии, наблюдалось снижение длины, массы и срока жизни хвои, отмечалось появление точечных и апикальных некрозов, снижался прирост побегов, прирост деревьев в высоту и по диаметру [27].

II. Адаптивные реакции и стратегии растений к техногенезу

АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ

Каждая биосистема для существования в природе должна противопоставить воздействию внешней среды достаточное разнообразие соответствующих реакций. Принцип множественного обеспечения биологически необходимых функций является чрезвычайно важным для увеличения уровня гомеостаза [35]. Чем

большее число механизмов адаптации используется растением одновременно на самых разных уровнях, тем более устойчив организм к действию токсических ингредиентов [51]. Стресс не обязательно негативен для деревьев, но может вместо этого вызвать повышенную устойчивость к этому же и другим стрессам. Кратковременная стрессовая реакция может не совпадать с длительным изменением ЖС деревьев, поэтому изменения должны интерпретироваться с учетом их долгосрочных последствий [84].

Адаптивные реакции, возникающие в ответ на действие факторов окружающей среды, характеризуют изменчивость метаболизма и устойчивость растений в экстремальных условиях. Адаптационные процессы протекают на всех уровнях организации живого – от цитогенетического до экосистемного. На уровне организма механизмы адаптации, свойственные клетке, дополняются новыми, отражающими взаимодействие органов в целом растении. В процессе жизнедеятельности биометрические параметры испытывают колебания, определяемые как внутренними, так и внешними факторами. Регуляторные гомеостатические механизмы обеспечивают низкий уровень этих колебаний. При воздействиях, превышающих границы толерантной зоны, в биосистеме развивается комплекс физиологических и биохимических изменений. Комплекс изменений, происходящих в живой системе, отражает ее переход из состояния, поддерживаемого гомеостатическими механизмами, в новое квазистационарное стрессовое состояние. Биотипическая, возрастная и модификационная неоднородность популяций выступает в качестве адаптивного полиморфизма на разных уровнях организации. Важнейшими механизмами являются изменения популяционной структуры вида, в результате которых большее представительство в популяции приобретают особи, обладающие наибольшей резистентностью к действию конкретного токсического фактора [11, 30, 41].

Вопросам изучения адаптаций растений, в том числе и древесных, к техногенному загрязнению посвящена обширная литература. Выделен целый комплекс адаптаций к техногенным воздействиям – от биохимических, клеточных, анатомических до экосистемных [30]. Как правило, исследователи изучают адаптации растительных организмов на каком-то одном, наиболее интересующем исследователя структурно-функциональном уровне иерархии растительного организма. Обычно отдельно рассматриваются морфологические, или физиологические, или анатомические и т. д. изменения листа.

Древесные растения имеют специальные механизмы для преодоления повреждений, вызванных стрессами окружающей среды. Но ситуация осложняется, когда возникают множественные стрессы. Механизмы, действующие против одного фактора стресса, не

обязательно аналогичны механизмам противодействия множественным стрессам. Реакция растения может отличаться, когда два или более стресса возникают последовательно или одновременно [65]. Биотические и абиотические стрессы влияют на рост, развитие и продуктивность растений. Чтобы справиться с этими стрессами, растение «разрабатывает» определенные эффективные стратегии, которые позволяют им адаптироваться – избегать или переносить стрессы. Такие стратегии адаптации реализуются на морфологическом, анатомическом, биохимическом и молекулярном уровнях. Эпигенетическая память, инактивация активных форм кислорода, накопление растительных гормонов, изменение окислительно-восстановительного статуса и неорганических ионных потоков, системная приобретенная устойчивость являются некоторыми из модификаций/механизмов, используемых растениями для адаптации и защиты от стрессов окружающей среды. «Омиксные» технологии позволяют выявить генетические факторы в основе стрессовой реакции и адаптации растений, которые могут быть использованы для исследования сложного метаболического взаимодействия между растениями и стрессовой средой [73].

При воздействии экологических стрессов древесные растения должны перераспределять энергию таким образом, чтобы обеспечить адаптацию к стрессу, но также поддерживать рост и производительность. Для достижения этих жизненно важных целей растение реагирует изменением многих метаболических процессов, контролирующих фотосинтез, ионный гомеостаз и сигнальные функции гормонов растений, которые могут изменять экспрессию генов. Эти реакции обычно проявляются как на фенотипическом, так и на генотипическом уровнях [108].

Долгосрочное воздействие загрязнителей воздуха ведет к увеличению накопления фенольных соединений в эпидермисе, в ассимиляционных клетках мезофилла (как в палисадной, так и в губчатой паренхиме) и в тканях сосудов. Усиленное накопление фенолов и лигнина считается одной из наиболее распространенных реакций растений на стресс [74, 117].

Анализ литературных данных, посвященных адаптациям растений к техногенезу, позволил выделить ряд наиболее общих адаптивных реакций на усиленные степени промышленного загрязнения, принятых в дендрозкологии как «классические»: усиление ксероморфности хвои/листа (уменьшение макроморфологических при увеличении микроморфологических параметров); подавление водного обмена хвои/листа (уменьшение интенсивности транспирации и дефицита водного насыщения, увеличение относительного содержания воды в листе); подавление фотосинтеза через пигментную систему (уменьшение содержания хлорофилла *a* при компенсаторном увеличении хло-

рофилла *b* и каротиноидов, уменьшение соотношения «Хл. *a*/Хл. *b*» и увеличение соотношения «(Хл. *a* + Хл. *b*)/Каротиноиды»; уменьшение корненаасыщенности почвы и ограничение переноса токсикантов от корней к побегам; снижение годичного радиального прироста стволовой древесины; снижение габитуальных параметров дерева (уменьшение густоты кроны, увеличение повреждения хвои/листьев, появление в кроне сухих ветвей); ухудшение ЖС древостоев; сокращение длительности онтогенетических периодов и более раннее наступление старения древостоев и др.

Обширная литература посвящена адаптивным реакциям растений к тяжелым металлам. Некоторые растения толерантны к металлам благодаря либо их отторжению, либо их накоплению в старых листьях. Некоторые растения (гипераккумуляторы) переносят до четырехкратно более высокие концентрации металлов, включая алюминий, кадмий, медь, свинец, никель и цинк, чем могут вынести обычные растения [78]. Высокая толерантность к токсичности тяжелых металлов может основываться либо на снижении их поглощения, либо на увеличении их внутреннего связывания. Возможны связывание тяжелых металлов с клеточной стенкой, их иммобилизация, отторжение плазматической мембраной, удаление, связывание внутри вакуоли, уменьшение переноса, комплексообразование, хелатирование, компартментализация, а также активация механизмов стрессового ответа, таких как индукция стрессовых белков. Преобладающим механизмом толерантности и детоксикации является хелатирование металла внутриклеточными комплексообразователями, такими как органические кислоты, глутатион и другие цистеин-содержащие молекулы [67–69, 79, 85, 87, 95, 103, 105, 109].

В условиях стресса, вызванного металлами, в растительных клетках повышается продукция активных форм кислорода. Для противодействия им растения имеют эффективную систему ферментативных и неферментативных антиоксидантов, которая может регулироваться в соответствии с условиями окружающей среды [96, 106, 116]. Компоненты антиоксидантной защиты, включающие глутатион и аскорбат, аскорбатпероксидазу, супероксиддисмутазу, каталазу, пероксидазоксины, обеспечивают трансформацию активных форм кислорода в воду и кислород. Кроме того, такие антиоксиданты, как глутатион и другие тиолы, каротиноиды, флавоноиды, токоферол, аскорбиновая, мочева и липоевая кислоты, пролин и некоторые другие аминокислоты, полиамины и различные фенольные соединения, непосредственно осуществляют детоксикацию металлов. Так, глутатион может образовывать комплексы с несколькими металлами и металлоидами и является важнейшим компонентом клеточного окислительно-восстановительного баланса [66, 68, 70, 72, 76, 86, 104, 107, 119, 120].

В растительных клетках вакуоль обычно считают основным местом изоляции токсикантов, в том числе металлов [105]. Например, кадмий индуцирует синтез фитохелатинов и переносится в вакуоль не только антипортом Cd/H, но и в составе комплексов Cd-фитохелатин АТФ-зависимым переносчиком фитохелатинов [102].

Альтернативная стратегия контроля уровня токсичного металла в клетке включает активное удаление его ионов через плазматическую мембрану, но имеется очень мало прямых доказательств наличия такого процесса в растительных системах.

Растения, использующие стратегию «отторжения», могут избегать чрезмерного поглощения ионов металла ограничением его переноса от корней к побегам. Например, у многих видов растений устойчивость к кадмию основана на том, что корни накапливают ионы металла и тем самым предотвращают перенос кадмия в побег. Некоторые толерантные растения могут удерживать ионы тяжелых металлов в клеточных стенках путем образования комплексов их компонентов с такими ионами [89, 92, 99, 111, 118, 122]. Так, снижению поглощения Ni способствуют Ni-хелатирующие гистидин и цитрат [101].

Также растения могут осажждать токсиканты путем увеличения рН ризосферы или путем выделения анионов, таких как фосфат [113]. Толерантность к наводнениям у древесных растений коррелирует со способностью к регенерации корней и конверсией токсинов, образующихся в почве, в менее токсичные соединения путем окисления ризосферы и увеличения количества гиббереллинов и цитокининов, синтезированных корнями [84]. Выявлены видоспецифические реакции корневых систем на условия окислительно-восстановительных процессов в почве: в зависимости от изменения скорости удлинения корней при снижении окислительно-восстановительного потенциала вид может быть охарактеризован как чувствительный или толерантный к данному фактору [100]. Тонкие мелкие корни различаются по порядкам и видам в зависимости от осаднения азота и количества осадков, и эти различия отражают стратегии выживания подземных частей растения [121].

Адаптивные стратегии

Древесное растение, в отличие от травянистого, представляет из себя сложную «многоэтажную конструкцию», каждый из «этажей» которой, несмотря на общую целостность системы, проявляет относительную независимость. Эта относительная независимость выражается в многообразии адаптивных реакций к промышленному загрязнению или степеней их проявления. Кроме того, они проявляются по-разному у разных древесных видов. Таким образом, каждый древесный вид как целостный организм характеризу-

ется определенной адаптивной стратегией к тому или иному виду техногенной нагрузки, и такая стратегия реализуется комплексом относительно независимых адаптивных реакций (анатомических, физиологических, биохимических, габитуальных и т. д.) на разных уровнях организации растения.

Реализация той или иной адаптивной стратегии зависит от адаптивного потенциала вида. Собственно, адаптивная стратегия является «зеркальным отражением» адаптивного потенциала. Адаптивный потенциал древесных растений – комплекс адаптивных реакций, обеспечивающих приспособляемость растений к экстремальным условиям среды. В основе адаптивного потенциала лежат изменчивость, устойчивость и экологическая пластичность видов. Под устойчивостью понимается способность организмов сохранять жизненно важные функции и процессы на определенном уровне и при этом по возможности исключить их резкие колебания. Устойчивость является результатом сочетания и интеграции совокупности приспособительных реакций (анатомических, физиологических, биохимических, габитуальных, феноритмических, анабиотических, регенерационных, популяционных и ценотических) и не может быть сведена только к одной из них. Экологическая пластичность, напротив, определяется как проявление максимально возможных колебаний того или иного показателя растений без ущерба для организма – в пределах нормы реакции. Выявление степени изменчивости всех процессов на различных уровнях организации в экстремальных условиях и выявление взаимозависимостей между этими показателями дает возможность оценить реализуемую часть адаптивного потенциала древесных растений, а оценка влияния стрессовых факторов на уровень перестройки процессов организма дает понимание механизмов, обеспечивающих реализацию адаптивных стратегий растений [30, 31, 41].

Когда идет речь о стратегиях растительных организмов, принято рассматривать известную систему экологических стратегий Раменского-Грайма [44, 75], где биоценотические типы растений разделяются на виолентов, пациентов и эксплерентов. В основу системы положено «поведение» видов в отношении широкого спектра эколого-ценотических ситуаций. В классификации систем адаптивности растений наиболее распространены два подхода – классификация жизненных форм как адаптационных морфофизиологических комплексов, отражающих разные варианты экологической среды [49], и классификация типов эколого-фитоценотических стратегий [37, 58], представляющих выражение способа выживания растений в различных экологических и ценотических условиях. Отнесение вида к конкретному типу адаптивной стратегии основывается на ценотических, общебиологических и морфологических изменениях, например,

динамика численности популяции [54], скорость накопления биомассы [75], распределение материально-энергетических ресурсов растений между процессами поддержания жизнедеятельности и воспроизводством [77, 93], степень совпадения фундаментальной и реализованной ниши [42] и т. д.

Отличительным направлением является система адаптивности растений к разным местообитаниям через особенности их функционирования, то есть способности выживать, используя различные морфологические, физиологические и биохимические механизмы. Объектом классификации является все многообразие первичных адаптивных реакций на условия обитания – от молекулярно-биологических до онтогенетических. Совокупность частных первичных адаптивных реакций складывается из видоспецифичных комбинаций и множества возможных первичных адаптивных реакций на действие тех или иных факторов среды [58].

Широкое распространение получила методика вычисления «Индекса толерантности» к промышленному загрязнению воздуха, которая основана на вычислении коэффициента толерантности с использованием таких физиологических показателей, как содержание аскорбиновой кислоты в листьях, содержание общего хлорофилла, рН листового экстракта и относительное содержание воды в листьях. Некоторые авторы модифицируют эту методику, добавляя в формулу вычисления индекса толерантности дополнительные физиологические параметры, которые на их взгляд являются чувствительными к промышленному загрязнению. Однако прослеживается значительная противоречивость получаемых данных как при сравнении с результатами других авторов, так и в пределах собственных исследований. Как правило, по отношению к одному и тому же источнику загрязнения у видов выявляются значительные перепады индекса толерантности по мере приближения от контроля к источнику, что не дает возможности установить четкую тенденцию [62, 63, 71, 81–83, 88, 90, 94, 114].

Если учесть, что древесные растения (имеются в виду уже сформировавшиеся приспевающие, спелые и перестойные древостои) по определению являются виолентами (в силу их положения и средообразующей роли в образуемом фитоценозе), возникает вопрос, какова же их адаптивная стратегия к новому для них (в историческом плане) техногенному фактору при естественно сложившемся и уже привычном для них фитоценотическом факторе (то есть без учета техногенеза)?

Подход к систематизации этого вопроса, но не для отдельного вида, а для совокупности разных видов растений, предложен В.К. Жировым и соавт. [18]. Авторами рассмотрен вопрос о взаимодействии струк-

тур различных уровней организации растительного организма при формировании адаптивных реакций к промышленному загрязнению. Ими предложена степень независимости или согласованности отдельных структур иерархий в условиях, далеких от экологического оптимума, определять пассивной или активной стратегией адаптивного ответа организма и надорганизменных структур. При оценке изменчивости структур различных иерархий в градиенте техногенного воздействия в аспекте вариаций уровня их интегрированности ими предложены три типа реакций: 1) активизация процессов энергообмена при снижении целостности на всех уровнях; 2) снижение уровня энергообмена при возрастании целостности структур всех уровней и падении их устойчивости; 3) дальнейшее падение уровня энергообмена при снижении целостности структур всех иерархий.

Как видно из приведенного анализа, в литературных источниках практически не акцентируется внимание на том, что разного рода адаптации (анатомические, физиологические, биохимические, габитуальные и т. д.) к промышленному загрязнению на различных уровнях организации растения могут носить многообразный характер (то есть отличаться от принятой «классической» адаптации на то или иное воздействие). При этом авторы упускают из виду необходимость связать в единую систему эти многообразные адаптивные реакции. Малочисленны подходы к разработке классификации адаптивных стратегий растительных организмов к техногенезу.

Анализ совокупности современных подходов к определению и выявлению адаптивных стратегий к техногенному фактору позволил разработать авторский подход к данному вопросу, основанный на материалах собственных многолетних исследований [55]. Представляется целесообразным рассматривать адаптивную стратегию древесного вида к техногенному фактору как степень согласованности относительно независимых (разнонаправленных) адаптивных реакций (биохимических, физиологических, анатомических, морфологических, габитуальных и т. д.), совокупно проявляющихся на всех иерархических структурно-функциональных уровнях организации древесных растений популяции. На основании современных представлений об адаптивных реакциях организма, стрессе и толерантности, предложено различать следующие адаптивные реакции древесных растений к действию техногенного фактора:

- стрессовые: при низком адаптивном потенциале адаптивные реакции направлены на активное ограничение влияния стрессового фактора, при этом тратятся значительные энергетические ресурсы;

- умеренно-стрессовые: незначительное или недовольное проявление адаптивных реакций, направленных на ограничение влияния стрессового фактора;

- нейтральные: отсутствие реакций при влиянии стрессового фактора;

- умеренно-толерантные: возрастающий адаптивный потенциал позволяет незначительно или недовольно усиливать процессы роста и развития, несмотря на давление стрессового фактора;

- толерантные: высокий адаптивный потенциал позволяет быть не восприимчивым к стрессовому фактору, не расходовать энергию на ограничение его влияния и без вреда усиливать процессы роста и развития.

Отнесение того или иного рассматриваемого параметра к конкретной адаптивной реакции принимается на основе степени и достоверности его изменения под действием стрессирующего фактора. Итоговая адаптивная стратегия определяется как мода совокупности адаптивных реакций, а количественная оценка степени согласованности адаптивных реакций проводится с использованием коэффициентов меры разнообразия: для описания степени согласованности в пределах иерархических уровней лучше всего подходит коэффициент равномерности, а между иерархическими уровнями – среднее квадратическое отклонение. Чем больше иерархических уровней организации будет вовлечено в оценку, тем больше будут выражены мода, коэффициент меры разнообразия и адаптивная стратегия древесного вида. В целом, чем толерантнее адаптивная стратегия вида, тем выше его адаптивный потенциал и успешнее его существование в условиях стрессирующего фактора.

Разработанные методические подходы позволили оценить адаптивные стратегии и адаптивный потенциал лесовосстановителей Предуралья к нефтехимическому загрязнению на примере Уфимского промышленного центра [56]: сосна, лиственница и дуб характеризуются «толерантной» адаптивной стратегией и высоким адаптивным потенциалом, липа характеризуется «стрессовой» адаптивной стратегией и низким адаптивным потенциалом, ель и береза характеризуются «нейтральной» адаптивной стратегией и средним адаптивным потенциалом. Для каждого древесного вида показана относительная независимость адаптивных реакций на каждом иерархическом структурно-функциональном уровне и относительная независимость адаптивных реакций между иерархическими уровнями. У всех видов наибольшей степенью согласованности адаптивных реакций в пределах иерархических уровней характеризуются показатели ЖС древостоев и морфология корневых систем, наименьшей – параметры водного обмена хвои/листьев. По степени согласованности адаптивных реакций между иерархическими уровнями древесные виды образуют ряд уменьшения: береза > липа > лиственница > ель > сосна > дуб.

Заключение

В отличие от морфологии и физиологии хвои и листьев, морфологии корневых систем и дендрохронологических характеристик, показатели ЖС древостоев не проявляют адаптивный полиморфизм, неспецифические реакции отсутствуют, и наблюдается однозначное ухудшение ЖС древостоев вне зависимости от древесного вида и типа загрязнения [4, 6, 7, 10, 20, 21, 27–29, 32, 43, 48, 50, 57, 64, 80, 110, 115]. Однако степень ухудшения во многом зависит от древесного вида и типа загрязнения. ЖС древостоев является наиболее точным и понятным показателем, характеризующим влияние техногенеза на древостой, поскольку в методическом плане является комплексной оценкой как габитуальных, так и лесотаксационных параметров всего фитоценоза. Следует отметить стремительное развитие методического аппарата оценки ЖС древостоев и переход от упрощенных схем только визуальной оценки к интегрированию качественных и количественных параметров древостоев.

Промышленное загрязнение как новый для растений в историческом плане фактор вызывает необходимость разработки вопросов, связанных с адаптивными стратегиями видов к техногенезу, в основе которых лежит адаптивный потенциал видов. Адаптивный потенциал древесных растений складывается из изменчивости, экологической пластичности и устойчивости на различных структурно-функциональных уровнях организации. Обеспечение гомеостаза растений при развитии в условиях техногенеза сопровождается неизбежными флуктуациями показателей на различных уровнях организации, при этом величина максимальных флуктуаций определяет экологическую пластичность, а минимальные величины флуктуаций служат показателем устойчивости вида [31]. Таким образом, адаптивная стратегия представляет собой реализованную часть адаптивного потенциала вида и характеризуется широким адаптивным полиморфизмом, проявляющимся комплексом специфических и неспецифических адаптивных реакций (а также степенью их изменчивости и степенью взаимозависимости между ними), протекающих на всех уровнях организации живого – от цитогенетического до экосистемного. Здесь также следует отметить стремительное развитие методического аппарата и переход от эколого-ценотических стратегий к оценке адаптивных стратегий видов к техногенезу. Предложены методические подходы, учитывающие как сумму вертикальных и горизонтальных связей всего фитоценоза, так и сумму только вертикальных связей одного конкретного древесного вида.

Широко применяемая методика вычисления индекса толерантности видов к промышленному загрязнению довольно часто используется в качестве критерия устойчивости и подбора видов для озеленения, однако индекс дает противоречивые результаты, не в

полной мере отражает чувствительность физиологических параметров к уровню загрязнения, и прямая зависимость между этими параметрами отсутствует. Следовательно, применимость данной методики для оценки адаптивных реакций и стратегий древесных видов к техногенезу вызывает сомнения.

Следует отметить, что зарубежные исследователи довольно часто оперируют понятием «адаптивная стратегия» при обсуждении реакций какого-то конкретного параметра (группы параметров) или органа в ответ на внешнее воздействие. На наш взгляд, в данных случаях корректнее использовать термин «адаптивная реакция», так как речь идет о реакциях только на одном определенном структурно-функциональном уровне организации растительного организма, в то время как «адаптивная стратегия» подразумевает совокупное использование всех имеющихся защитно-приспособительных механизмов, складывающихся из комплекса относительно независимых адаптивных реакций на всех структурно-функциональных уровнях организации растительного организма – то есть всего растения в целом.

Следует отметить и ряд проблем, решение которых позволит более детально оценивать влияние техногенеза на древесные растения:

- фрагментарность исследований: оценка влияния техногенеза на один определенный орган (как правило, ассимиляционный аппарат вследствие его доступности и тесный контакт с окружающей средой) или ограниченную группу параметров или процессов;
- малочисленность работ с оценкой эффектов в их развитии, включая динамику вегетационного периода и многолетнюю динамику;
- простое описание выявленного эффекта без оценки сути адаптивной реакции и ее направленности;
- отсутствие увязки множества выявленных эффектов в единую адаптивную схему;
- ошибочная подмена понятия «адаптивная стратегия» выявленными «адаптивными реакциями»;
- необходимость перехода от анализа видоспецифических адаптивных реакций (на отдельных уровнях структурно-функциональной организации) к комплексной оценке адаптивных стратегий древесных видов (как единого целого организма) на тот или иной вид техногенного загрязнения с вовлечением в оценку как можно большего числа иерархических уровней организации (от морфологии и физиологии корневых систем до морфологии и физиологии хвои/листьев);
- в публикациях мало внимания уделено, на наш взгляд, разработке методических подходов к оценке адаптивного потенциала растений к техногенезу и разработке классификации адаптивного потенциала. На сегодняшний день имеется определение адаптивного потенциала и его общая характеристика (высо-

кий-средний-низкий), однако необходима детальная количественная и качественная оценка этого термина.

Благодарности. Работа выполнена по теме № АААА-А18-118022190103-0 «Адаптация древесных растений и трансформация лесных экосистем Южно-Уральского региона в контрастных природных и антропогенных условиях» в рамках государственного задания Минобрнауки России № 075-00326-19-00. В работе использована приборная база Центра коллективного пользования «Агидель» УФИЦ РАН.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-14-50218-Экспансия.

Funding. The reported study was funded by RFBR, project number 20-14-50218.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Авдеева АВ, Кузьмичев ВВ. Влияние городской среды на состояние природных лесов. Экология. 1997;(4):248-52.
2. Автухович ИЕ, Ягодин БА. Деревья как индикаторы экологически неблагоприятных условий крупного мегаполиса. Известия ТСХА. 2000;1:180-3.
3. Алексеев ВА. Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем. В кн.: Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука; 1990. С. 38-54.
4. Аминова КЗ. Эколого-биологическая характеристика дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения (на примере Уфимского промышленного центра) (диссертация). Тольятти: ИЭВБ РАН; 2016.
5. Антипов ВГ. Устойчивость древесных растений к промышленным газам. Минск: Наука и техника; 1979.
6. Ахмадуллин РШ. Эколого-биологическая характеристика ивы белой (*Salix alba* L.) в условиях Уфимского промышленного центра (диссертация). Оренбург: ГОУ ВПО ОГПУ; 2014.
7. Бойко АА. Дендрэкологическая характеристика березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях смешанного типа загрязнения окружающей среды (Уфимский промышленный центр) (диссертация). Оренбург: ГОУ ВПО ОГПУ; 2005.
8. Бурда РИ. К вопросу об антропогенной трансформации флоры. Украинский ботанический журнал. 1996;53(1-2):26-31.
9. Бухарина ИЛ, Поварничина ТМ, Ведерников КЕ. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА; 2007.
10. Васильева КА. Эколого-биологические особенности клена остролистного (*Acer platanoides* L.) в условиях техногенного загрязнения (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2011.
11. Веселова ТВ, Веселовский ВА, Чернавский ДС. Стресс у растений (биофизический подход). М.: Издательство МГУ; 1993.
12. Власенко ВЭ, Менщиков СЛ, Махнев АК. Состояние и устойчивость хвойных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения на Среднем Урале. Экология. 1995;(3):193-6.
13. Гетко НВ. Растения в техногенной среде: Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника; 1989.
14. Горышина ТК. Растения в городе. Л.: ЛГУ, 1991.
15. ГОСТ Р 57973-2017. Санитарная безопасность в лесах. Термины и определения. М.: Стандартинформ; 2017.
16. Гришко ВН, Плюто КБ, Столяренко ЗН. К методике оценки состояния древесных растений в условиях городской среды. В кн.: Роль ботаничних садів в зеленому будівництві міст, курортних та рекреаційних зон: Матеріали міжнародної конференції, присвяченої 135-річчю Ботанічного саду ОНУ ім. І.І. Мечникова. Одеса: Латстар; 2002. С. 126-31.
17. Гродзинский ДМ. Надежность растительных систем. Киев: Наукова думка; 1983.
18. Жиров ВК, Хаитбаев АХ, Говорова АФ, Гонтарь ОБ. Взаимодействия структур различных уровней организации и адаптационные стратегии растений. Вестник МГТУ. 2006;9(5):725-8.
19. Завадский КМ. Вид и видообразование. Л.: Наука; 1968.
20. Зайцев ГА, Кулагин АЮ. Сосна обыкновенная и нефтехимическое загрязнение. Дендрэкологическая характеристика, адаптивный потенциал и использование. М.: Наука; 2006.
21. Зайцев ГА, Кулагин АЮ, Уразгильдин РВ, Дубровина ОА, Логвинов КВ, Афанасов НА, Чабан АН, Шайнуров РИ, Тагирова ОВ, Ами-

- нева КЗ. Относительное жизненное состояние древесных насаждений в условиях промышленного загрязнения. Известия Уфимского научного центра РАН. 2017;(2):63-8.
22. Ильин ВБ. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука; 1991.
 23. Илькун ГМ. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наукова думка; 1978.
 24. Кабата-Пендиас А, Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир; 1989.
 25. Калинин ВА, Крюк ВИ, Луганский НА, Шавнин СА. Модель оценки состояния пораженных древостоев. Экология. 1991;(3):21-8.
 26. Ковалев ПВ, Попов АИ, Сараджишили КГ, Острянин АВ. Использование дендроиндикации для экологического мониторинга в районе г. Боржоми. В кн.: Проблемы дендрохронологии и дендроклиматологии. Свердловск: УрО АН СССР; 1990. С. 80-1.
 27. Ковылина ОП, Зарубина ИА, Ковылин АН. Оценка жизненного состояния сосны обыкновенной в зоне техногенного загрязнения. Хвойные boreальной зоны. 2008;25(3-4):284-9.
 28. Колмогорова ЕЮ. Видовое разнообразие и жизненное состояние древесных и кустарниковых растений в зеленых насаждениях города Кемерово (диссертация). Томск: Томский государственный университет; 2005.
 29. Кулагин АЮ, Гиниятуллин РХ, Уразгильдин РВ. Средостабилизирующая роль лесных насаждений в условиях Стерлитамакского промышленного центра. Уфа: Гилем; 2010.
 30. Кулагин ЮЗ. Индустриальная дендрэкология и прогнозирование. М.: Наука; 1985.
 31. Кулагин АА. Реализация адаптивного потенциала древесных растений в экстремальных лесорастительных условиях (диссертация). Тольятти: ИЭВБ РАН; 2006.
 32. Кулагин АА, Зайцев ГА. Лиственница Сукачева в экстремальных лесорастительных условиях Южного Урала. М.: Наука; 2008.
 33. Курбатова АС, Башкин ВН, Касимов НС. Экология города. М.: Научный мир; 2004.
 34. Мак Кленахен ДжР. Изменения в лесном сообществе в связи с загрязнением воздуха. В кн.: Взаимодействие лесных экосистем и атмосферных загрязнителей. Ч. 1. Таллин: АН ЭССР; 1982. С. 79-96.
 35. Маслов СП. Ограничения возможностей гомеостаза мультифункциональностью и главные пути его обхода. В кн.: Уровни организации биологических систем. М.: Наука; 1980. С. 8-19.
 36. Медведев ВА, Тарабрин ВП. Хемотолерантность высших растений и пути ее эволюции. В кн.: Антропо-толерантность наземных биоценозов и прикладная экология. Таллин: АН ЭССР; 1977. С. 143-6.
 37. Миркин БМ, Наумова ЛГ. Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа: АН РБ, Гилем; 2012.
 38. Неверова ОА, Колмогорова ЕЮ. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. Новосибирск: Наука; 2003.
 39. Николаевский ВС. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М.: МГУЛ; 1998.
 40. Оскворидзе ТД. Анатомическое строение листьев и хвои основных лесобразующих пород. Тбилиси: Мицнерба; 1975.
 41. Пахомова ВМ. Основные положения современной теории стресса и неспецифический адаптационный синдром у растений. Цитология. 1995;(1):66-91.
 42. Работнов ТА. Фитоценология. 3-е изд. М.: МГУ; 1992.
 43. Радостева ЭР. Эколого-биологическая характеристика насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) при лесной рекультивации отвалов горнодобывающей промышленности (Республика Башкортостан) (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2011.
 44. Раменский ЛГ. Введение в комплексное почвенно-ботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз; 1938.
 45. Риклефс Р. Основы общей экологии. М.: Мир; 1979.
 46. Рутковский ИВ. Биоэлектрическая активность тополей разного физиологического состояния в суточном и сезонном ритмах. Лесоведение. 1973;(1):51-7.
 47. Сарбаева ЕВ. Эколого-физиологические адаптации различных декоративных форм туи западной в городских условиях. В кн.: Современные аспекты экологии и экологического образования. Казань; 2005. С. 162-4.
 48. Сейдафаров РА. Эколого-биологические особенности липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях техногенного загрязнения (на примере Уфимского промышленного центра) (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2009.
 49. Серебрякова ТИ. Морфогенез побегов и эволюция жизненных форм. М.: Наука; 1971.
 50. Скотников ДВ. Дендрэкологическая характеристика ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях нефтехимического загрязнения (Уфимский промышленный центр) (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2007.

51. Тарабрин ВП. Природа устойчивости растений к промышленным эксгалатам. В кн.: Адаптация древесных растений к экстремальным условиям среды. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР; 1984. С. 90-7.
52. Тимофеев-Ресовский НВ, Гинтер ЕК, Иванов ВИ. О некоторых проблемах и задачах феногенетики. В кн.: Проблемы экспериментальной биологии: сборник статей. М.: Наука; 1977. С. 186-95.
53. Турмухаметова Н.В. Особенности морфогенеза побегов и феноритмов *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. в условиях городской среды (диссертация). Новосибирск: ЦСБС СО РАН; 2005.
54. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс; 1980.
55. Уразгильдин РВ. Классификация адаптивных стратегий древесных растений к техногенному загрязнению (на примере липы сердцевидной *Tilia cordata* Mill.). Аграрная Россия. 2009; Специальный выпуск:205-9.
56. Уразгильдин РВ. Лесообразующие виды Предуралья в условиях техногенеза: сравнительная эколого-биологическая характеристика, видо-специфичность, адаптивные реакции, адаптивные стратегии (диссертация). Екатеринбург: УГЛТУ; 2021.
57. Уразгильдин РВ. Эколого-биологическая характеристика тополей в условиях загрязнения окружающей среды (на примере Уфимского промышленного центра) (диссертация). Уфа: БашГУ; 1998.
58. Усманов ИЮ, Рахманкулова ЗФ, Кулагин АЮ. Экологическая физиология растений: учебник. М.: Логос; 2001.
59. Флейшман БС. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. 2-е изд. Смоленск: Ойкумена; 2008.
60. Фролов АК. Изменение фотосинтетического аппарата некоторых растений в условиях городской среды. В кн.: Газоустойчивость растений. Новосибирск: Наука; 1980. С. 172-7.
61. Ярмишко ВТ, Лянгузова ИВ, редакторы. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ; 2002.
4. Amineva KZ. [Ecological and biological characteristic of oak (*Quercus robur* L.) in conditions of technogenic pollution (on the example of the Ufa industrial center) (dissertation)]. Tolyatti: IEVB RAN; 2016. (In Russ.)
5. Antipov VG. [Stability of Woody Plants to Industrial Gases]. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1979. (In Russ.)
6. Akhmadullin RSh. [Ecological and biological characteristics of willow (*Salix alba* L.) in the conditions of the Ufa Industrial Center (dissertation)]. Orenburg: GOU VPO OGPU; 2014. (In Russ.)
7. Boyko AA. [Dendroecological characteristic of birch (*Betula pendula* Roth.) under conditions of mixed type of environmental pollution (Ufa Industrial Center) (dissertation)]. Orenburg: GOU VPO OGPU; 2005. (In Russ.)
8. Burda RI. [On anthropogenic transformation of flora]. Ukrainskiy Botanicheskiy Zhurnal. 1996;53(1-2):26-31. (In Russ.)
9. Bukharina IL, Povarnitsina TM, Vedernikov KE. [Ecological and Biological Features of Woody Plants in an Urbanized Environment]. Izhevsk: FGOU VPO Izhevskaya GSKHA; 2007. (In Russ.)
10. Vasilyeva KA. [Ecological and Biological Features of Maple (*Acer platanoides* L.) under Conditions of Technogenic Contamination (dissertation)]. Ufa: IB UNTS RAN; 2011. (In Russ.)
11. Veselova TV, Veselovskiy VA, Chernavskiy DS. [Plants Stress (Biophysical Approach)]. Moscow: Izdatelstvo MGU; 1993. (In Russ.)
12. Vlasenko VE, Menshchikov SL, Makhnev AK. [Condition and stability of coniferous forests under conditions of aerotechnogenic pollution in the Middle Urals]. Ekologiya. 1995;(3):193-6. (In Russ.)
13. Getko NV. [Plants in the Technogenic Environment: Structure and Function of the Assimilation Apparatus]. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1989. (In Russ.)
14. Goryshina TK. [Plants in a City]. Leningrad: LGU, 1991. (In Russ.)
15. GOST R 57973-2017. [Sanitary Safety in Forests. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.)
16. Grishko VN, Plyuto KB, Stolyarenkova ZN. [On the method of assessing the state of woody plants in the urban environment condition]. In: Rol Botanichnikh Sadiv v Zelenomu Budivnitstvi Mist, Kurortnikh ta Rekreatsiynikh Zon: Materiali Mizhnarodnoï Konferentsii, Prisyachenoï 135-rRchchu Botanichno-

Общий список литературы/Reference List

1. Avdeyeva AV, Kuzmichev VV. [Impact of the urban environment on natural forests condition]. Ekologiya. 1997;(4):248-52. (In Russ.)
2. Avtukhovich IYe, Yagodin BA. [Trees as indicators of environmentally disadvantaged conditions of a large megalopolis]. Izvestiya TSKHA. 2000;1:180-3. (In Russ.)
3. Alekseyev VA. [Some issues of diagnosis and classification of pollution-damaged forest ecosys-

- go Sadu ONU im. I.I. Mechnikova. Odesa: Latstar; 2002. P. 126-31. (In Russ.)
17. Grodzinskiy DM. Nadiozhnost Rastitelnykh Sistem. [Reliability of Plant Systems]. Kiev: Naukova Dumka; 1983. (In Russ.)
 18. Zhironov VK, Khaitbayev AKh, Govorova AF, Gontar OB. [Interactions of structures of different levels of organization and adaptation strategies of plants]. Vestnik MGTU. 2006;9(5):725-8. (In Russ.)
 19. Zavadskiy KM. Vid i Vidoobrazovaniye. [Species and Speciation]. Leninbgrad: Nauka; 1968. (In Russ.)
 20. Zaytsev GA, Kulagin AYu. Sosna Obyknoennaya i Neftekhimicheskoye Zagriazneniye. Dendrologicheskaya Kharakteristika, Adaptivnyi Potentsial i Ispolzovaniye. [Scotch Pine and Oil Pollution. Dendroecological Characteristic, Adaptive Potential and Use]. Moscow: Nauka; 2006. (In Russ.)
 21. Zaytsev GA, Kulagin AYu, Urazgildin RV, Dubrovina OA, Logvinov KV, Afanasov NA, Chaban AN, Shaynurov RI, Tagirova OV, Amineva KZ. [Relative vital state of tree plantations in industrial pollution conditions]. Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2017;(2):63-68. (In Russ.)
 22. Ilyin VB. Tiazhiolye Metally v Sisteme Pochva-Rasteniye. [Heavy Metals in the Soil-Plant System]. Novosibirsk: Nauka; 1991. (In Russ.)
 23. Ilkun GM. Zagriazniteli Atmosfery i Rasteniya. [Pollutants of Atmosphere and Plants]. Kiyev: Naukova dumka; 1978. (In Russ.)
 24. Kabata-Pendias A, Pendias KH. Mikroelementy v Pochvakh i Rateniyakh. [Trace Elements in Soils and Plants]. M.: Mir; 1989. (In Russ.)
 25. Kalinin VA, Kryuk VI, Luganskiy NA, Shavnin SA. [A model for assessing the condition of affected forest stands]. Ekologiya. 1991;(3):21-8. (In Russ.)
 26. Kovalev PV, Popov AI, Saradzhishili KG, Ostryanin AV. [Use of dendroindication for environmental monitoring in Borjomi city area]. In: Problemy Dendrokronologii i Dendroklimatologii. Sverdlovsk: UrO AN SSSR; 1990. P. 80-1. (In Russ.)
 27. Kovylina OP, Zarubina IA, Kovylina AN. [Assessment of the vital state of pine in the zone of technogenic pollution]. Khvoynye Borealnoy Zony. 2008;25(3-4):284-9. (In Russ.)
 28. Kolmogorova YeYu. [Species Diversity and Vital State of Woody and Shrub Plants in Green Plantations of Kemerovo city (dissertation)]. Tomsk: Tomskiy Gosudarstvennyy Universitet; 2005. (In Russ.)
 29. Kulagin AYu, Giniyatullin RKh, Urazgildin RV. Sredostaboiliziruyuschaya Rol Lesnykh Nasazhdeniy v Usloviyakh Sterlitamakskogo Pronyshlennogo Ssentra. [The environment stabilizing role of forest plantations in the conditions of the Sterlitamakst industrial center]. Ufa: Gilem; 2010. (In Russ.)
 30. Kulagin YuZ. Industrialnaya Dendroekologiya i Prognozirovaniye. [Industrial dendroecology and forecasting]. Moscow: Nauka; 1985. (In Russ.)
 31. Kulagin AA. [Realization of Adaptive Potential of Woody Plants in Extreme Forest-Growing Conditions (dissertation)]. Tolyatti. IEVB RAN; 2006. (In Russ.)
 32. Kulagin AA, Zaytsev GA. Listvennitsa Sukacheva v Ekstremalnykh Usloviyakh Yuzhnogo Urala. [Larch in Extreme Forest Conditions of the Southern Urals]. Moscow: Nauka; 2008. (In Russ.)
 33. Kurbatova AS, Bashkin VN, Kasimov NS. Ekologiya Goroda. [Ecology of the City]. Moscow: Nauchnyi Mir; 2004. (In Russ.)
 34. Mak Klenakhen DR. [Changes in the forest community due to air pollution]. In: Vzaimodeystviye Lesnykh Ekosistem i Atmosfernykh Zagryaznitel. Ch. 1. Tallinn: AN ESSR; 1982. P. 79-96. (In Russ.)
 35. Maslov SP. [Limitations of homeostasis capabilities by multifunctionality and main ways to bypass it]. In: Urovni Organizatsii Biologicheskikh Sistem. Moscow: Nauka; 1980. P. 8-19. (In Russ.)
 36. Medvedev VA, Tarabrin VP. [Chemotolerance of higher plants and the ways of its evolution]. In: Antropotolerantnost Nazemnykh Biotsenozov i Prikladnaya Ekologiya. Tallinn: AN ESSR; 1977. P. 143-6. (In Russ.)
 37. Mirkin BM, Naumova LG. Sovremennoye Sostoyaniye Osnovnykh Kontseptsii Nauki o Rastitelnosti. [The Current State of the Main Concepts of Vegetation Science]. Ufa: AN RB, Gilem; 2012. (In Russ.)
 38. Neverova OA, Kolmogorova YeYu. Drevesnyye Rateniya i Urbanizirovannaya Sreda: Ekologicheskiye i Biotekhnologicheskiye Kontseptsii. [Woody Plants and Urbanized Environment: Ecological and Biotechnological Aspects]. Novosibirsk: Nauka; 2003. (In Russ.)
 39. Nikolayevskiy VS. Ekologicheskaya Otsenkka Zagriazneniya Sredy i Sostoyaniya Nazemnykh Ekosistem Metodami Fitoindikatsii. [Ecological Assessment of Pollution of Environment and Condition of Terrestrial Ecosystems by Methods of Phytoindication]. M.: MGUL; 1998. (In Russ.)
 40. Oskvoridze TD. Anatomicheskoye Stroeniye Listyev i Khvoi Osnovnykh Lesoobrazuyuschikh Porod. [Anatomical Structure of Leaves and Needles of the Main Forest-Forming Species]. Tbilisi: Mitsnerba; 1975. (In Russ.)
 41. Pakhomova VM. [The basic provisions of modern stress theory and nonspecific adaptation syndrome in plants]. Tsitologiya. 1995;(1):66-91. (In Russ.)

42. Rabotnov TA. Fitotsenologiya. 3-ye Izdaniye. [Phytocenology. 3rd ed]. Moscow: MGU; 1992. (In Russ.)
43. Radosteva ER. [Ecological-Biological Characteristic of the Plantations of Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Birch (*Betula pendula* Roth) in Forest Reclamation of Mining Dumps (Republic of Bashkortostan) (dissertation)]. Ufa: IB UNTS RAN; 2011. (In Russ.)
44. Ramenskiy LG. Vvedeniye v Kompleksnoye Pochvenno-Botanicheskoye Issledovaniye Zemel. [Introduction to Comprehensive Pedological-Botanical Evaluation of Lands]. Moscow: Selkhozgiz; 1938. (In Russ.)
45. Riklifs R. Osnovy Obschey Ekologii. [Fundamentals of the General Ecology]. Moscow: Mir; 1979. (In Russ.)
46. Rutkovskiy IV. [Bioelectric activity of poplars of different physiological state in daily and seasonal rhythms]. Lesovedeniye. 1973;(1):51-7. (In Russ.)
47. Sarbayeva YeV. [Ecological and physiological adaptations of various decorative forms of western thuja in urban conditions]. In: Sovremennyye Aspekty Ekologii i Ekologicheskogo Orazovaniya. Kazan; 2005. P. 162-4. (In Russ.)
48. Seydafariyov RA. [Ecological and Biological Features of Lime (*Tilia cordata* Mill.) in Conditions of Technogenic Pollution Exemplified with Ufa Industrial Center] (dissertation)]. Ufa: IB UNTS RAN; 2009. (In Russ.)
49. Serebryakova TI. Morfogenez Popegov I Evoliutsii Zhiznennykh Form. [Morphogenesis of Shoots and Evolution of Life Forms]. Moscow: Nauka; 1971. (In Russ.)
50. Skotnikov DV. [Dendroecological Characteristic of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in Conditions of Petrochemical Pollution (Ufa Industrial Center) (dissertation)]. Ufa: IB UNTS RAN; 2007. (In Russ.)
51. Tarabrin VP. [Nature of plant resistance to industrial exhalates]. In: Adaptatsiya Drevesnykh Rasteniy k Ekstremalnym Usloviyam Sredy. Petrozavodsk: Karelskiy Filial AN SSSR; 1984. P. 90-7. (In Russ.)
52. Timofeev-Resovsky NV, Ginter YeK, Ivanov VI. [On some problems and tasks of phenogenetics]. In: Problemy Eksperimentalnoy Biologii: Sbornik Statey. Moscow: Nauka; 1977. P. 186-95. (In Russ.)
53. Turmukhametova NV. [Features of Morphogenesis of Shoots and Phenorhythms of *Betula pendula* Roth and *Tilia cordata* Mill. in Conditions of Urban Environment (dissertation)]. Novosibirsk: TSSBS SO RAN; 2005. (In Russ.)
54. Witteker R. Soobshchestva i Ekosistemy. [Communities and Ecosystems]. Moscow: Progress; 1980. (In Russ.)
55. Urazgildin RV. [Classification of adaptive strategies of woody plants to technogenic contamination (on the example of lime *Tilia cordata* Mill.)]. Agrarnaya Rossiya. 2009; (suppl.):205-9. (In Russ.)
56. Urazgildin RV. [Forest-forming Species of the Pre-Urals under Technogenesis Conditions: Comparative Ecological and Biological Characteristics, Species Specificity, Adaptive Reactions, Adaptive Strategies (dissertation)]. Yekaterinburg: USFEU; 2021. (In Russ.)
57. Urazgildin RV. [Ecological and Biological Characteristics of Poplars in Conditions of Pollution of Environment (on the Example of Ufa Industrial Center) (dissertation)]. Ufa: BashGU; 1998. (In Russ.)
58. Usmanov IYu, Rakhmankulova ZF, Kulagin AYU. Ekologicheskaya Fiziologiya Rasteniy: Uchebnik. [Ecological Physiology of Plants: Textbook]. Moscow: Logos; 2001. (In Russ.)
59. Fleyshman BS. Elementy Teorii Potentsialnoy Effektivnosti Slozhnykh Sistem. [Elements of the Theory of Potential Efficiency of Complex Systems. 2nd ed.]. Smolensk: Oykumena; 2008. (In Russ.)
60. Frolov AK. [Changing of the photosynthetic apparatus of some plants in conditions of urban environment]. In: Gazoustoychivost Rasteniy. Novosibirsk: Nauka; 1980. P. 172-7. (In Russ.)
61. Yarmishko VT, Lyanguzova IV, eds. Metody Izucheniya Lesnykh Soobshchestv. [Methods of Studying of Forest Communities]. Saint Petersburg: NIIKhimii SPbGU; 2002. (In Russ.)
62. Agbaire PO. Air pollution tolerance indices (APTI) of some plants around Erhoike-Kokori oil exploration site of Delta State, Nigeria. Int J Phys Sci. 2009;4:366-8.
63. Agbaire PO, Esiefarienrhe E. Air pollution tolerance indices (APTI) of some plants around Otorogun Gas Plant in Delta State, Nigeria. J Appl Sci Environ Manag. 2009;13 Issue 1:11-4.
64. Armolaitis K. Nitrogen pollution on the local scale in Lithuania: vitality of forest ecosystems. Environ Pollut. 1998;102(1, Suppl.1):55-60.
65. Chelli-Chaaboimi A. Mechanisms and adaptation of plants to environmental stress: A case of woody species. In: Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment. New York: Springer-Verlag New York Inc.; 2013. P. 1-18.
66. Chen S, Olbrich A, Langenfeld-Heyser R, Fritz E, Polle A. Quantitative X-ray microanalysis of hydrogen peroxide within plant cells. Microscopy Res Technique. 2009;72(1):49-60.
67. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. Biochimie. 2006;88(11):1707-19.

68. Cobbett CS. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiol.* 2000;123(3):825-32.
69. DalCorso G, Farinati S, Maistri S, Furini A. How plants cope with cadmium: staking all on metabolism and gene expression. *J Integrat Plant Biol.* 2008;50(10):1268-80.
70. Dalvi AA, Bhalerao SA. Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism. *Ann Plant Sci.* 2013;2:362-8.
71. Das S, Prasad P. Seasonal variation in air pollution tolerance indices and selection of Plant species for industrial areas of Rourkela. *Ind J Environ Protect.* 2010;30(12):978-88.
72. Das K, Roychoudhury A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS scavengers during environmental stress in plants. *Front Environ Sci.* 2014;2:1-13.
73. Devi EL, Kumar S, Singh TB, Sharma SK, Beemrote A, Devi CP, Chongtham SK, Singh CH, Yumlembam RA, Haribhushan A, Prakash N, Wani SH. Adaptation strategies and defense mechanisms of plants during environmental stress. In: *Medicinal Plants and Environmental Challenges*. Cham: Springer International Publishing; 2017. P. 359-413.
74. Gostin IN. Air pollution effects on the leaf structure of some Fabaceae species. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 2009;37(2):57-63.
75. Grime JP. *Plant strategies and vegetation processes*. Chichester: Wiley and Sons; 1979.
76. Guo J, Dai X, Xu W, Ma M. Overexpressing GSH1 and AsPCS1 simultaneously increase the tolerance and accumulation of cadmium and arsenic in *Arabidopsis thaliana*. *Chemosphere.* 2008;72:1020-6.
77. Hermy M, Stieperaete H. Capitalists and proletarians (MacLeod, 1884): an early theory of plant strategies. *Oikos.* 1985;44(2):364-6.
78. Hodson MJ. Metal toxicity and tolerance in plants. *Biochemist.* 2012;34(5)28-32.
79. Hossain MA, Piyatida P, Teixeira da Silva JA, Fujita M. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *J Bot.* 2012;872-5.
80. Jakovljević T, Marchetto A, Lovreškov L, Potočić N, Seletković I, Indir K, Jelić G, Butorac L, Zgrablić Ž, De Marco A, Simioni G, Ognjenović M, Tušek AJ. Assessment of atmospheric deposition and vitality indicators in Mediterranean Forest Ecosystems. *Sustainability.* 2019;11(23):6805.
81. Joshi PC, Swami A. Air pollution induced changes in the photosynthetic pigments of selected plant species. *J Environ Biol.* 2009;30:295-8.
82. Joshi PC, Swami A. Physiological responses of some tree species under roadside automobile pollution stress around city of Haridwar, India. *Environmentalist.* 2007;27:365-74.
83. Jyothi SJ, Jaya DS. Evaluation of air pollution tolerance index of selected plant species along roadsides in Thiruvananthapuram, Kerala. *J Environ Biol.* 2010;31:379-86.
84. Kozłowski TT, Pallardy SG. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *Bot Rev.* 2002;68:270-334.
85. Kumar D, Kumar S, Shukla V, Kumar N. Adaptation strategies of plants against common inorganic pollutants and metals. In: *Plant Adaptation Strategies in Changing Environment*. Singapore: Springer Verlag; 2017. P. 315-28.
86. Kumar D, Singh DP, Barman SC, Kumar N. Heavy metal and their regulation in plant system: an overview. In: *Plant Responses to Xenobiotics*. New York: Springer; 2016. P. 19-38.
87. Kupper H, Mijovilovich A, Meyer-Klaucke W, Krockneck PHM. Tissue- and age-dependent differences in the complexation of cadmium and zinc in the cadmium/zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Ganges ecotype) revealed by X-ray absorption spectroscopy. *Plant Physiol.* 2004;134:748-57.
88. Lakshmi PS, Sravanti KL, Srinivas N. Air pollution tolerance index of various plant species growing in industrial areas. *The Ecoscan.* 2008;2(2):203-6.
89. Liu CP, Shen ZG, Li XD. Accumulation and detoxification of cadmium in *Brassica pekinensis* and *B. chinensis*. *Biologia Plantarum.* 2007;51:116-20.
90. Liu Y, Ding H. Variation in air pollution tolerance index of plants near a steel factory: Implications for landscape-plant species selection for industrial areas. *WSEAS Transac Environ Develop.* 2008;4(1):24-32.
91. Lorenz M, Mues V, Becher G, Seidling W, Fischer R, Langouche D, Durrant D, Bartels U. Forest condition in Europe. Results of the 2001 Large-Scale Survey. 2002 Technical Report. Germany; 2002.
92. Lou LQ, Shen ZG, Li XD. The copper tolerance mechanisms of *Elsholtzia haichowensis* plant from copper-enriched soils. *Environ Exp Botany.* 2004;51:111-20.
93. MacArthur RH, Wilson ED. *The Theory of Island Biogeography*. New Jersey: Princeton University Press; 1967.
94. Meerabai G, Ramana VC, Rasheed M. Effect of industrial pollutants on Physiology of *Cajanus cajan* (L.) – *Fabaceae*. *Int J Environ Sci.* 2012;2(4):1889-94.
95. Mishra S, Srivastava S, Tripathi RD, Kumar R, Seth CS, Gupta DK. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves in-

- duction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation. *Chemosphere*. 2006;65:1027-39.
96. Moura DJ, Peres VF, Jacques RA, Saffi J. Heavy metal toxicity oxidative stress parameters and DNA repair. In: *Metal Toxicity in Plants: Perception, Signaling and Remediation*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2012. P. 187-205.
 97. Müller-Edzards C, De Vries W. Ten Years of Monitoring Forest Condition in Europe: Studies on Temporal Development, Spatial Distribution and Impacts of Natural and Anthropogenic Stress Factors. Technical Background Report. Geneva: UN/ECE; Brussels: EC; 1997.
 98. Percya KE, Ferretti M. Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environ Pollut*. 2004;130:113-26.
 99. Ramos I, Esteban E, Lucena JJ, Garate A. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca sp.* Cd-Mn interaction. *Plant Sci*. 2002;162:761-7.
 100. Rezeshki SR. Root responses of flood-tolerant and flood-sensitive tree species to soil redox conditions. *Trees*. 1991;5(3):180-6.
 101. Salt DE, Kato N, Krämer U, Smith RD, Raskin I. The role of root exudates in nickel hyperaccumulation and tolerance in accumulator and nonaccumulator species of *Thlaspi*. In: *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Boca Raton: Lewis Publishers INC; 2000. P. 189-200.
 102. Salt DE, Rauser WE. MgATP-dependent transport of phytochelatins across the tonoplast of oat roots. *Plant Physiol*. 1995;107:1293-301.
 103. Schat H, Llugany M, Vooijs R, Hartley-Whitaker J, Bleeker PM. The role of phytochelatins in constitutive and adaptive heavy metal tolerance in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes. *J Exp Bot*. 2002;53:2381-92.
 104. Shah K, Nongkynrih JM. Metal hyperaccumulators and bioremediation. *Biologia Plantarum*. 2007;51:618-34.
 105. Sharma SS, Dietz KJ. The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance. *Trends Plant Sci*. 2009;14:43-50.
 106. Singh M, Kumar J, Singh S, Singh VP, Prasad SM, Singh M. Adaptation strategies of plants against heavy metal toxicity: A short review. *Biochemistry and Pharmacology*. 2015;4(2). DOI:10.4172/2167-0501.1000161.
 107. Singh S, Prasad SM. Growth photosynthesis and oxidative responses of *Solanum melongena* L. seedlings to cadmium stress: Mechanism of toxicity amelioration by kinetin. *Scientia Horticulturae*. 2014;176:1-10.
 108. Skiryecz A, Inzé D. More from less: plant growth under limited water. *Curr Opin Biotechnol*. 2010;21:197-203.
 109. Solanki R, Dhankhar R. Biochemical changes and adaptive strategies of plants under heavy metal stress. *Biologia*. 2011;66(2):195-204.
 110. Šrámek V. SO₂ air pollution and forest health status in Northwestern Czech Republic. *Chemosphere*. 1998;36:1067-72.
 111. Stolt JP, Sneller FEC, Bryngelsson T, Lundborg T, Schat H. Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat. *Environ Exp Bot*. 2003;49:21-8.
 112. Szaro RC, Oszlányi J, Godzik B, Bytnerowicz A, eds. *Effects of Air Pollution on Forest Health and Biodiversity in Forests of the Carpathian Mountains*. Amsterdam: IOS Press; 2002.
 113. Taylor GJ. Current views of the aluminum stress response: The physiological basis of tolerance. *Curr Top Plant Biochem Physiol*. 1991;10:57-93.
 114. Tripathi AK, Gautam M. Biochemical parameters of plants as indicators of air pollution. *J Environ Biol*. 2007;28(1):127-32.
 115. Vacek S, Bílek L, Schwarz O, Hejzmanová P, Mikeska M. Effect of air pollution on the health status of spruce stands. *Mountain Res Develop*. 2013;33(1):40-50.
 116. Vranova E, Inze D, Van Breusegem F. Signal transduction during oxidative stress. *J Exp Bot*. 2002;53:1227-36.
 117. Wild A, Schmitt V. Diagnosis of damage to Norway spruce (*Picea abies*) through biochemical criteria. *Physiologia Plantarum*. 1995;93:375-82.
 118. Wójcik M, Vangronsveld J, D'Haen J, Tukiendorf A. Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens*. *Environ Exp Bot*. 2005;53:163-71.
 119. Xu J, Yin H, Li X. Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. *Plant Cell Rep*. 2009;28:325-33.
 120. Yadav G, Srivastava PK, Singh VP, Prasad SM. Light intensity alters the extent of arsenic toxicity in *Helianthus annuus* L. seedlings. *Biol Trace Element Res*. 2014;158:410-21.
 121. Zhang X, Xing Y, Wang Q, Yan G, Zhang J. Effects of long-term nitrogen addition and decreased precipitation on the fine root morphology and anatomy of the main tree species in a temperate forest. *Forest Ecol Manag*. 2020;455:117664.
 122. Zornoza P, Vazquez S, Esteban E, Fernandez-Pascual M, Carpena R. Cadmium-stress in modulated white lupine: strategies to avoid toxicity. *Plant Physiol Biochem*. 2002;40:1003-9.

БЛАГОДАРНОСТЬ РЕЦЕНЗЕНТАМ

Редакция журнала «Биосфера» и руководство ФНИ «XXI век» считают рецензирование рукописей важнейшим условием работы научных журналов и выражают глубокую признательность независимым специалистам, согласившимся помочь редколлегии в 2021 году:

- Абакумов Е.В.** докт. биол. наук, профессор, и. о. заведующего кафедрой прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета
- Кавеленова Л.М.** докт. биол. наук, заведующая кафедрой экологии, ботаники и охраны природы Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева
- Костина Н.В.** докт. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и управления экосистемами Института экологии Волжского бассейна РАН – филиала Самарского федерального исследовательского центра РАН
- Марарица В.Ф.** канд. филос. наук, директор Северо-Западного научно-производственного и туристического центра «Социум» (Мурманск)
- Муратов О.Э.** канд. техн. наук, член Общественного совета Госкорпорации «Росатом», ответственный секретарь Северо-Западного отделения Ядерного общества России, начальник отдела радиационных технологий ООО «ТВЭЛЛ», действительный член Академии наук экологии, безопасности человека и природы (Москва)
- Паутова И.А.** канд. биол. наук, старший научный сотрудник, научный куратор коллекций полезных растений и растений Северо-Запада России Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург)
- Покровский Ю.Г.** генеральный директор МИП «Фарматитан СПбГУ» Санкт-Петербургского государственного университета
- Припутина И.В.** канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пушино)
- Савинов Б.А.** канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры экологии Института биологии и биомедицины Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
- Сенатор С.А.** канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник Главного ботанического сада имени Н.В. Цицина РАН (Москва)
- Тихонов А.Н.** канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории териологии Зоологического института РАН (Санкт-Петербург)
- Суюндюков Я.Т.** академик наук Республики Башкортостан, докт. биол. наук, главный научный сотрудник Института стратегических исследований Республики Башкортостан (Уфа)
- Хабиров И.К.** докт. биол. наук, профессор кафедры почвоведения, агрохимии и точного земледелия Башкирского государственного аграрного университета (Уфа)

СВОДНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 13

Combined contents of volume 13

Стр.	ТЕОРИЯ / THEORY	Стр.	ПРИРОДА / NATURE
9-14	ЭНТРОПИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ГЕОСФЕР И МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ИХ СОСТОЯНИЯ О.В. Базарский, Ж.Ю. Кочетова <i>ENTROPY OF ABIOTIC GEOSPHERES AND A MODEL FOR ASSESSING AND FORECASTING THEIR STATES</i> <i>O.V. Bazarshkiy, Zh.Yu. Kochetova</i>	170-179	ОЦЕНКА УРОВНЯ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДА БИРОБИДЖАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ Д.М. Фетисов, Д.В. Жучков, М.В. Горюхин <i>ESTIMATING THE GREENNESS LEVEL OF BIROBIDZHAN CITY USING REMOTE SENSING DATA</i> <i>D.M. Fetisov, D.V. Zhuchkov, M.V. Goryukhin</i>
49-85	ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ НА ТЕКУЩЕМ ВЕКОВОМ ИНТЕРВАЛЕ Ю.Н. Сергеев, В.П. Кулеш, В.В. Дмитриев <i>THEORY AND PRACTICE OF ASSESSING THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION OF RUSSIA OVER THE CURRENT SECULAR INTERVAL</i> <i>Yu.N. Sergeev, V.P. Kulesh, V.V. Dmitriev</i>	180-187	ЭКОЛОГО-ФИТОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦВЕТКОВ БУЗИНЫ ЧЕРНОЙ <i>SAMBUCUS NIGRA</i> L. В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ Н.А. Виноградова <i>ECOLOGICAL AND PHYTOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF BLACK ELDERBERRY (<i>Sambucus nigra</i> L.) FLOWERS UNDER URBANIZED CONDITIONS</i> <i>N.A. Vinogradova</i>
150-159	КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СОЦИО-ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ) С.Д. Синюшкина, Н.И. Зазнобина, Д.Б. Гелашвили, И.Н. Калашников <i>INTEGRAL ANALYSIS OF THE CONDITIONS OF A REGIONAL SOCIO-ENVIRONMENTALLY-ECONOMIC SYSTEM EXEMPLIFIED WITH NISHEGORODSKAYA OBLAST</i> <i>S.D. Siniushkina, N.I. Zaznobina, D.B. Gelashvili, I.N. Kalashnikov</i>	86-100	ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 1. ВЛИЯНИЕ НА МАКРО- И МИКРОМОРФОЛОГИЮ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин <i>STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF WOODY PLANTS TO ANTHROPOGENIC ENVIRONMENTAL CHANGES: DAMAGE, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 1. EFFECTS ON THE MACRO- AND MICROMORPHOLOGY OF THE ASSIMILATION APPARATUS</i> <i>R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin</i>
15-20	ПРАКТИКА / PRACTICE АССОРТИМЕНТ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В АПТЕКАРСКИХ ОГОРОДАХ МОСКВЫ В XVII ВЕКЕ А.Н. Цицилин <i>ASSORTMENT OF MEDICINAL PLANTS IN THE PHARMACY GARDENS OF MOSCOW IN THE XVII CENTURY</i> <i>A.N. Tsitsilin</i>	101-119	ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 2. ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин <i>STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF WOODY PLANTS TO ANTHROPOGENIC ENVIRONMENTAL CHANGES: DAMAGE, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 2. EFFECTS ON PHYSIOLOGICAL FUNCTIONS</i> <i>R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin</i>
160-169	ПРОБЛЕМЫ АКТУАЛИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПРАКТИК В ЯМАЛО-НЕНЕЦКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ Е.В. Абакумов, Е.Н. Моргун <i>THE PROBLEMS OF UPDATING AGRICULTURAL PRACTICES IN THE YAMAL-NENETS AUTONOMOUS REGION</i> <i>Ye.V. Abakumov, Ye.N. Morgun</i>		

Стр.		Стр.	
188-205	<p>ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 3. ВЛИЯНИЕ НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ И КОРНЕВЫЕ СИСТЕМЫ Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин <i>STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF ARBOREAL PLANTS TO ANTHROPOGENIC FACTORS: DAMAGE, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 3. IMPACT ON THE RADIAL INCREMENT AND ON THE ROOTAGE</i> <i>R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin</i></p>	41-47	<p>ПРЕДТЕЧИ ВЫСШЕГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ (К ИСТОРИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА СПБГУ) К.М. Петров <i>THE FORERUNNERS OF THE HIGHER GEOGRAPHICAL EDUCATION IN RUSSIA (AS CONCERNS THE HISTORY OF GEOGRAPHY DEPARTMENT OF SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY)</i> <i>K.M. Petrov</i></p>
206-223	<p>ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 4. ВЛИЯНИЕ НА ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВЫРАБОТКУ АДАПТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ ДРЕВОСТОЕВ Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин <i>STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF ARBOREAL PLANTS TO ANTHROPOGENIC FACTORS: DAMAGE, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 4. IMPACT ON THE CONDITIONS AND THE DEVELOPMENT OF ADAPTIVE STRATEGIES OF FORESTS</i> <i>R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin</i></p>	138-145	<p>К СТОДЕСЯТИЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА В.И. РОЗЕНГАРТА – РОДОНАЧАЛЬНИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ БИОХИМИИ ФОСФОРОРГАНИЧЕСКИХ ИНГИБИТОРОВ ХОЛИНЭСТЕРАЗ Н.Е. Басова, Г.А. Оганесян, Е.В. Розенгарт <i>TO THE CENTENARY OF PROFESSOR V.I. ROZENGART - ONE OF THE FOUNDERS OF THE COMPARATIVE BIOCHEMISTRY OF ORGANOPHOSPHORUS INHIBITORS OF CHOLINESTERASES</i> <i>N.Ye. Basova, G.A. Oganesyanyan, Ye.V. Rozengart</i></p>
	ОБЩЕСТВО / SOCIETY		РЕЦЕНЗИИ И ДИСКУССИИ / VIEWS AND REVIEWS
120-137	<p>ПЕРСПЕКТИВЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ Р.М. Яковлев, И.А. Обухова <i>PROSPECTS FOR NUCLEAR ENERGETICS IN SECURING THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF RUSSIA</i> <i>R.M. Yakovlev, I.A. Obukhova</i></p>	146-149	<p>ИЗ ИСТОРИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГИИ: РЕЦЕНЗИЯ НА КНИГУ БАКАЭР Н. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ НАСЕЛЕНИЯ / РЕД. ПЕРЕВОДА: В.А. ВОЛЬПЕРТ, Д.М. ЭДИЕВ. ПАРИЖ, 2021. 190 С. Е.Я. Фрисман, Г.С. Розенберг <i>CONCERNING THE HISTORY OF MATHEMATICAL ECOLOGY: A REVIEW OF THE RUSSIAN TRANSLATION (ED. BY V.A. VOLPERT AND D.M. EDIYEV. PARIS, 2021) OF THE BOOK BY NICOLAS BACAËR «HISTOIRES DE MATHÉMATIQUES ET DE POPULATIONS»</i> <i>Ye.Ya. Frisman, G.S. Rozenberg</i></p>
	НАСЛЕДИЕ / HERITAGE		РЕДАКЦИОННЫЕ СТАТЬИ / EDITORIALS
21-40	<p>НАСЛЕДИЕ АКАДЕМИКА Л.А. ОРБЕЛИ: ИНСТИТУТУ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ФИЗИОЛОГИИ И БИОХИМИИ ИМ. И.М. СЕЧЕНОВА РАН 65 ЛЕТ Н.Е. Басова, А.И. Кривченко, Г.А. Оганесян, Е.В. Розенгарт <i>ACADEMICIAN L.A. ORBELI'S HERITAGE: THE 65 YEARS ANNIVERSARY OF I.M. SECHENOV INSTITUTE OF EVOLUTIONARY PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES</i> <i>N.Ye. Basova, A.I. Krivchenko, G.A. Oganesyanyan, Ye.V. Rozengart</i></p>	1-8	<p>СТРАТЕГИИ СОХРАНЕНИЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗНОГО МАСШТАБА: МЕЖДУНАРОДНЫЙ АСПЕКТ Г.С. Розенберг, Л.М. Кавеленова, Н.В. Костина, Н.В. Прохорова, А.Г. Розенберг <i>BIODIVERSITY PRESERVATION STRATEGIES IN TERRITORIES OF DIFFERENT SCALE RANKS: THE INTERNATIONAL ASPECT</i> <i>G.S. Rozenberg, L.M. Kavelenova, N.V. Kostina, N.V. Prokhorova, A.G. Rosenberg</i></p>



Подписано в печать **27.12.2021.**
Выход из печати **20.01.2022.**
Отпечатано в типографии «Лпринт»:
197374, Санкт-Петербург, ул. Сабировская, 37.
Тел.: **+7(812) 430-91-55.**
Тираж **700 экз.**
Цена свободная