

2021

Т. 13, № 3

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ
И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ



БИОСФЕРА

ISSN 2077-1371 / www.21bs.ru

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОЦЕНКИ
КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ
НА ТЕКУЩЕМ ВЕКОВОМ ИНТЕРВАЛЕ**

Ю.Н. Сергеев, В.П. Кулеш, В.В. Дмитриев

*THEORY AND PRACTICE OF ASSESSING
THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION
OF RUSSIA OVER THE CURRENT
SECULAR INTERVAL*

Yu.N. Sergeev, V.P. Kulesh, V.V. Dmitriev

**ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ**

**ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ,
АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ**

Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин

*STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES
OF WOODY PLANTS TO ANTHROPOGENIC
ENVIRONMENTAL CHANGES: DAMAGE,
ADAPTATIONS AND STRATEGIES*

R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin

**ПЕРСПЕКТИВЫ АТОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ**

Р.М. Яковлев, И.А. Обухова

*PROSPECTS FOR NUCLEAR ENERGETICS
IN SECURING THE ENERGY AND
ENVIRONMENTAL SAFETY OF RUSSIA*

R.M. Yakovlev, I.A. Obukhova

**ИЗ ИСТОРИИ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГИИ**

Е.Я. Фрисман, Г.С. Розенберг

*CONCERNING THE HISTORY
OF MATHEMATICAL ECOLOGY*

Ye.Ya. Frisman, G.S. Rozenberg



ФОТО: PEXELS.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, № 3

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. 3

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: Ю.С. Братишко

DESIGN: Y.S. Bratishko

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. Pereskokov

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)
Б.В. Гайдар (С.-Петербург) B.V. Gaidar (Saint Petersburg)
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

А3

СОДЕРЖАНИЕ
CONTENTS

ТЕОРИЯ / THEORY

49

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ НА ТЕКУЩЕМ ВЕКОВОМ ИНТЕРВАЛЕ
Ю.Н. Сергеев, В.П. Кулеш, В.В. Дмитриев
THEORY AND PRACTICE OF ASSESSING THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION OF RUSSIA OVER THE CURRENT SECULAR INTERVAL
Yu.N. Sergeev, V.P. Kulesh, V.V. Dmitriev

ПРИРОДА / ПРИРОДА

86

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
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
R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin

101

ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 2. ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ.
Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин
STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF WOODY PLANTS TO ANTHROPOGENIC ENVIRONMENTAL CHANGES: DAMAGE, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 2. EFFECTS ON PHYSIOLOGICAL FUNCTIONS
R.V. Urazgildin, A.Yu. Kulagin



ОБЩЕСТВО / HERITAGE

120

ПЕРСПЕКТИВЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ
Р.М. Яковлев, И.А. Обухова
PROSPECTS FOR NUCLEAR ENERGETICS IN SECURING THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF RUSSIA
R.M. Yakovlev, I.A. Obukhova

НАСЛЕДИЕ / HERITAGE

138

К СТОДЕСЯТИЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА В. И. РОЗЕНГАРТА – РОДОНАЧАЛЬНИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ БИОХИМИИ ФОСФОРОРГАНИЧЕСКИХ ИНГИБИТОРОВ ХОЛИНЭСТЕРАЗ
Н.Е. Басова, Г.А. Оганесян, Е.В. Розенгарт
TO THE CENTENARY OF PROFESSOR V.I. ROZENGART - ONE OF THE FOUNDERS OF THE COMPARATIVE BIOCHEMISTRY OF ORGANOPHOSPHORUS INHIBITORS OF CHOLINESTERASES
N.Ye. Basova, G.A. Oganesyanyan, Ye.V. Rozengart

РЕЦЕНЗИИ И ДИСКУССИИ / VIEWS AND REVIEWS

146

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
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»
Ye.Ya. Frisman, G.S. Rozenberg



ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ НА ТЕКУЩЕМ ВЕКОВОМ ИНТЕРВАЛЕ

Ю.Н. Сергеев, В.П. Кулеш*, В.В. Дмитриев

Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: VPKulesh@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; принята к печати 27.08.2021

Целью работы является разработка и реализация работоспособных моделей оценки качества жизни населения (КЖН) России, основанных на статистической теории распознавания образов. В состав задач входят: 1) конструирование алфавита классов, алгоритмически связанного с пространством классификационных признаков КЖН и их градаций (описание классов на языке признаков); 2) выбор репрезентативных признаков оценки КЖН России (составление словаря признаков); 3) формулировка и реализация серии работоспособных статистических моделей оценки КЖН России (построение алгоритмов распознавания); 4) определение классов КЖН России на различных этапах внешнеполитического и социально-экономического развития страны; 5) разработка алгоритма выбора оптимального критерия распознавания КЖН из совокупности критериев и ранжирование этой совокупности по степени пригодности критериев для практического использования. Предложен алгоритм системы распознавания КЖН, включающей обучающую и распознающую подсистемы с различными критериями распознавания образов: средним арифметическим, средним геометрическим, средним взвешенным по факторам смертности и средним взвешенным по значимости признаков качества жизни. Предложен алгоритм оптимального выбора критерия распознавания КЖН. Для оценки КЖН использованы материалы социально-экономического и экологического мониторингов Царской России, СССР и Российской Федерации за период 1910–2015 годов. Показано, что репрезентативные признаки КЖН России отличаются от признаков, принятых в «Индексе развития человеческого потенциала»: ожидаемой при рождении продолжительности жизни, валового национального дохода на душу населения, ожидаемых лет обучения и средних лет обучения населения. Репрезентативными для России признаками КЖН являются уровни питания и медицинского обслуживания населения и загрязнения природной среды. Оптимальным является алгоритм оценки КЖН, использующий среднее взвешенное по значимости признаков качества жизни и среднее взвешенное по основным факторам смертности населения. Предложенная методика оценки КЖН, по-видимому, применима ко всем странам, входящим в Содружество Независимых Государств, возникших после распада СССР.

Ключевые слова: качество жизни, модели распознавания образов, репрезентативные показатели, Россия.

THEORY AND PRACTICE OF ASSESSING THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION OF RUSSIA OVER THE CURRENT SECULAR INTERVAL

Yu.N. Sergeev, V.P. Kulesh*, V.V. Dmitriev

Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Email: VPKulesh@gmail.com

The objective of the present work is to develop and evaluate workable models for assessing population life quality (PLQ) in Russia based on the statistical theory of pattern recognition. To this end, the following tasks have been done: 1) developing of an alphabet of classes, which is algorithmically associated with the space of classification characteristics of PQL and gradations thereof (description of classes using characteristics vocabulary); 2) selecting of representative characteristics for assessing PLQ in Russia; 3) formulating and implementing of a series of workable statistical models for assessing PLQ in Russia (construction of recognition algorithms); 4) determining of PLQ classes at different stages of the foreign-policy and domestic socioeconomic development of Russia; and 5) developing of an algorithm for choosing an optimal criterion for PQL estimation out of a range of such criteria and for ranking the criteria according to their practical suitability. The suggested algorithm for PLQ recognition system includes training and recognition subsystems using various pattern recognition criteria: arithmetic mean, geometric mean, weighted mean for mortality factors and weighted mean for significance of life quality parameters. An algorithm for optimal selection of PLQ recognition criteria is proposed. To implement the selection of PLQ, a range of data reflecting the socioeconomic and environmental monitoring of the Russian Empire, the USSR and the Russian Federation in 1910 through 2015 were used. It is shown that the representative characteristics of PLQ in Russia differ from those adopted in the Human Development Index, i.e. life expectancy at birth, per capita gross national income, and expected years of schooling and average years of schooling. The PLQ characteristics representative for Russia are the levels of nutrition and health care and of the pollution of freshwater reservoirs and watercourses. The PLQ assessment algorithms using the weighted mean across the significance of life quality parameters and the weighted mean across the main factors of population mortality proved to be optimal. Apparently, the proposed methodology for assessing PLQ must be applicable to all member states of the Commonwealth of Independent States that emerged after the collapse of the USSR.

Keywords: quality of life, pattern recognition models, representative indicators of the quality of life, Russia.

Волны словно волкодавы... ты такой двадцатый век!
Вправо – влево, влево – вправо, вверх – вниз, вниз – вверх...
Качка!

Все инструкции разбиты, все портреты тоже – вдрызг.
Лица мертвенны, испиты, под кормой – крысиный визг.
А вокруг сплошная каша, только крики на ветру.

Только качка, качка, качка, только мерзостно во рту.

Евгений Евтушенко, «Качка»

Введение

Понятие социально-экологической системы

Категория «качество жизни населения (КЖН)» в иерархии понятий занимает подчиненное место. Старшей по отношению к ней категорией является «социально-экологическая система страны (СЭСС)». СЭСС можно определить так:

$СЭСС = \text{биотоп} + \text{биоценоз} + \text{население} + \text{социосфера} + \text{экономика}$.

Между этими двумя категориями существует причинно-следственная связь. Качество жизни в значительной степени зависит от существующего в государстве способа производства – исторически определенного способа добывания материальных благ, необходимых людям для производственного и личного потребления и, по Л.Н. Гумилеву [7], «логички событий».

Орудия производства и люди, обслуживающие их, образуют производительные силы общества. Развитие производительных сил лимитируется законом падения природно-ресурсного потенциала. Природно-ресурсный потенциал – это способность природных систем без ущерба для себя отдавать необходимую человечеству продукцию или производить полезную для него работу в рамках хозяйства данного исторического типа [15]. Согласно закону падения природно-ресурсного потенциала, в пределах одной общественно-экономической формации и одного типа технологии природные ресурсы становятся все менее доступными и требуют увеличения энергетических затрат на их добычу. Развитие производительных сил происходит относительно плавно до момента резкого истощения природно-ресурсного потенциала. Далее наступает экологический кризис, который разрешается путем революционного изменения производительных сил – путем научно-технической и промышленной революции.

Определенные общественные отношения людей в процессе производства материальных благ называются производственными отношениями. Это необходимые, не зависящие от воли людей отношения, которые соответствуют определенной степени развития производительных сил. Противоречие между производи-

тельными силами и производственными отношениями приводит к социально-экономическому кризису. Этот кризис разрешается в ходе социальной революции.

Из закона соответствия производственных отношений уровню развития производительных сил, с одной стороны, и закона падения природно-ресурсного потенциала – с другой, следует, что эколого-экономическое развитие общества определяется динамической формулой [15]:

$(\text{Природно-ресурсный потенциал}) \Leftrightarrow (\text{Производительные силы общества}) \Leftrightarrow (\text{Производственные отношения})$.

Эта формула показывает неразрывную связь между экологическими, экономическими и социальными процессами, происходящими в обществе.

Произошедший в России в 1992 году переход от социализма к стихийному капитализму – это инверсия, которая не может продолжаться долго. Капитализм – это экономическая система производства и распределения материальных благ, основанная на частной собственности, юридическом равенстве и свободе предпринимательства. Главным критерием для принятия экономических решений является стремление к увеличению капитала, к получению прибыли при минимальных издержках. Стихийные рыночные процессы разрушительны для общества и природы. Поэтому рыночная экономика нуждается в регулировании. Эту функцию выполняет государство посредством правового, финансового и социального регулирования. В ряде стран, и в России в частности, государство не справляется с возложенными на него функциями по сдерживанию рыночной стихии. В 1990-е годы, в эпоху первоначального накопления капитала благоденствовали те владельцы фирм, банков и чиновники государственного аппарата, которые нарушали законы цивилизованного рынка. Эти нарушения приводили к разбалансировке экономики страны и ухудшению качества жизни населения. Смешанная экономика – это экономическая система, которая включает как частную и корпоративную, так и общественную и государственную собственность на средства производства. Сейчас практически не осталось стран только лишь с рыночной или с плановой (командной) экономикой. Любая современная экономика имеет элементы как рыночной, так и плановой экономики. Обратимся, например, к опыту строительства социализма в Китае.

В.В. Оленев и А.П. Федоров в статье «Глобалистика на пороге XXI века» утверждают, что «задачу создания управляемого, жизнеспособного мироустройства можно решить лишь на основе управляемой, плановой социально-экономической системы типа “экологического социализма”» [13].

Факторы, определяющие не общее направление социально-исторического процесса, а его своеобразные «зигзаги», – индивидуальные проявления на различных территориях. Л.Н. Гумилев [7] называет «логикой событий». Эти факторы отражают короткие цепочки причинно-следственных связей в социально-экологических процессах высшего ранга. «Логика событий» во многом определяется личностью (личностями), принимающей государственные решения (ЛПР). В теории принятия решений, исследовании операции, системном анализе ЛПР – это субъект решения, наделенный определенными полномочиями и несущий ответственность за последствия принятого и реализованного управленческого решения. Необходимые отличительные черты ЛПР: высокий уровень компетентности; достаточный объем полномочий; опыт; интуиция; профессиональные навыки.

Терминология. В литературе, посвященной оценке КЖН, обычно без каких-либо комментариев используются термины «параметры, индикаторы и показатели качества жизни», «признак качества жизни» и т. п. Но эти термины не синонимы. Это различные понятия. Для разъяснения их сущности обратимся к «Экономико-математическому словарю» Л.И. Лопатникова [10].

Показателем (index, index figure, activity indicator, environmental indices) называют выраженную числом **характеристику** какого-либо свойства природного объекта, процесса или решения. Показатели могут быть: средними, предельными, объемными, безразмерными, относительными, *интегральными* и т. п. **Признак** (attribute, feature, mark) – неоднозначная, способная изменяться величина, **характеризуемая в процессе исследования**. **Критерий** (criterion) – это **признак**, на основании которого проводятся: 1) оценка состояния объекта или его свойства; 2) классификация объектов, явлений, свойств; 3) сравнение альтернатив (возможных вариантов решения задачи); 4) сравнение адекватности различных решений при моделировании. Слово *параметр* не является синонимом слов *признак* и *показатель*. Оно имеет совершенно другой смысл. **Параметр** – это **величина**, постоянная в пределах данного явления или задачи, но при переходе к другому явлению или задаче могущая изменить свое значение. Слово *индикатор* в одном контексте с понятиями *признак* и *показатель* – это вульгаризм. Строго говоря, **индикатор** – это прибор, устройство, информационная система, вещество, объект, отображающий изменения какого-либо параметра контролируемого процесса.

Термины *показатель* и *признак* используются в основном тексте статьи именно в смысле, указанном

в словаре. Во «Введении», в разделе «Оценки качества жизни населения» оставлена терминология, использованная авторами литературных источников.

Оценки качества жизни населения

Термин «качество жизни населения» был предложен Дж. Гэлбрейтом [29] в книге «Общество изобилия». Автор определял качество жизни как предоставляемую развитым индустриальным обществом возможность потребления благ и услуг, характеризующих стиль и образ жизни через *экономические показатели*. Таким образом, на первом этапе исследований использующаяся в экономике категория «уровень жизни» и термин КЖН практически не различались. С развитием производства стало очевидно, что категория «уровень жизни» не отражает всесторонне благосостояние населения. Устойчивый экономический рост материального благосостояния населения вызвал одновременно ряд новых нежелательных явлений, таких как ухудшение экологической обстановки, усиление социальной напряженности и др. Пришло осознание того, что экономический рост не может служить единственным мерилем прогресса и благосостояния общества. Необходимо также обеспечить население хорошей социальной и экологической средой.

Весомый вклад в формирование категории КЖН, с точки зрения необходимости учета социальных индикаторов, внесло появление монографии Р. Бауэра [25]. Позднее многие исследователи трактовали КЖН как сложное, комплексное многокомпонентное понятие, но эта сложность рассматривалась ими в различных аспектах. Одни авторы определяли КЖН через систему духовных, материальных, социокультурных, экологических и демографических показателей жизни. Другие говорили о КЖН как об интегральном понятии, всесторонне характеризующем степень и уровень комфортности общественной и природной среды для жизни, трудовой деятельности человека; как уровень благосостояния, социального, духовного и физического здоровья человека [4, 27, 28]. Практически все сходились в том, что существующие трактовки понятия «качество жизни» весьма многочисленны и неоднозначны, а следовательно, и подходы к его измерению или оценке у разных исследователей различны.

Наиболее известно определение КЖН, данное Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ)¹: «Качество жизни – это восприятие индивидуумом своего положения в жизни в контексте систем культуры и ценностей, в которых они живут, и их целей, ожиданий, стандартов и проблем. Это широкая концепция, на которую сложным образом влияют физическое здоровье, психологическое состояние, личные убеждения, социальные отношения и их связь с характерными особенностями окружающей среды».

¹ <https://www.who.int/tools/whoqol>

В наши дни «качество жизни» – термин, широко применяемый в экологии человека и социальной экологии и выражающий степень удовлетворения материальных и культурных потребностей людей – качество питания, комфорт жилища, качество образования, здравоохранения, сферы обслуживания, окружающей природной среды и структуры рекреации, модность одежды, степень удовлетворения потребностей в объективной информации, уровень стрессовых состояний и т. п.

История оценки КЖН России значительно короче, чем за рубежом. В российской литературе лишь в последние годы проблемы оценки и измерения качества жизни стали объектом рассмотрения. Произошло это, во-первых, потому что качество жизни объявлено стратегической целью развития российского государства; во-вторых, актуальной стала проблема оценки эффективности социальной политики.

В 1992 году указом Президента Российской Федерации от 02.03.1992 № 210 был введен новый агрегированный социальный норматив – бюджет прожиточного минимума (БПМ). Он представлял собой показатель объема и структуры потребления важнейших материальных благ и услуг на минимально допустимом уровне, обеспечивающем условия поддержания активного физического состояния взрослых, социального и физического развития детей и подростков. Бюджет прожиточного минимума рассчитывался в среднем на душу населения или на семью, для основных социально-демографических групп населения: трудоспособного населения (мужчины в возрасте от 16 до 59 лет и женщины в возрасте от 16 до 54 лет), пенсионеров, детей до 6 лет, подростков 15–17 лет.

В современной России постепенно вырабатывается единый подход к методике оценки качества жизни. Государственная работа по определению, регламентации и реализации качества жизни ведется, прежде всего, через законодательное введение стандартов (индексов) качества жизни, которые обычно включают несколько блоков комплексных индикаторов [18].

Всероссийский центр уровня жизни разработал систему социальных стандартов качества жизни [3], которая включала в себя: 1) качество общества; 2) качество населения; 3) качество потребительской жизни (уровень жизни); 4) качество трудовой и предпринимательской жизни; 5) качество социальной инфраструктуры; 6) личную безопасность; 7) удовлетворенность людей качеством своей жизни.

Всероссийский центр изучения общественного мнения (ВЦИОМ) в 2008 году предложил группу индексов качества жизни, основанных на субъективных суждениях населения: «индекс удовлетворенности жизнью», «индекс социального оптимизма», «индекс оценок экономической ситуации», «индекс самооценок материального положения». Чем выше значение

индекса, тем выше и оптимистичнее оценки респондентов.

Некоммерческая организация «Фонд поддержки инновационных программ в социальной сфере “Социальная инноватика”» предложила свой обобщенный показатель – «индекс качества жизни» и провела исследование «Качество жизни регионов России». Показатель включал в себя 3 группы только субъективных факторов (2–5 уровней обобщения данных) [14].

С.А. Айвазян предлагает интегральный показатель качества жизни, основанный на использовании 21 признака качества [1]. И это не предел. Известна система рейтингов РИА². Рейтинг российских регионов по качеству жизни оценивается по данным Росстата, Минздрава, Минфина, Центробанка и других открытых источников. Он построен на основе комплексного учета показателей, фиксирующих состояние различных аспектов условий жизни и ситуаций в социально-экономической сфере. При расчете *анализируются 70 показателей*, которые объединены в 11 групп: уровень доходов населения, занятость населения и рынок труда, жилищные условия населения, безопасность проживания, демографическая ситуация, экологические и климатические условия, здоровье населения и уровень образования, обеспеченность объектами социальной инфраструктуры, уровень экономического развития, уровень развития малого бизнеса, освоенность территории и развитие транспортной инфраструктуры. Утопическая вера в возможность наиболее адекватного отражения объекта изучения, свойственная исследователям этого направления, привела к появлению модельных «монстров», затрудняющих понимание и унификацию методов оценки КЖН.

То же происходит и в оценке состояния и качества окружающей человека природной и антропогенно-трансформированной среды. В одном из обширных современных зарубежных обобщений, посвященных обзору имеющейся литературы (более 1500 исследований) по индексам, разработанным для оценки «территориальных детерминант» с точки зрения охраны окружающей среды, авторами выявлены 23 пространственно-распределенных композитных индекса, в основу которых заложена информация о 329 переменных. Это разнообразие, с точки зрения авторов, характеризует отсутствие «общей основы» и «может привести к сильной субъективности и ограничению возможности сопоставления различных оценочных результатов» [28].

Если признать, что КЖН является эмерджентным свойством СЭСС, то станут понятными две вещи. Во-первых, что на сегодняшний день проблема оценки качества жизни, уровня жизни и др. не нашла завершеного теоретического воплощения ни в одной из общественных наук, то есть данную категорию сле-

² <https://riarating.ru/regions/>

дует считать, как иногда пишут, не «эkleктичной», а междисциплинарной. И во-вторых, что оценка КЖН на основе покомпонентного и комплексного подходов чаще всего обречена на неудачу, поскольку рассматриваемое системное свойство не сводится к состоянию отдельно взятого компонента или их совокупности. Эмерджентным (интегративным, сложным) свойством социосистемы является свойство, присущее системе в целом или ее подсистемам. И в этом смысле подходы, рассмотренные в «Докладе о человеческом развитии 2014»³, рано или поздно будут поняты мировым сообществом в качестве рекомендаций для признания и разработки оценочных концепций уязвимости и жизнестойкости социосистем и их сложных свойств (таких как КЖН). Но это, скорее, явится продолжением авторских идей и методик, изложенных в данной статье.

Заметим, что категория «качество жизни населения (КЖН)» не является единственной в иерархии понятий, занимающей подчиненное место и обладающей эмерджентным свойством. Другими категориями являются, например, «менталитет населения (этноса)», «социально-экологическая система страны» (СЭСС) и др. Национальный менталитет – это глубинные структуры культуры, определяющие на протяжении длительного времени этническое своеобразие населения. Это постоянная система ценностей, сформированная определенным этносом, этносистемой.

Наиболее известным, используемым в Мире объективным показателем, оценивающим КЖН в разных странах, является предложенный экспертами ВОЗ индекс человеческого развития «The Human Development Index» (HDI)⁴. Несомненным достоинством этого индекса является его лаконизм. В нем используются всего четыре признака человеческого развития. Этим же свойством обладают: Inequality-adjusted Human Development Index (IHDI), Gender-Related Development Index (GDI), Gender Inequality Index (GII).

Сказанное свидетельствует о том, что качество жизни – это неоднозначная характеристика, нуждающаяся в информационной и алгоритмической конкретизации. По существу, речь идет о *выборе модели категории «качество жизни населения»*, способной отображать, воспроизводить и замещать собой объект исследования. Такие модели рассматривались, например, в работах [20, 31]. При этом должен соблюдаться один из основных принципов системного анализа, состоящий в том, что при моделировании сложных систем и их свойств следует учитывать не все, а только наиболее существенные компоненты, признаки и связи системы-оригинала [2]. Степень упрощения системы должна быть ровно такой, чтобы количество

включенных в нее признаков качества жизни, с одной стороны, было минимально необходимым для описания наблюдаемых явлений. С другой стороны, оно должно быть достаточным для того, чтобы входящие в модель КЖН признаки предполагали четкую и понятную, согласующуюся с повседневной логикой интерпретацию. Одновременно решается проблема мультиколлинеарности факторов, которая искажает результаты интегральной оценки.

В связи со сказанным отметим еще одно направление исследований, ориентированных на поиск пути к повышению КЖН. В его основе только один *интегральный показатель* – ожидаемая при рождении продолжительность жизни населения (ОПЖН). Зависимость ОПЖН от валового национального продукта на душу населения (ВНП) известна как «кривая Престона» [35].

«Кривая Престона отражает как минимум три обстоятельства: 1) ОПЖ растет при увеличении ресурсов, доступных для обеспечения жизни; 2) ОПЖ не может расти бесконечно, сколько бы ресурсов на это не употреблялось, поэтому по мере увеличения ВНП рост ОПЖ замедляется; 3) с учетом разброса точек вокруг кривой Престона получается, что ОПЖ существенно зависит не только от ресурсов, доступных для поддержания жизни, но и от условий их расходования. При всей, казалось бы, банальности таких выводов статья Престона 1975 года процитирована в мировой научной литературе около полутора тысяч раз» [6].

В нашей стране кривая Престона впервые была упомянута и использована в статье [5], где сопоставлены выбросы парниковых газов (главным образом CO₂) и ОПЖН в различных странах. При этом выбросы CO₂ рассматриваются как признаки антропогенной нагрузки на окружающую среду.

В статье «Куда нас выводит кривая Престона» [6] сделан вывод, что «повышение ВНП и расходов на здравоохранение на душу населения в РФ не может само по себе вывести ОПЖ на заявленный в качестве национального приоритета уровень не ниже 80 лет, если не ликвидировать диспропорции, ставящие фундаментальные препятствия на пути к этой цели».

Общая организация систем распознавания качества жизни

Распознавание КЖН – это типичная задача классификации и идентификации различных явлений, процессов и ситуаций. Алгоритм распознавания можно представить в виде абстрактной системы R , состоящей из трех элементов:

$$R = \{A, S, P\},$$

где $A = \{A_k\}$, $k = 1, 2, \dots, K$ – алфавит классов; $S = \{S_j\}$, $j = 1, 2, \dots, n$ – словарь признаков; $P = \{P_m\}$, $m = 1, 2, \dots, M$ – множество правил принятия решений (*алгоритмов или критериев распознавания*).

³ http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr14_a_full_rus_21-01-15_0.pdf

⁴ http://hdr.undp.org/sites/default/files/2016_human_development_report.pdf

Элементы A , S представляют собой информационную часть системы, а P – методическую. Информационная часть представляет собой, во-первых, градуированный набор классов КЖН (множество A) и, во-вторых, набор временных рядов признаков КЖН (множество S) – то есть уровней питания, здравоохранения и т. д. Работа системы состоит в следующем: на ее вход подается образ – некоторая последовательность из элементов множества S , к ней применяется последовательность правил из множества P (критериев распознавания), полученному результату присваивается индекс, соответствующий одному из элементов множества A [24].

Системы распознавания подразделяются на системы без обучения, с обучением и самообучающиеся системы. В системах без обучения предполагается,

что имеющаяся информация и выбранный принцип распознавания позволяют безошибочно разделить и определить все необходимые классы. «В системах с обучением процедура обучения обычно выполняется специалистом-аналитиком данных. Любые процедуры классификации с обучением более трудоемки, и качество распознавания иногда больше зависит от личного опыта аналитика данных и понимания им сути поставленной задачи, чем от эффективности самого алгоритма распознавания» [24].

Распознавание КЖН России выполнено с помощью именно такой системы. Общая схема построения системы распознавания образов показана на рис. 1. Читатель найдет в статье все этапы этой схемы применительно к системе распознавания качества жизни населения.

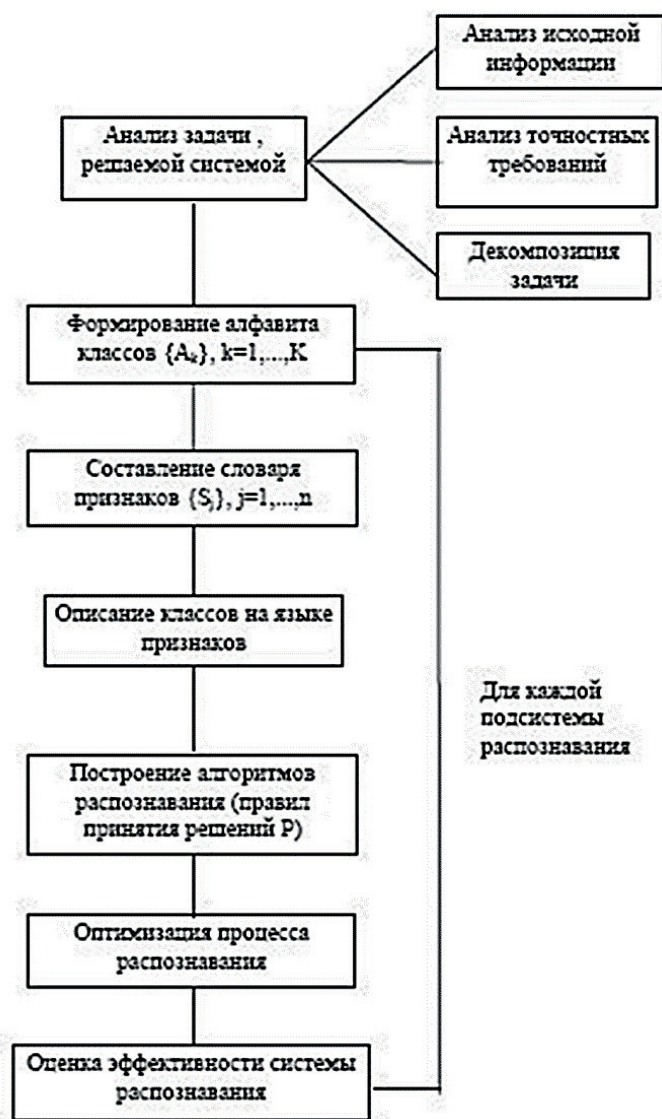


Рис. 1. Общая схема системы распознавания образов [22]

1. Цель и задачи исследования

Цель исследования. Разработка и апробация авторского подхода к оценке качества жизни населения (КЖН) России, основанного на статистической теории распознавания образов.

Задачи исследования. В перечень задач включены: 1) конструирование алфавита классов, алгоритмически связанного с пространством классификационных признаков и их градаций (описание классов на языке признаков); 2) выбор репрезентативных признаков оценки качества жизни населения России (составление словаря признаков); 3) формулировка и реализация серии работоспособных статистических моделей оценки качества жизни населения России (построение алгоритмов распознавания); 4) определение классов качества жизни населения России на различных этапах внешнеполитического и социально-экономического развития страны; 5) разработка алгоритма выбора оптимального критерия распознавания качества жизни населения из совокупности критериев и ранжирования этой совокупности по степени пригодности критериев для практического использования.

Перечисленные задачи работы могли бы быть оформлены в виде отдельных полноценных статей, что увеличило бы публикационную активность авторов. Но в этом случае была бы утрачена целостность изложения материала. Поэтому сравнительно большой объем данной статьи рекомендуется рассматривать как признак целостности с иллюстрацией апробации авторских представлений об оценке КЖН России, обозначенных в задачах исследования и названии статьи.

Генезис этапов и задач исследования. Оценка КЖН в странах мира в сущности представляет собой *классификационную задачу*, предполагающую использование некоторого *алфавита классов*. В Докладе о развитии человека Human Development Report, 2016, для большинства государств мира приводятся таблицы временной изменчивости «The Human Development Index» (HDI) – аналога понятия «качество

жизни населения». При этом HDI страны оценивается по шкале, градуированной от 0 до 1, то есть без указания принадлежности к какому-либо классу. *Понятие «класс» в модели HDI не используется.* В частности, из доклада следует, что HDI в России в период 1990–2015 годов изменялся от 0,733 до 0,804 (табл. 1). Много это или мало по абсолютной величине, существенна или нет временная изменчивость индекса? Об этом можно судить только косвенно или приближенно сопоставлением HDI России с HDI государств-«эталонов». В качестве «эталонов» выберем наиболее развитые в экономическом отношении страны мира. Из табл. 1 следует, что различия по HDI между Россией и другими государствами невелики. Россия в конце XX – начале XXI столетия относилась к странам с «very high human development».

Заметим, что такая оценка относится к периоду распада СССР, перехода РФ от плановой к стихийной рыночной экономике, когда КЖН России катастрофически снизилось. Между тем, согласно HDI, КЖН России в 2000 году, в самый разгар кризиса, было ненамного ниже, чем в Германии в 1990 году. Таким образом, выявляется первый этап исследования – *выбор алфавита классов КЖН, позволяющего определить положение России по этому показателю среди стран мира.*

Причина несоответствия оценок КЖН фактической ситуации в РФ, по нашему мнению, объясняется нерепрезентативностью для России признаков оценки, используемых в HDI: валового национального продукта на душу населения (ВНД), ожидаемой продолжительностью обучения (EYoS), средней продолжительностью обучения (MYoS) (идентификаторы, принятые в Human Development Report, 2016). Эти признаки являются репрезентативными для большинства стран, особенно для развивающихся государств Африки, Латинской Америки, Средней и Юго-Восточной Азии, в которых проживает большая часть населения мира. Как будет показано далее, для России и

Табл. 1

Временная изменчивость HDI России и ряда экономически развитых стран мира

Страны	1990	2000	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Норвегия	0,849	0,917	0,938	0,941	0,942	0,945	0,948	0,949
Германия	0,801	0,860	0,912	0,916	0,919	0,920	0,924	0,939
Канада	0,849	0,867	0,903	0,907	0,909	0,912	0,919	0,920
США	0,860	0,884	0,910	0,913	0,915	0,916	0,918	0,920
Швеция	0,815	0,877	0,901	0,903	0,904	0,906	0,909	0,913
Япония	0,814	0,856	0,884	0,889	0,894	0,899	0,902	0,903
Россия	0,733	0,720	0,785	0,792	0,799	0,803	0,805	0,804

Источник: http://hdr.undp.org/sites/default/files/2016_human_development_report.pdf

для стран, входящих в Союз Независимых Государств (СНГ), образовавшихся после распада СССР, такие признаки нельзя признать репрезентативными. Возникает необходимость следующего этапа исследования – *выбора репрезентативных признаков и их градаций, обеспечивающих адекватную оценку КЖН России.*

Алгоритм определения HDI представляет собой среднее геометрическое нормированных признаков КЖН. Он не является единственно возможным. Требуется *выбрать статистическую модель распознавания КЖН, адекватно отображающую логику событий, произошедших в России в XX – начале XXI века.*

2. Выбор репрезентативных для России признаков качества жизни

2.1. Признак «валовой национальный доход на душу населения»

Одной из острых проблем, возникших в России вследствие экономических реформ, являлась беспрецедентная по своим масштабам поляризация доходов в обществе, которая не имеет аналогов ни в одной из экономически развитых стран мира. Расслоение населения на богатейших и беднейших происходило настолько быстро, что сегодня можно говорить о существовании «двух России». Для гармонически развитых стран коэффициент дифференциации доходов 10% наиболее и 10% наименее обеспеченного населения не должен превышать 6. «В середине 1980-х годов *децильный коэффициент* для России составлял 3,3, а для Чехословакии и того меньше – 2,52». «Самый низкий децильный коэффициент наблюдается в Скандинавских странах – Дании, Финляндии и *Швеции* – 3–4»⁵.

В России децильный коэффициент в 1995 году был равен 13,5. К 2007 году он вырос до 16,8. При этом наиболее высокая по уровню доходов дифференциация существует в Москве и Санкт-Петербурге. Здесь различие в доходах населения в 3 и более раза превышает аналогичный показатель по России в целом. По данным Министерства труда, в конце 1990-х годов самые бедные в России составляли 40–50%, а просто «бедные» – 30–35% населения. За чертой бедности оказались прежде всего пенсионеры. В 1992 году минимальная пенсия составляла 85% от прожиточного минимума, а к 1999 году – только 45%⁶. *Приведенные цифры, по нашему мнению, убедительно свидетельствуют, что использующийся в HDI признак ВНД не является репрезентативным для оценки КЖН России, особенно в период перехода от плановой экономики к рыночной.*

⁵ <https://urait.ru/bcode/450576>

⁶ http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/

2.2. Признак «уровень образования населения»

Известно, что уровень образования – одна из важнейших характеристик качества жизни населения. Он является неотъемлемой частью культурного уровня, необходимой предпосылкой формирования кадрового потенциала страны. Индикатором образовательной структуры СССР и России являлась грамотность. Уровень неграмотности в Российской империи на рубеже XIX–XX веков был одним из самых высоких в Европе. Около 75% населения, согласно переписи 1897 года, не умели читать и писать. После революции борьба с неграмотностью стала первоочередной задачей советской власти. По всей стране была создана система школ всех типов для разноязычных народов. Было введено обязательное для всех детей обучение в школе, организованы курсы по ликвидации неграмотности для людей старших возрастов.

Согласно переписи 2002 года, из 1000 жителей страны в возрасте от 15 лет и старше 920 человек имели среднее и высшее образование⁷.

Очевидно, что в период перехода от плановой к стихийной рыночной, а затем к смешанной (планово-рыночной) экономике высокие значения показателей EYoS и MYoS, свойственные России и странам СНГ, заглушают и нивелируют негативные эффекты, связанные с разрушением экономики и диспропорцией в распределении доходов населения. Для пояснения нашей точки зрения по этому вопросу решим следующую задачу.

Будем полагать, что индекс HDI вычисляется не по 4, а по 2 признакам КЖН – валовому национальному продукту на душу населения (ВНД) и средней продолжительности обучения населения (MYoS). Такое предположение не изменяет сути проблемы, но облегчает ее понимание и сокращает объем вычислений.

Обозначим через x (в %) число личностей, получивших среднее и высшее образование, а через y – коэффициент дифференциации доходов 10% наиболее и 10% наименее обеспеченного населения (децильный коэффициент). Примем, что $x_{min} = 1,0\%$ населения Царской России, $x_{1980} = 67\%$ населения СССР, $x_{1995} = 92\%$, а $x_{max} = 96\%$ населения РФ в 2007 году. Примем также, что $y_{min} = 3,0$ – децильный коэффициент населения Швеции, $y_{1980} = 4,4$, $y_{1995} = 13,7$, а $y_{max} = 129$ – децильный коэффициент населения Намибии в 2010 году⁸.

Нормирование децильных коэффициентов на интервале [0, 1] выполним по формуле:

$$S_n = \begin{cases} \frac{y_n - y_{min}^0}{y_{max}^0 - y_{min}^0}, & y_n \leq y_{min} \\ 1, & y_{min} < y_n \leq y_{max} \\ y_n > y_{max} \end{cases}$$

где y_n , y_{min} , y_{max} – значения децильных коэффициентов.

⁷ <http://www.demoscope.ru/weekly/2011/0491/perep01.php>

⁸ GDP based on purchasing-power-parity (PPP) per capita.

Получим: $S_{1980} = \frac{1,4}{126} = 0,01$; $S_{1995} = \frac{11}{126} = 0,09$.

Нормирование числа личностей, получивших среднее и высшее образование, на интервале $[0, 1]$ выполним по той же формуле с формальной заменой y на x и S на S^* .

Получим $S_{1980}^* = \frac{66}{95} = 0,69$; $S_{1995}^* = \frac{91}{95} = 0,96$. Теперь вычислим интегральные показатели с учетом равновесности параметров по формуле:

$$D_{(S_n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N=2} S_n.$$

Получим: $D_{(1980)} = 0,35$; $D_{(1995)} = 0,52$.

Сравнение интегрального показателя $D_{(1995)} = 0,52$ с аналогичным показателем $D_{(2000)} = 0,72$, вычисленным экспертами ВОЗ (см. табл. 1), несмотря на принятые нами допущения, свидетельствует об их близости. Но посмотрите, какой парадокс! Индекс HDI в 1995 году на 33% выше, чем в 1980-м. Это означает, что в лихолетье 1990-х годов КЖН России, классифицируемое экспертами ВОЗ как «very high human development», было существенно выше, чем в СССР 1980-х годов!

Предположим теперь, что в 1995 году децильный коэффициент остался таким же, каким был в 1980-м. Вычислим интегральный показатель. Получим: $D_{(1995)}^* = 0,26$.

Разность интегральных показателей $D_{(2002)}$ и $D_{(2002)}^*$ показывает эффект затушевывания высоким образованием населения, произошедшего в 90-е годы разрушения экономики и связанной с ним возникновением диспропорции в распределении доходов людей:

$$D_{(1995)}^A = D_{(1995)} - D_{(1995)}^* = 0,52 - 0,26 = 0,26.$$

Таким образом, эффект затушевывания высоким образованием населения, произошедшего в 1990-е годы разрушения экономики, составляет 50% от диспропорции в распределении доходов людей!

2.3. Показатели «ожидаемая продолжительность жизни» и «смертность населения»

Показатель «ожидаемая продолжительность жизни». Из совокупности демографических характеристик в HDI используется только одна – ожидаемая при рождении продолжительность жизни населения (ОПЖН). Н.Ф. Реймерс определяет качество жизни как «совокупность условий, обеспечивающих (или не обеспечивающих) комплекс здоровья человека – личного и общественного, то есть соответствие среды жизни человека его потребностям, *интегрально отражаемое средней продолжительностью жизни*» [15]. Этот показатель представляет собой сложную функцию многих переменных и постоянно действующих признаков (факторов). Некоторые признаки оказывают практически мгновенное воздействие на показатель ОПЖН. Другие воздействуют не в исходном, а в сглаженном по времени виде с некоторым запаздыванием. При этом величина лага может достигать 15–

20 лет – времени становления репродуктивной зрелости очередного поколения [25].

Очевидно, что ОПЖН является **репрезентативным показателем** КЖН всех государств, включая Россию и страны, входящие в СНГ. Например, в России в период перехода от плановой к рыночной экономике в 1990–1994 годах она сократилась с 69,2 до 63,9 лет. За 9 лет с 1992 по 2002 год естественная убыль населения в стране составила 6,82 млн человек⁹. Однако этот **интегральный показатель** имеет один существенный недостаток. Он не позволяет дифференцировать воздействие отдельных переменных и постоянно действующих признаков (факторов) на КЖН, тем самым не способствуя лицам, принимающим решения (ЛПР), осознанно вводить те или иные дифференцированные меры, направленные на улучшение качества жизни.

Интегральный показатель ОПЖН целесообразно использовать для характеристики КЖН в том случае, когда может быть указан перечень входящих в него признаков (например, таких, как уровни питания и медицинского обслуживания населения, уровень загрязнения окружающей среды). Образно говоря, речь идет о некоторой «узловой точке» модели оценки КЖН. Такой «узловой точкой» является *конструирование алфавита классов, алгоритмически связанного с пространством классификационных признаков и их градаций (описание классов на языке признаков)*, рассматриваемое в разделе 3.2 статьи.

Показатель «смертность населения». Смертность тесно связана с ОПЖН через таблицы дожития. Так же как ОПЖН, смертность является **интегральным показателем**. Опубликовано множество исследований, в которых дается оценка смертности от различных причин, например [30, 36]. В работе [30] приводятся оценки смертности по 249 конкретным причинам в 195 странах и территориях с 1980 по 2015 год. Под причинами понимаются различные виды заболеваний населения, то есть *медицинские признаки показателя «смертность населения»*.

При всем богатстве медицинской статистики, в ней отсутствует информация об *экономических, социальных и экологических признаках показателя «смертность населения»*. Такие признаки Б.Ц. Урланис называет факторами смертности. В его монографии [19] приводятся данные о распределении по причинам смерти и факторам смертности 56 млн человек во всем мире в 1975 году (рис. 2). В соответствии с этими данными, в мире на долю эндогенного возрастного фактора смертности – естественного старения – приходится только 20,7% смертей. Главнейшими экзогенными факторами смертности являются: голод и недоедание (23,4%), уровень медицинского обслуживания (17,5%) и состояние окружающей среды (6,4%).

⁹ http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1137674209312

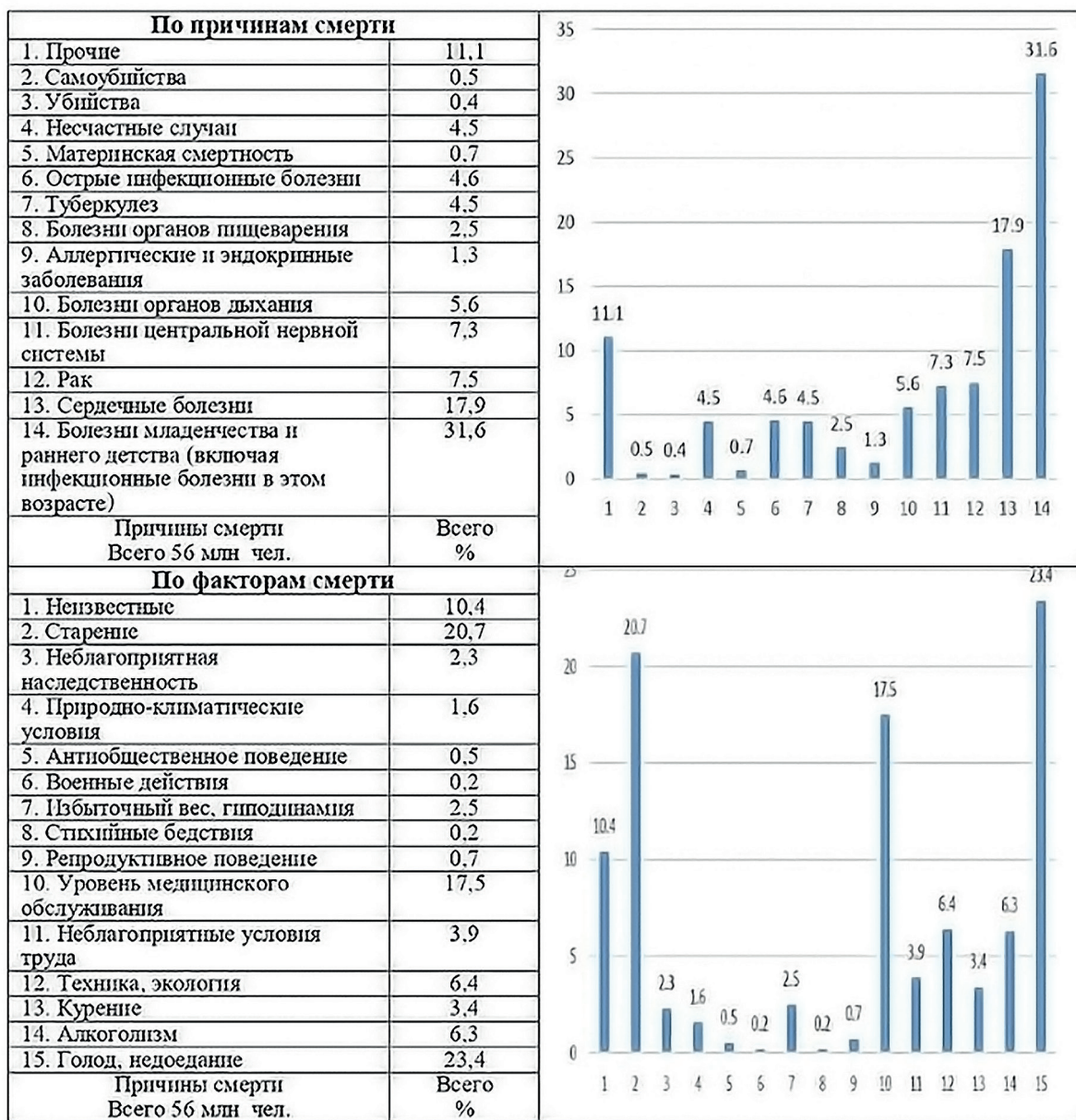


Рис. 2. Распределение умерших во всем мире в 1975 году по причинам и факторам смерти, по данным [19]

На долю всех остальных факторов приходится только 32% смертей.

В качестве статистических вероятностей встречаемости признаков показателя смертности населения России примем данные мировой статистики для уровня питания населения, уровня медицинского обслуживания, уровня загрязнения окружающей среды. *«Если уровни питания и медицинского обслуживания слишком низкие, а загрязнение окружающей среды слишком высокое, то большинству людей придется погибнуть или влачить очень жалкое существование»* [19]. Какая тут может быть оценка качества жизни

ни, определяемая по 70 признакам, принятым в системе рейтингов РИА?

2.4. Рождаемость как индикатор качества жизни населения

Рождаемость – это сложная функция многих переменных. Главнейшими из них являются: половой состав репродуктивной группы населения; мужская и женская фертильность; качество жизни населения, а точнее ее материальная составляющая. Большое значение имеют степень уверенности людей в завтрашнем дне и доступность средств контрацепции.

Фертильностью называют способность половозрелого населения производить жизнеспособное потомство. Отвлекаясь от специфической биологической составляющей фертильности, сосредоточимся на рассмотрении ее социальной составляющей.

Объективные показатели рождаемости. Роль рождаемости как индикатора КЖН России удобно рассматривать по временной изменчивости ее относительных показателей: общего и суммарного коэффициентов рождаемости населения. За время «перестройки» и «стихийного рынка» (1987–2000) общий коэффициент рождаемости упал с 17,2 до 8,3‰ (рождений на 1000 человек), а суммарный коэффициент – с 2,19 до 1,17 (рождений среднестатистической женщиной за фертильный период). И это при норме суммарного коэффициента рождаемости, обеспечивающей простое воспроизводство населения, приблизительно равной 2,1! В совокупности с показателем смертности это уникальное для мирного времени явление получило название «Русский крест» (рис. 3). За время перехода к планово-рыночной экономике (2000–2014) эти коэффициенты возросли с 8,7 до 13,3‰ и с 1,21 до 1,75 соответственно.

Заметим, что в новой истории страны «русский крест» в 1991–1993 годах был не первым и, по-видимому, не стал последним. Первый «крест» датируется 1941–1943 годами. Он связан с экстремально высокой смертностью и низкой рождаемостью населения СССР во время Великой Отечественной войны.

Вывод: коэффициенты рождаемости населения являются важными репрезентативными индикаторами качества жизни в период непродуманных экономических реформ 1987–2000 годов, приведших к затянувшимся глубоким экономическому и демографиче-

скому кризисам. Заметим, что это произошло в конце третьей фазы демографического перехода населения страны, характеризующейся в нормальных условиях низкой смертностью и низкой рождаемостью.

В условиях стабильно развивающейся экономики репрезентативность индикатора «рождаемость населения» не очевидна. В нем тесно переплетены материальное и идеальное, часто действующие разнонаправлено, вопреки инстинкту самосохранения биологического вида.

Заметим, что в XX веке население России, кроме «перестройки» и «лихих девяностых», постоянно терзали экономические неурядицы: разруха и голод во время Первой мировой и Гражданской войн, коллективизация сельского хозяйства. Но эти неурядицы происходили в первой половине XX века, в период второй фазы демографического перехода населения, характеризующейся повышенной рождаемостью и быстро снижающейся смертностью. Тем самым, неурядицы затухевывались естественными демографическими процессами.

Субъективные показатели рождаемости.

В 2009 году Росстатом было выполнено выборочное обследование «Семья и рождаемость» в 30 субъектах России, представляющих все федеральные округа¹⁰. Опрос респондентов проводился в период устойчивого роста тренда экономики страны, имевшего место в период 2000–2014 годов. Результаты обследования показали наличие обратной связи между качеством жизни населения и рождаемостью в период роста экономики (табл. 2). Это явление в демографии известно под названием «парадокса обратной связи».

¹⁰ https://www.gks.ru/free_doc/2010/family.htm

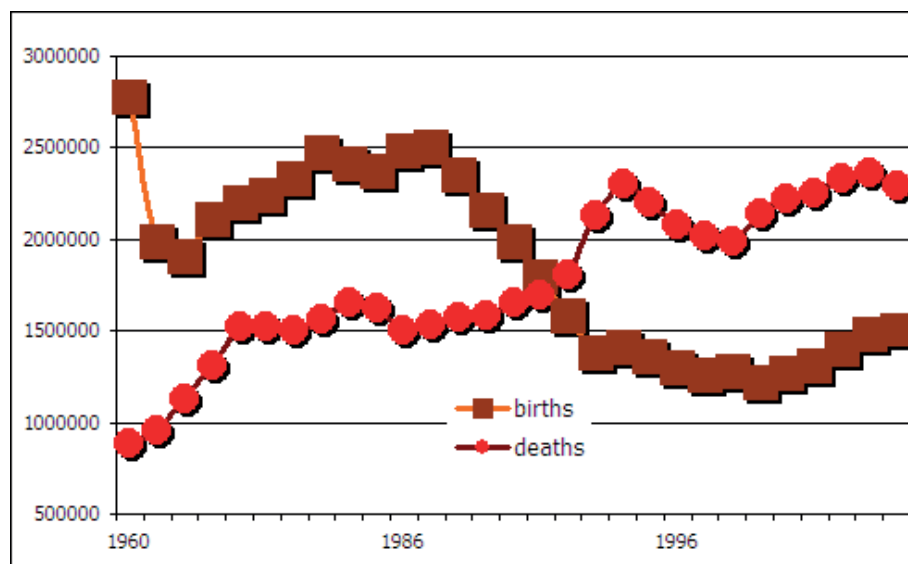


Рис. 3. «Русский крест»: график показателей рождаемости и смертности населения России (<http://demography.ru/xednay/demography/data/bd19602004.html>)

Табл. 2

Среднее желаемое и ожидаемое числа детей в зависимости от оценки уровня жизни¹⁰

Оценка уровня жизни (в баллах)	Среднее желаемое число детей		Среднее ожидаемое число детей	
	Женщины	Мужчины	Женщины	Мужчины
0–30	2,47	2,48	1,74	1,86
40–60	2,25	2,37	1,70	1,90
70–100	2,18	2,31	1,76	1,94

Табл. 3

Оценки помех к рождению желаемого числа детей у женщин (в %)¹⁰

Если вы хотели бы иметь большее число детей, чем собираетесь, то что и в какой степени мешает вам иметь желаемое число детей?	Очень мешает	Мешает	Не мешает
Материальные трудности	47,8	37,2	15,0
Неуверенность в завтрашнем дне	44,5	37,6	17,9
Жилищные трудности	33,3	29,3	37,4
Отсутствие мужа/партнера	23,0	15,9	61,1
Отсутствие работы	22,5	24,8	52

Особенно заметно «парадокс обратной связи» проявился у женщин. У них при низкой оценке качества жизни населения (0–30 баллов по 100-балльной шкале) желаемое число детей, в среднем, составило 2,47, а при высокой (70–100 баллов) – 2,18.

У мужчин эти показатели соответственно равны 2,48 и 2,31. В отношении ожидаемого числа детей «парадокс обратной связи» у мужчин и женщин практически не наблюдался.

Опрос респондентов о том, как влияют на желаемую рождаемость материальные трудности, неуверенность в завтрашнем дне и отсутствие работы, показал, что эти факторы имеют решающее значение. Материальные трудности служат препятствием для деторождения у 85% опрошенных женщин и мужчин. Неуверенность в завтрашнем дне препятствует увеличению семьи у 82,1% женщин и 83,1% мужчин, а отсутствие работы – у 47,3% женщин и 46,7% мужчин (табл. 3).

Таким образом, рождаемость не может рассматриваться в качестве репрезентативного признака качества жизни на длительных временных интервалах.

3. Методика исследования

3.1. Многофакторные модели качества жизни

Анализ исходной информации, выполненный с целью выбора репрезентативных для населения России признаков качества жизни, позволяет записать в общем виде модель, характеризующую временную изменчивость КЖН:

$$k(t) = \varphi[F(t), \bar{b}(t), Z(t)], \quad (1)$$

где $k(t)$ – качество жизни населения; $F(t)$, $\bar{b}(t)$ – признаки уровней питания и медицинского обслуживания населения; $Z(t)$ – признак загрязнения окружающей среды; φ – функция совокупного влияния признаков на КЖН; t – время.

В биологии [21] и системной экологии [14] используются три вида моделей, предназначенных для *приближенного* представления функции многих переменных (1): « Σ », «L» и «M» – модели. Рассмотрим их применительно к моделированию ОПЖН как функции n факторов. Введем обозначения: $L(c_1, c_2, \dots, c_n)$ – ОПЖН, зависящая от факторов c_1, c_2, \dots, c_n ; $\Psi(c_i)$ – функция, характеризующая степень воздействия на ОПЖН фактора c_i .

Σ -модель ОПЖН. Ее можно использовать в том случае, когда факторы не взаимодействуют между собой. В таком случае эффекты воздействия факторов аддитивны (складываются) и модель определяется выражением:

$$L(c_1, c_2, \dots, c_n) \approx \Psi(c_1) + \Psi(c_2) + \dots + \Psi(c_n). \quad (2)$$

Заметим, что в плановой экономике факторы, воздействующие на ОПЖН, слабо взаимосвязаны через государственный бюджет при распределении финансовых потоков. В стихийной рыночной экономике такая связь сводится к минимуму.

L-модель ОПЖН. Она основана на использовании «закона минимум Либиха». L-модель ОПЖН определяется выражением:

$$L(c_1, c_2, \dots, c_n) \approx \min[\Psi(c_1), \Psi(c_2), \dots, \Psi(c_n)]. \quad (3)$$

У этой модели есть недостаток. Рост ОПЖН под воздействием некоторого фактора происходит до тех пор, пока другой не становится лимитирующим. При этом *ответ ОПЖН на действие предыдущего фактора изменяется скачком (мгновенно) от некоторого значения до нуля.*

М-модель ОПЖН. В ее основе лежит «принцип Митчерлиха»: заданное увеличение одного фактора должно вызывать не один и тот же *абсолютный эффект*, не зависящий от уровня других факторов, как это имеет место в модели (2), а одно и то же *относительное* (процентное) изменение всех действующих факторов. М-модель ОПЖН определяется выражением:

$$L(c_1, c_2, \dots, c_n) \approx \Psi(c_1) \cdot \Psi(c_2) \cdot \dots \cdot \Psi(c_n). \quad (4)$$

Заметим, что сопоставление данных натуральных экспериментов с результатами расчетов по М-модели, выполненное Хардером, показало их близость [21].

Ожидаемой продолжительности жизни населения мира, как интегральному показателю КЖН, соответствует М-модель, предложенная [28] в глобальной модели развития «Мир-3»:

$$L = S \cdot L_F \cdot L_\sigma \cdot L_z \cdot (1 - L_I L_P), \quad (5)$$

где: $S = 28$ лет – ожидаемая продолжительность жизни в традиционной сельской цивилизации; $L_F = L_F(F)$ – функция влияния уровня питания F на продолжительность жизни; $L_\sigma = L_\sigma(\sigma)$ – функция влияния уровня медицинского обслуживания σ ; $L_z = L_z(Z)$ функция влияния уровня загрязнения окружающей среды Z ; $L_I = L_I(I)$ – функция влияния уровня промышленного производства I ; $L_P = L_P(P)$ – функция влияния уровня урбанизации P .

Рассмотрим упрощенную М-модель ОПЖН:

$$L = S \cdot L_F \cdot L_\sigma \cdot L_z. \quad (6)$$

Это упрощение не препятствует пониманию предполагаемого подхода к определению границ зон КЖН. Выражение (6) перепишем в виде $L = S \cdot k$, где:

$$k = L_F \cdot L_\sigma \cdot L_z. \quad (7)$$

Здесь k – качество жизни населения.

Эмпирические графики функций влияния $L_F = L_F(F)$, $L_\sigma = L_\sigma(\sigma)$, $L_z = L_z(Z)$ приводятся в монографии [31].

3.2. Алфавит классов, признаки и градации признаков качества жизни

Примем, что алфавит классов КЖН состоит из шести классов. Назовем их зонами оптимального КЖН, нормального КЖН и слабого, умеренного, сильного и летального угнетения КЖН. Для определения границ этих зон по уравнению (6) примем следующие обозначения и параметры: $L^{(t)}$ – ожидаемая продолжительность жизни, соответствующая левой границе зоны оптимума ($L^{(t)} = 85$ лет); $L^{(t+\Delta t)}$ – ожидаемая продолжительность жизни, соответствующая правой границе зоны оптимума ($L^{(t+\Delta t)} = 100$ лет). Заметим, что значения $L^{(t)}$ и $L^{(t+\Delta t)}$ принимаются по усмотрению исследователя; $L_F^{(t)}$, $L_\sigma^{(t)}$, $L_z^{(t)}$ – искомые значения функций влияния, соответствующие левым границам зон оптимального качества жизни; $L_F^{(t+\Delta t)}$, $L_\sigma^{(t+\Delta t)}$, $L_z^{(t+\Delta t)}$ – значения функций влияния, соответствующие правым границам зон оптимального качества жизни. Эти значения считаются известными и определяются по функциям L_F , L_σ , L_z ,

представленным в графической форме на рис. 4.

Задача нахождения границ зон КЖН формулируется как определение трех неизвестных $L_F^{(t+\Delta t)}$, $L_\sigma^{(t+\Delta t)}$, $L_z^{(t+\Delta t)}$ по одному уравнению. Это некорректно поставленная задача. Для ее решения необходимо принять некоторые дополнительные гипотезы. Возможны несколько таких гипотез и, следовательно, несколько способов решения задачи. Один из них рассматривается в нашей статье [9]. Он основан на использовании правдоподобной гипотезы о равном вкладе в относительное изменение продолжительности жизни относительных изменений трех функций влияния. Здесь рассмотрим второй способ.

Запишем очевидное следствие из уравнения (6):

$$\frac{L^{(t+\Delta t)}}{L^{(t)}} = \left(\frac{L_F^{(t+\Delta t)}}{L_F^{(t)}} \cdot \frac{L_\sigma^{(t+\Delta t)}}{L_\sigma^{(t)}} \cdot \frac{L_z^{(t+\Delta t)}}{L_z^{(t)}} \right). \quad (8)$$

Задачу определения границ зон качества жизни можно решить из соотношения (8) с привлечением гипотезы о равенстве сомножителей, стоящих в его правой части:

$$\frac{L_F^{(t+\Delta t)}}{L_F^{(t)}} = \frac{L_\sigma^{(t+\Delta t)}}{L_\sigma^{(t)}} = \frac{L_z^{(t+\Delta t)}}{L_z^{(t)}} = T, \quad (9)$$

где T – параметр.

С учетом равенств (9) соотношение (8) запишем в виде:

$$\frac{L^{(t+\Delta t)}}{L^{(t)}} = T^3, \quad (10)$$

или

$$T = \sqrt[3]{\frac{L^{(t+\Delta t)}}{L^{(t)}}}. \quad (11)$$

С учетом соотношения (9) окончательно получим:

$$\frac{L_F^{(t+\Delta t)}}{L_F^{(t)}} = \frac{\sqrt[3]{L^{(t+\Delta t)}}}{\sqrt[3]{L^{(t)}}}, \quad (12)$$

$$\frac{L_\sigma^{(t+\Delta t)}}{L_\sigma^{(t)}} = \frac{\sqrt[3]{L^{(t+\Delta t)}}}{\sqrt[3]{L^{(t)}}}, \quad (13)$$

$$\frac{L_z^{(t+\Delta t)}}{L_z^{(t)}} = \frac{\sqrt[3]{L^{(t+\Delta t)}}}{\sqrt[3]{L^{(t)}}}. \quad (14)$$

Эти пропорции позволяют найти значения функций влияния, соответствующие левым границам зон оптимального, нормального и угнетенного качества жизни. Заметим, что найденные таким образом значения функций $L_F^{(t)}$, $L_\sigma^{(t)}$, $L_z^{(t)}$ соответствуют также правым границам зон нормального качества жизни.

Задача определения значений функций влияния соответствующих левым границам зон нормального качества жизни решают также с помощью пропорций (12), (13), (14) при следующих параметрах: $L^{(t+\Delta t)} = 85$ лет, $L^{(t)} = 70$ лет. Значения функций влияния $L_F^{(t+\Delta t)}$, $L_\sigma^{(t+\Delta t)}$, $L_z^{(t+\Delta t)}$, соответствующие правым границам зон нормального качества жизни, принимаются равными значениям $L_F^{(t)}$, $L_\sigma^{(t)}$, $L_z^{(t)}$ функций влияния, соответствующим уже определенным левым границам зон оптимума.

На первый взгляд может показаться, что результаты, полученные при использовании различных гипо-

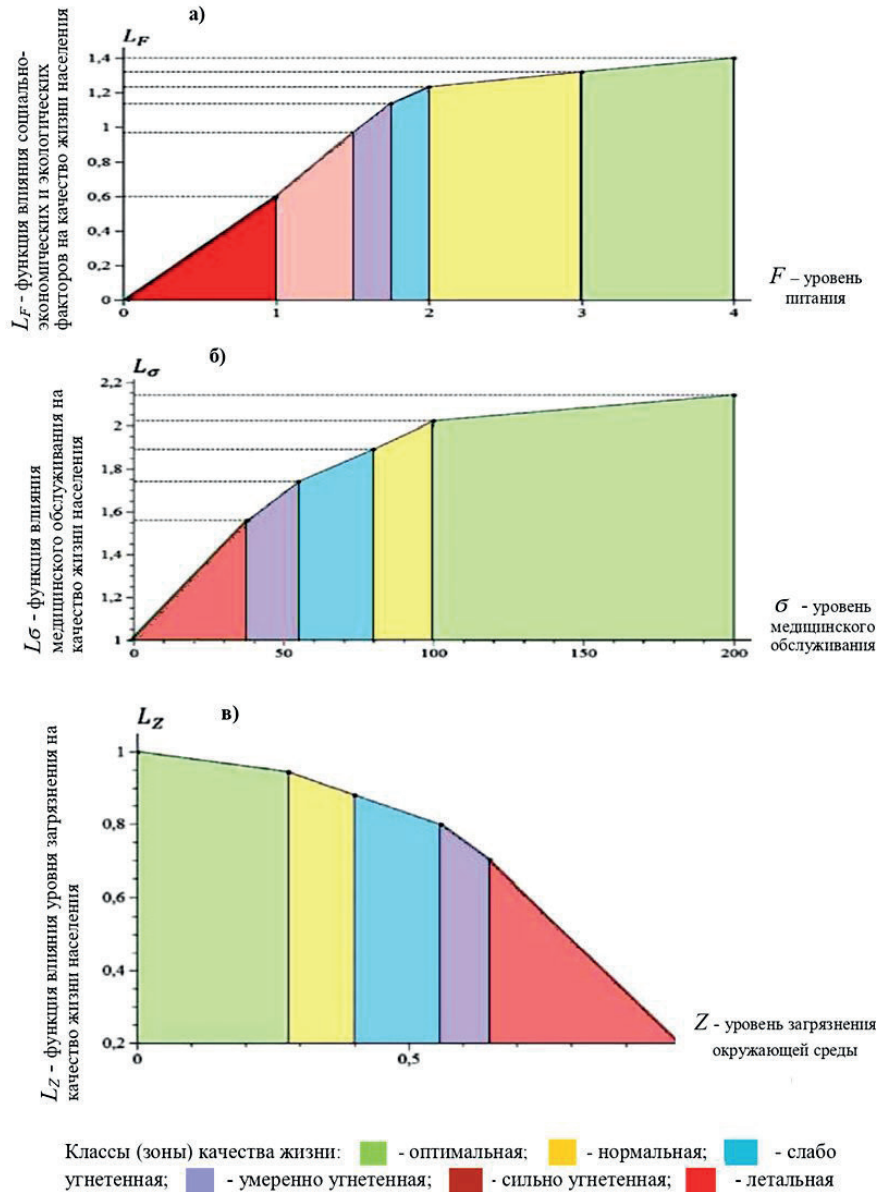


Рис. 4. Функции влияния социально-экономических и экологических факторов на качество жизни населения [31]; классы (зоны), признаки и градации признаков качества жизни: а) уровень питания F в единицах физиологического прожиточного минимума (2130 ккал/чел. сутки); б) уровень медицинского обслуживания σ в долларах США в ценах 1910 года; в) уровень загрязнения окружающей среды Z , нормированный от 0 до 1

тез, должны различаться не только по форме, но и по величине. Однако это не так. При малых значениях x выполняется приближенное равенство:

$$\sqrt[3]{1+x} \approx 1 + \frac{1}{3}x. \quad (15)$$

В рассматриваемом случае:

$$x = \frac{\Delta L^{(i)}}{L^{(i)}}. \quad (16)$$

Таким образом, малость x обеспечена. Именно поэтому с точностью до величин более высокого порядка малости относительно x решения, полученные двумя различными способами, совпадают. Используя графиче-

ческие зависимости $L_F = L_F(F)$, $L_\sigma = L_\sigma(\sigma)$, $L_Z = L_Z(Z)$, по найденным значениям функций $L_F^{(i)}$, $L_\sigma^{(i)}$, $L_Z^{(i)}$ нетрудно определить границы градации признаков оптимального, нормального, угнетенного качества жизни в пространстве независимых аргументов F , σ , Z . Границы градаций признаков будем в дальнейшем называть также границами зон качества жизни (табл. 4, рис. 4).

Совпадение трех основных признаков КЖН (формула 7), принятых в модели глобального развития «Мир 3» Д. Медоуза, и в таблице факторов смерти, приведенной в монографии Б.Ц. Урланиса [19], не случайно.

Границы зон качества жизни населения в пространстве социально-экологических показателей

Зоны качества жизни	ОПЖН	Уровень питания		Уровень медицинско-го обслуживания		Уровень загрязнения водной среды	
		L_F	F	L_σ	σ	L_Z	Z
Летальная	–	0–0,60	0–1,00	–	–	–	–
Сильного угнетения	20–40	0,600–1,017	1,00–1,50	1,0–1,559	0–38	0,200–0,701	0,65–1,00
Умеренного угнетения	40–55	1,017–1,135	1,50–1,75	1,559–1,740	38–55	0,701–0,798	0,56–0,65
Слабого угнетения	55–70	1,135–1,234	1,75–2,00	1,740–1,890	55–80	0,798–0,855	0,40–0,56
Нормальных условий	70–85	1,234–1,320	2,00–3,00	1,890–2,020	80–100	0,855–0,944	0,28–0,40
Оптимальных условий	85–100	1,320–1,400	3,00–4,00	2,020–2,140	100–200	0,944–1,000	0,00–0,28

В модели глобального развития «Мир 2» Дж. Форрестера [20] для имитации КЖН также используется сложная функция $QG = Q0 \cdot QC \cdot QR \cdot QF \cdot QZ$. Здесь: $Q0$ – стандартное качество жизни; QC – функция влияния материального уровня на качество жизни $QC = QC(C)$; QR – функция влияния плотности населения на качество жизни $QR = QR(PP)$; QF – функция влияния уровня питания на качество жизни населения $QF = QF(FP)$; QZ – функция влияния удельного загрязнения природной среды на качество жизни $QZ = QZ(ZP)$.

Общепризнанный мэтр экологии Ю. Одум [34] пишет: «У человека, по-видимому, имеются две возможности. Первая состоит в том, чтобы допустить неограниченный рост населения, который будет продолжаться до тех пор, пока плотность не превысит известные пределы (пища, ресурсы, загрязнения и т. п.). После этого большинству людей придется погибнуть или влачить очень жалкое существование до тех пор, пока не снизится плотность». Таким образом, во многих весьма известных и авторитетных исследованиях в качестве репрезентативных признаков КЖН мира (а не только России) используются: уровни питания, медицинского обслуживания и уровень загрязнения окружающей среды. Эти признаки, имеющие отношение ко всему человечеству, и не учитываются в индексе HDI.

Еще одно замечание касается гипотезы о равном вкладе в относительное изменение продолжительности жизни относительных изменений функций влияния $L_F = L_F(F)$, $L_\sigma = L_\sigma(\sigma)$, $L_Z = L_Z(Z)$ и гипотезы о равенстве сомножителей

$$\left(\frac{L_F^{(\tau + \Delta\tau)}}{L_F^{(\tau)}} \cdot \frac{L_\sigma^{(\tau + \Delta\tau)}}{L_\sigma^{(\tau)}} \cdot \frac{L_Z^{(\tau + \Delta\tau)}}{L_Z^{(\tau)}} \right).$$

Поскольку обе гипотезы приводят к одинаковому результату, есть надежда на их справедливость.

3.3. Система распознавания качества жизни населения России

В основу системы положен *метод сводных показателей* [12, 21, 22]. Она относится к классу систем распознавания с обучением (рис. 5).

Выбор и реализация системы такого класса обусловлен следующим.

1. Категория «качество жизни» не однозначна.
2. Вместо не существующих «эталонов» качества жизни вводятся алфавиты классов, алгоритмически связанные с пространством признаков и их градациями, учитывающие «вес» каждого из признаков в формировании КЖН.
3. Связь алфавитов классов с алгоритмами распознавания КЖН осуществляется в обучающей и распознающей системах.
4. Эффективности работы алгоритмов распознавания оцениваются путем качественного сравнения результатов решения задач с действительностью и ретроспективной или по более сложной схеме, которую мы здесь не рассматриваем. Оценка может выполняться с помощью предложенного *алгоритма выбора оптимального варианта решения задачи с различными критериями распознавания*.

Алгоритм системы распознавания КЖН запишем в общем виде для R градаций (зон) и t характеристик временного ряда социально-экологического мониторинга.

3.3.1. Входная информация системы распознавания

1. На вход системы поступают R зон каждого из N признаков КЖН. В системе распознавания КЖН России принято $R = 5$, $N = 3$.

2. Формируется матрица нормированных зон классификационных признаков.

Нормирование элементов матрицы на интервале $[0, 1]$ осуществляется по формуле:

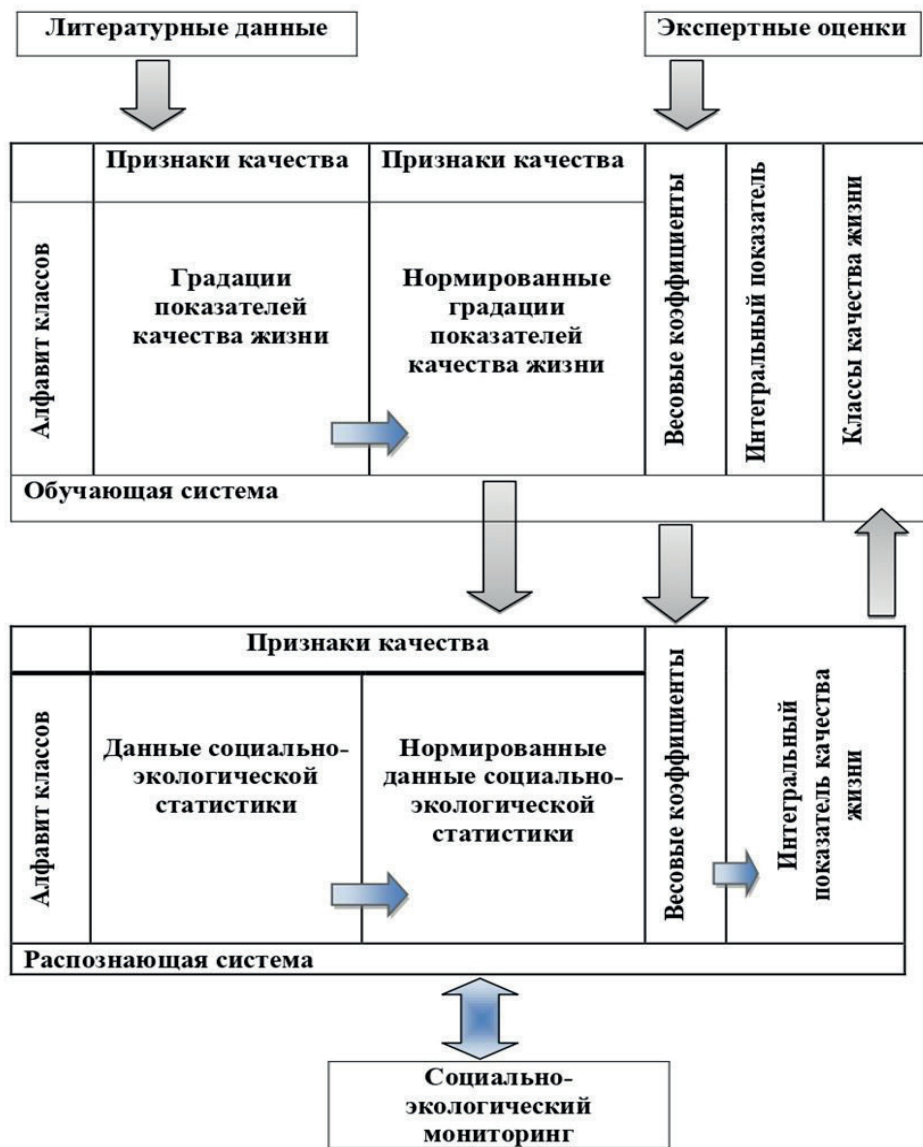


Рис. 5. Схема организации системы распознавания качества жизни населения России (стрелками указаны потоки информации в системе)

Табл. 5

Нормированные границы зон качества жизни

Зона качества жизни	Уровень питания	Уровень медицинского обслуживания	Уровень загрязнения окружающей среды
	F^*	σ^*	Z^*
Зона сильного угнетения	0,00–0,17	0,00–0,19	0,65–1,00
Зона умеренного угнетения	0,17–0,25	0,19–0,28	0,56–0,65
Зона слабого угнетения	0,25–0,33	0,28–0,40	0,40–0,56
Зона нормальных условий	0,33–0,67	0,40–0,50	0,28–0,40
Зона оптимальных условий	0,67–1,00	0,50–1,00	0,00–0,28

Табл. 6

$$S_n = S_n(y_n^{(r)}) = \begin{cases} 0, & y_n \leq y_{min} \\ \frac{y_n - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}, & y_{min} < y_n \leq y_{max} \\ 1, & y_n > y_{max} \end{cases} \quad (17)$$

где y_n, y_{min}, y_{max} – значения элементов матрицы градаций классификационных признаков.

Признак «Уровень загрязнения окружающей среды», изменяющийся на интервале [0, 1], не нормируется.

Результаты выполнения процедуры нормирования зон КЖН иллюстрируется в табл. 5.

3. На вход системы поступает m значений характеристики социально-экологического мониторинга для каждого из N признаков КЖН. В системе распознавания КЖН России принято $N = 3, m = 105$. Формируется матрица значений характеристик социально-экологического мониторинга.

4. Формируется матрица нормированных значений характеристик. В ней приняты следующие обозначения: $w_n^{(i)}$ – нормированное значение i -й характеристики социально-экологического мониторинга; i – ее порядковый номер; m – число значений характеристики; N – число признаков. Процедура нормирования элементов матрицы проводится по правилу (17), с формальной заменой S_n на W_n ; $S_n(y_n^{(r)})$ на $W_n(x_n^{(i)})$; переменной y на x .

3.3.2. Обучающая система распознавания качества жизни

Алгоритм обучающей системы состоит из следующих этапов.

Выбор весовых коэффициентов частных признаков КЖН. В системе распознавания КЖН России используются четыре смысловых сценария оценки значимости переменных. В них приняты различные весовые коэффициенты P_F, P_σ, P_Z переменных (табл. 6).

Весовые коэффициенты признаков качества жизни населения

Сценарий	Весовые коэффициенты
1, 2	$P_F = P_\sigma = P_Z = 0,333$
3	$P_F = 0,5; P_\sigma = 0,37; P_Z = 0,13$
4	$P_{F,i}, P_{\sigma,i}, P_{Z,i}$

В сценариях 1 и 2 переменные F, σ, Z рассматриваются равновесными.

В сценарии 3 веса переменных F, σ, Z приняты в соответствии с оценками факторов смертности во всем мире в 1975 году. При этом считается, что факторами смертности являются только уровни питания, медицинского обслуживания населения и загрязнения окружающей среды. Другие факторы смертности отсутствуют. Поэтому здесь правильнее говорить об условной смертности.

Понятно, что значимость отдельных признаков в формировании качества жизни в различные годы не одинакова. В сценарии 4 временные ряды весов оцениваются по относительной значимости переменных F, σ, Z и вычисляются по формулам:

$$P_{n=1,i} = P_{F,i} = w_{n=1}^{(i)} / \sum_{n=1}^3 w_n^{(i)}, \quad (n = 1, 2, 3), \quad (18)$$

$$P_{n=2,i} = P_{\sigma,i} = w_{n=2}^{(i)} / \sum_{n=1}^3 w_n^{(i)}, \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (19)$$

$$P_{n=3,i} = P_{Z,i} = w_{n=3}^{(i)} / \sum_{n=1}^3 w_n^{(i)}. \quad (20)$$

Временную изменчивость весовых коэффициентов иллюстрирует рис. 6.

Вычисление интегральных оценок для зон КЖН. Каждому сценарию соответствуют интегральные

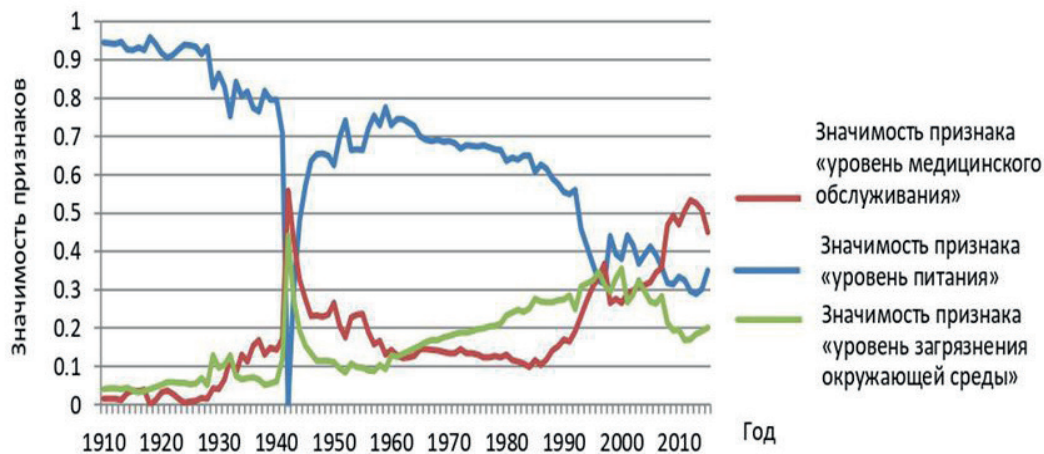


Рис. 6. Временная изменчивость весовых коэффициентов «уровень питания населения», «уровень медицинского обслуживания населения», «уровень загрязнения окружающей среды»

Нормированные значения границ зон качества жизни и соответствующие им алфавиты классов качества жизни населения России

Зоны качества жизни	Уровень питания	Уровень медицинского обслуживания	Уровень загрязнения окружающей среды	$D(q_{n,i}) = D(S_{n,i})$	$D(q_{n,i};(P_{n,i})) = D(S_{n,i};(P_{n,i}))$	$D(q_{n,i}P_n) = D(S_{n,i}P_n)$
	F	σ	Z			
Сильное угнетение	0,00–0,17	0,00–0,19	0,65–1,00	0,00–0,23	0,00–0,28	0,00–0,20
Умеренное угнетение	0,17–0,25	0,19–0,28	0,56–0,65	0,23–0,32	0,28–0,4	0,20–0,29
Слабое угнетение	0,25–0,33	0,28–0,40	0,40–0,56	0,32–0,42	0,4–0,56	0,29–0,39
Нормальные условия	0,33–0,67	0,40–0,50	0,28–0,40	0,42–0,65	0,56–0,65	0,39–0,61
Оптимальные условия	0,67–1,00	0,50–1,00	0,0–0,28	0,65–1,00	0,65–1,00	0,61–1,00

оценки для зон КЖН. Они вычисляются с учетом весовых коэффициентов, принятых для частных признаков (табл. 6). Интегральные оценки для зон КЖН вычисляются по формулам:

А. Средняя арифметическая оценка:

$$D_{(S_n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n \quad (21)$$

Из этой формулы следует, что определенные по выражениям (12), (13), (14) границы зон качества жизни в пространстве факторов F, σ, Z справедливы для интегральной оценки, использующей равные веса признаков качества $P_F = P_\sigma = P_Z = 0,333$.

В. Средняя геометрическая оценка:

$$D^-(S_n) = \sqrt[3]{\prod_{n=1}^N S_n} \quad (22)$$

Среднее геометрическое всегда меньше среднего арифметического, кроме того случая, когда сомножители S_n равны. В таком случае $D_{(S_n)} = D^-(S_n)$. Когда различия между сомножителями составляют малые доли самих сомножителей, разность между $D_{(S_n)}$ и $D^-(S_n)$ мала в сравнении с ними.

С. Средняя взвешенная оценка по факторам смертности:

$$D_{(S_n P_n)} = \sum_{n=1}^N S_n P_n \quad (23)$$

Границы зон качества жизни в пространстве признаков F, σ, Z , рассчитанные по выражениям (12), (13), (14), при вычислении средневзвешенной интегральной оценки по факторам смертности корректируются в соответствии с принятыми весами $P_F = 0,5; P_\sigma = 0,37; P_Z = 0,13$.

Д. Средняя взвешенная оценка по относительной значимости факторов смертности:

$$D_{(S_{n,i}(P_{n,i}))} = \sum_{n=1}^N S_{n,i} P_{n,i} \quad (24)$$

Границы зон качества жизни, приведенные в табл. 3, при вычислении средневзвешенной интегральной оценки по значимости признаков корректируются в соответствии с временными рядами весов (рис. 3), рассчитанных по формулам (18), (19), (20).

Совокупность интегральных оценок зон, вычисленных для каждого из сценариев, представляет собой *алфавит классов КЖН* для этого сценария. Для распознавания КЖН России используются три алфавита классов (табл. 7).

3.3.3. Распознающая система

Алгоритм распознающей системы состоит из следующих этапов.

Формирование матрицы нормированных значений характеристик социально-экологического мониторинга

Матрица формируется путем нормирования значений характеристик по формулам:

$$q_{n,i} = q_{n,i}(x_n^{(i)}) = \begin{cases} \frac{x_{n,i} - y_{r,min}}{y_{r,max} - y_{r,min}}, & x_{n,i} \leq y_{r,min} \\ 1, & y_{r,min} < x_{n,i} \leq y_{r,max} \\ \frac{x_{n,i} - y_{r,max}}{y_{r,max} - y_{r,min}}, & x_{n,i} > y_{r,max} \end{cases} \quad (25)$$

Здесь $q_{n,i}$ – нормированные значения характеристик социально-экологического мониторинга; $x_{n,i}$ – значение i -й характеристики n -го признака; $y_{r,max}, y_{r,min}$ – максимум и минимум нормированных признаков, принятых в обучающей системе распознавания.

Вычисление критериев распознавания

В качестве критериев распознавания воспользуемся интегральными оценками.

1. Оценка по среднему арифметическому показателей качества

$$Q_{(q_{n,i})} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q_{n,i} \quad (26)$$

2. Оценка по среднему геометрическому показателей качества

$$Q^-(q_{n,i}) = \sqrt[3]{\prod_{n=1}^N q_{n,i}} \quad (27)$$

3. Оценка по среднему взвешенному по факторам смертности населения

$$Q_{(q_{n,i}; P_n)} = \sum_{n=1}^N q_{n,i} \cdot P_n \quad (28)$$

4. Оценка по среднему взвешенному по значимости признаков качества жизни

$$Q_{(q_{n,i};P_{n,i})} = \sum_{n=1}^3 q_{n,i} \cdot P_{n,i}, \quad (29)$$

где $n = 1, 2, 3$; $i = 1, 2, 3 \dots m$; i – текущий номер года; m – количество лет.

Распознавание КЖН осуществляется путем сравнения алфавита классов D для каждого из сценариев с соответствующими критериями распознавания Q .

4. Информационное обеспечение системы распознавания качества жизни

При реализации модели (1) возникают проблемы, связанные с неоднозначностью и точностью представления признаков качества жизни населения. Действительно, энергетический признак питания, выраженный в потребленных килокалориях за единицу времени, не содержит информации о качестве пищи, зависит от ассортимента продуктовой потребительской корзины и использованных при расчетах таблиц калорийности.

Признак «уровень медицинского обслуживания в России», выраженный в долларах США за единицу времени, зависит от курса рубля к доллару и инфляционных процессов в США. При этом расходы на медицину учитываются с использованием такого неоднозначного показателя, как паритет покупательной способности населения. Признак «загрязнение окружающей среды» неоднозначен хотя бы потому, что не указывается, о какой среде идет речь, и не приводится перечень учитываемых загрязняющих веществ. Приближенному решению перечисленных проблем посвящается этот раздел работы.

4.1. Уровень питания населения

4.1.1. Потребительская корзина

Одним из интегральных показателей уровня жизни населения государства является *потребительская корзина* – примерный набор товаров и услуг, характеризующий уровень и структуру годового (месячного) потребления человека [8]. Потребительская корзина в ФРГ состоит из 475 товаров и услуг, в Англии – из 350, в США – из 300, во Франции – 250, в России – из 156. При этом пищевая составляющая потребительской корзины РФ включает только 11 наименований продуктов питания для *трех групп населения*: трудоспособной группы, пенсионеров и детей.

Стоимость набора пищевых продуктов в РФ составляет около 50% стоимости потребительской корзины (для сравнения в странах Западной Европы эта цифра не превышает 20%). Например, в текущих ценах, в среднем по России, доля расходов на питание в 1994 году составляла 49,4% против 28,9% в 1991 году. *Недостаточная средняя заработная плата и экстремально высокая дифференциация населения РФ по доходам затрудняют использование стоимости*

пищевой составляющей потребительской корзины для оценки уровня питания населения.

Энергетическая ценность продуктовой корзины

Еще одним интегральным признаком КЖН, широко используемым в статистике, является *энергетическая ценность продуктовой корзины*, выраженная в ккал/чел. сутки. Существуют нормы физиологических потребностей в энергии для различных возрастных групп мужчин и женщин с учетом энергетических затрат при различных видах трудовой деятельности.

Согласно данным Всемирной продовольственной организации (ФАО), в 1989 году средний гражданин СССР потреблял в сутки 3400 ккал. В Российской Федерации в 1996 году калорийность продуктов питания населения в среднем за сутки составляла 2200 ккал. К 2000 году она повысилась до 2394 ккал*. По данным ФАО, питание на уровне 2150 ккал/чел. сутки характеризует условия постоянного недоедания.

Распределение населения РФ по уровню калорийности суточного рациона питания в 2013 году, по данным Федеральной службы государственной статистики¹¹, иллюстрируется на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что идентифицируемые частоты распределения изменяются в очень широких пределах: от 500–750 ккал/чел. в сутки до 6000–6500 ккал/чел. в сутки.

В 2004 году в группе 10% населения «с наименьшими доходами» (нижняя дециль) энергетическая ценность суточного рациона в среднем составила 1505 ккал, а в группе 10% «самых богатых» (верхняя дециль) – 3197 ккал. В 2010 году нижняя дециль составляла 1917 ккал, а верхняя дециль – 3184 ккал; в 2013 году эти характеристики равнялись 1913 и 3150 ккал соответственно.

На рис. 7 представлено также распределение различных демографических групп населения РФ по уровню калорийности суточного рациона питания в 2013 году¹².

Примечательно, что плотности вероятности калорийности рациона питания детей, женщин и пенсионеров практически совпадают, а размах распределения рациона питания мужчин составляет 7700 ккал. Заметим, что в глобальной модели «Мир-3» Д. Медоуза максимальный рацион питания принят равным 8520 ккал [31].

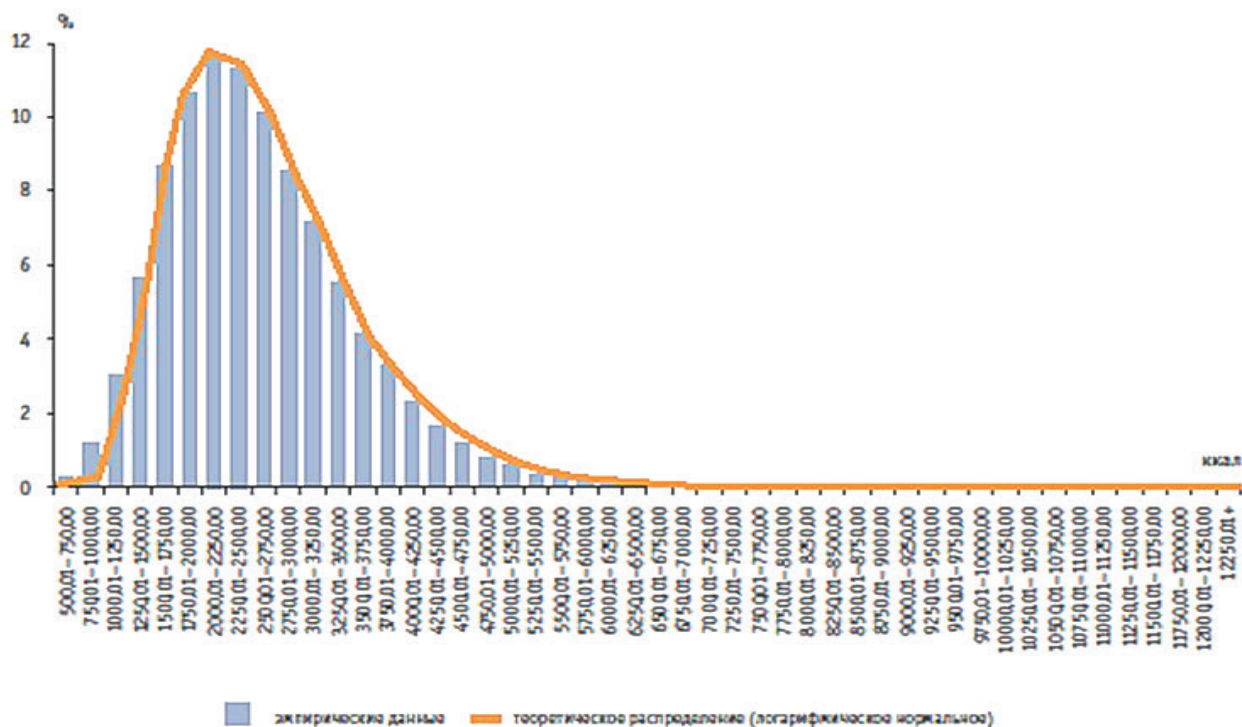
4.1.2. Приближенный учет качественной составляющей рациона питания

Энергетический показатель питания страдает рядом недостатков. В нем не учитывается качественный состав пищи – содержание в ней белков растительного и живот-

¹¹ https://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/urov/razion.pdf

¹² https://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/urov/razion.pdf

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ ПО УРОВНЮ КАЛОРИЙНОСТИ СУТОЧНОГО РАЦИОНА ПИТАНИЯ



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ГРУПП НАСЕЛЕНИЯ ПО УРОВНЮ КАЛОРИЙНОСТИ СУТОЧНОГО РАЦИОНА ПИТАНИЯ

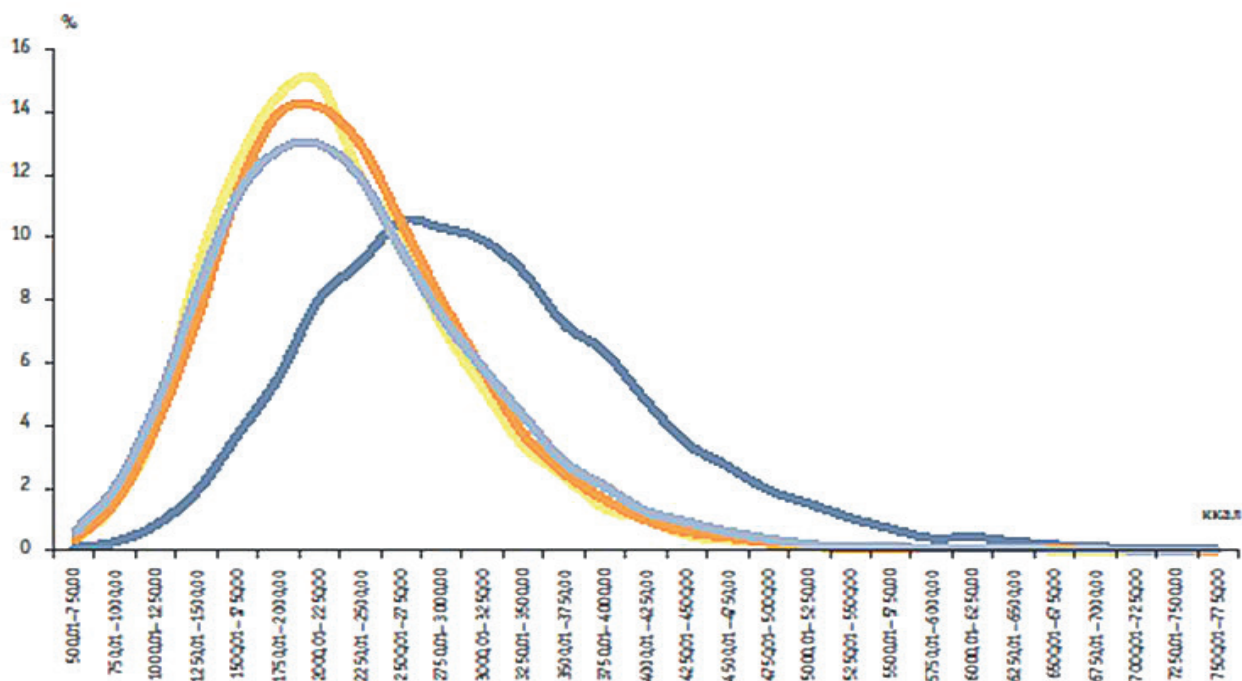


Рис. 7. Распределение населения России по уровню калорийности суточного питания в 2013 году по данным Федеральной службы государственной статистики. https://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/urov/razion.pdf

Табл. 8

Международные сопоставления калорийности (в ккал /сутки) и качества рациона питания населения (в долях единицы) в СССР и промышленно развитых странах

Страны	Год					
	1961		1971		1980	
	Калории	Качество	Калории	Качество	Калории	Качество
СССР	3095	0,700	3355	0,757	3378	0,743
США	2884	0,649	3026	0,678	3168	0,695
Великобритания	3241	0,617	3278	0,616	3116	0,627
Польша	3269	0,722	3419	0,694	3583	0,676
Австрия	3190	0,680	3232	0,677	3351	0,650
Канада	2809	0,619	2890	0,641	2950	0,659
Швеция	2835	0,636	2904	0,686	2986	0,641
Япония	2468	0,904	2704	0,832	2723	0,809

Табл. 9

Эффект совместного влияния энергетической и качественной составляющих рациона питания населения СССР и других промышленно развитых стран

Страна	Год		
	1961	1971	1980
СССР	5262	5895	5888
США	4784	5078	5370
Великобритания	5241	5297	5070
Польша	5629	5792	6005
Австрия	5359	5430	5529
Канада	4548	4742	4894
Швеция	4638	4896	4900
Япония	4699	4954	4926

ного происхождения, жиров, углеводов, витаминов, микроэлементов, антропогенных загрязнений, генетически модифицированных продуктов и т. д. По этой причине энергетическая ценность пищи может служить объективным показателем уровня питания только в зонах угнетенного качества жизни населения. Верхней границей применимости энергетического показателя (в обществе производства) можно считать 4200 ккал, соответствующих суточным энергетическим затратам мужчины в возрасте 18–29 лет, занятого тяжелым физическим трудом.

В оптимальной и нормальной зонах КЖН, наряду с энергетическим содержанием пищевого рациона, первостепенное значение приобретает его качественная составляющая, для которой отсутствует общепринятая единица измерения. По-видимому, это было одной из причин, побудивших Д. Медоуза [31] ввести специфическую единицу измерения уровня питания населения – зерновой эквивалент годового прожиточного минимума $F_0 = 230$ кг зерна на человека в год (2130 ккал/чел. в сутки). Об этом свидетельствует, в частности, резкий излом

функции L_F при значении аргумента $F = 2F_0$ (рис. 4а). Подтверждением этому является и максимально возможный уровень питания $F = 4F_0$, обеспечивающий наивысшее качество жизни по этому показателю. В энергетических единицах $4F_0$ составляет 8520 ккал/чел. сутки, что явно избыточно. Однако введение максимально возможного уровня питания позволяет приблизительно оценить совместное влияние энергетической и качественной составляющих рациона. Рассмотрим эту процедуру.

В публикации «Питание в СССР в «эпоху застоя» (1960–1990)¹³ приводятся синхронные данные о калорийности и качестве (в процентах) рационов питания населения в различных государствах. Переведя проценты в доли единицы, представим эту информацию в табл. 8.

Введем обозначения: R – калорийность рациона питания с учетом энергетической и качественной составляющих; F – энергетическая составляющая рациона; K – его качественная составляющая. Совместный

¹³ http://actualhistory.ru/zastoi_foods

эффект влияния энергетической и качественной составляющих на рацион можно приближенно оценить, воспользовавшись выражением:

$$R = F(1 + K).$$

По этой формуле нетрудно вычислить величину R для различных государств (табл. 7). Полученные таким образом комплексные оценки рациона превышают $F = 2F_0$, расположены в зоне нормального уровня питания $F = 3F_0$ (рис. 7).

Из табл. 9 следует, что Польша и СССР в рейтинге показателя R занимали, соответственно, первое и второе места. Это объясняется тем, что в странах с плановой экономикой при производстве пищевых продуктов строго соблюдались государственные стандарты. В то же время в странах с рыночной экономикой, несмотря на контроль со стороны государства, действует принцип «достижение максимальной прибыли при минимальных затратах».

К сожалению, в литературе не приводятся регулярные ряды интегральных оценок качественной составляющей питания K в Российской империи, СССР и РФ. Встречаются лишь ее эпизодические оценки. Однако возможность учета качественной составляющей в будущем сохраняется. В работе [11] приводится анализ «состава и свойств индексов качества питания (ИКП), разработанных в разных странах и известных под разными названиями: индексы качества (рациона) питания (ИКП, DQI, Diet quality index), индексы здорового питания (ИЗП, HEI, Healthy eating index) и др.». Автором представлен анализ данных по нескольким направлениям исследований достоверности и объективности ИЗП: 1) корреляция с составляющими его компонентами (внутренняя валидация); 2) ассоциация

с оценками рисков заболеваемости и смертности населения и ассоциация с биомаркерами обеспеченности пищевыми веществами; 3) пищевой статус и риск хронических неинфекционных заболеваний (ХНИЗ). Это убедительно свидетельствует о возможности применения ИЗП как инструмента эпидемиологических исследований взаимосвязи питания, пищевого статуса и состояния здоровья населения. Анализ состава различного типа ИКП-ИЗП позволил автору сформулировать общие требования и принципы их разработки (конструирования). ИКП основываются на «рекомендациях по здоровому питанию населения и оценивают степень приверженности населения к соблюдению рекомендаций».

4.1.3. Временные ряды энергетической составляющей питания населения

Не претендующую на полноту процедуру сбора информации об энергетической составляющей питания населения Российской империи, СССР и РФ в период 1910–2015 годов иллюстрирует табл. 8. Информацию можно подразделить на три группы:

1) регулярные ряды оценок уровня питания (в ккал на 1 человека в сутки), опубликованные Р. Алленом (см. сноску ¹⁴), Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО), Федеральной службой государственной статистики (Росстат РФ)¹⁵, Н. Медковичем¹⁶;

2) нерегулярные ряды оценок, опубликованные С. Уиткрофтом [37] и А.Р. Хановым¹⁷;

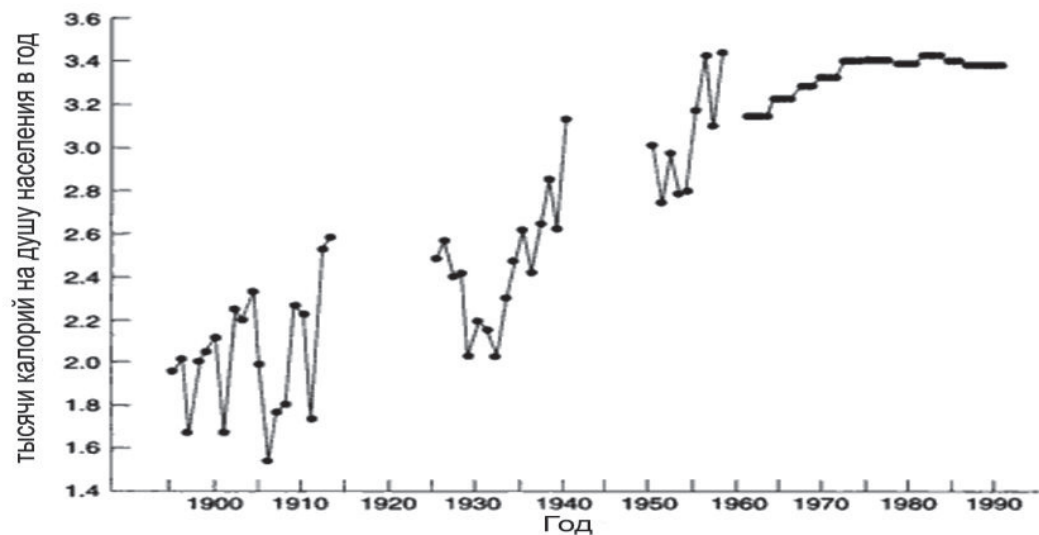


Рис. 8. Временная изменчивость энергетической составляющей питания населения Российской империи и СССР (в тысячах килокалорий на человека в сутки) по данным Р. Аллена (см. <https://nikital2014.livejournal.com/12635.html>).

**Осредненный ряд калорийности питания населения Российской империи, СССР и РФ
в период 1910–2015 годов (ккал/чел. в сутки)**

Годы	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916	1917	1918	1919
Ссылка [19]	2275	2230	1750	2550	2590					
Ссылка [20]	2964	2964	2964	2964						
Эпизодические источники	2254	2254	2254	2254			2973			
Среднее	2602	2284	2591	2666	2590	2782	2973	2864	2754	2645
Годы	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929
Ссылка [19]						2480	2555	2385	2400	2030
Ссылка [20]		2425	2425			2582			2804	
Эпизодические источники						2636				
Среднее	2535	2425	2425	2472	2519	2566	2555	2385	2602	2030
Годы	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939
Ссылка [19]	2200	2150	2030	2300	2480	2620	2420	2630	2860	2640
Ссылка [20]				2497						
Эпизодические источники						2318		2347		2303
Среднее	2200	2150	2030	2399	2480	2469	2420	2489	2860	2739
Годы	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949
Ссылка [19]	3150									
Ссылка [20]	2707									
Эпизодические источники	2359		1658	1773						
Среднее	2739	2199	1658	1773	1931	2089	2247	2406	2442	2477
Годы	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959
Ссылка [19]			3130	2720	2920	2930	3200	3400	3100	3420
Ссылка [20]	2729				2814					
Эпизодические источники	2296									
Среднее	2513	2822	3130	2720	2876	2931	3200	3400	3100	3420
Годы	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969
Ссылка [19]		3240	3240	3240	3240	3140	3140	3140	3280	3280
Ссылка [20]	2978									
Ссылка [21]		3095	3158	3204	3206	3214	3209	3240	3300	3300
Среднее	2978	3168	3199	3222	3223	3177	3175	3190	3290	3290
Годы	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
Ссылка [19]	3320	3320	3320	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3380
Ссылка [20]	3355	3331	3284	3325	3357	3341	3404	3367	3387	3384
Среднее	3338	3326	3302	3363	3379	3371	3402	3384	3394	3382
Годы	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Ссылка [19]	3380	3380	3420	3420	3420	3400	3400	3380	3380	3380
Ссылка [21]	3378	3355	3376	3385	3388					
Ссылка [22]	2975	2800	2835	2860	2760	2785	2760	2785	2700	2550
Эпизодические источники	2964	2968				2739				
Среднее	3174	3178	3150	3222	3189	2975	3080	3083	3040	2965
Годы	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Ссылка [19]	3380	3380								
Ссылка [22]	2590	2525	2400	2550	2400	2275	2200	2225	2550	2350
Эпизодические источники	2590						2200			
Среднее	2835	2953	2890	2550	2400	2275	2200	2225	2550	2350
Годы	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Ссылка [22]	2394	2500	2525	2500	2450	2630	2550	2575	2550	2550
Эпизодические источники	2394									
Среднее	2394	2500	2525	2500	2450	2630	2550	2575	2550	2550
Годы	2010	2011	2012	2013	2014	2015				
Ссылка [22]	2652	2600	2600	2626	2575	2550				
Эпизодические источники		2624	2633							
Среднее	2652	2612	2616	2626	2575	2550				

3) оценки уровня питания в отдельно взятые годы, использующиеся для ликвидации информационных пробелов между временными рядами.

Информация о калорийности питания населения, в ряде случаев, не лишена той или иной политической окраски. Доверия, по нашему мнению, заслуживают оценки уровня питания, предложенные Р. Алленом, Росстатом РФ, Н. Медковичем и А.Р. Хановым. Оценки ФАО представляются завышенными на временном интервале 1992–2015 годов.

Следует отметить особенности временной изменчивости энергетической составляющей питания в первой и во второй половине XX века. Они отчетливо прослеживаются на рис. 8. Для первой половины века (до 1960-х годов) характерна существенная межгодовая изменчивость уровня питания, вызванная отсутствием достаточных государственных запасов продовольствия, нивелирующих недостаток продуктов питания в неурожайные годы. Во второй половине XX века эта проблема была успешно решена.

Если судить по рис. 8, для периода с 1900 по 1910 год характерна максимальная межгодовая изменчивость уровня питания населения России, связанная, по-видимому, с неурожайными годами. В 1900 году суточный рацион россиянина составлял 2100 ккал, в 1901-м – 1650, в 1902-м – 2220, в 1903-м – 2000, в 1904-м – 2300, в 1905-м – 2000, в 1906-м – всего 1500, в 1907-м – 1750, в 1908-м – 1770, в 1909-м – 2250, в 1910 году – 2270 ккал. Из этих данных следует, что в первое десятилетие XX века в Российской империи свирепствовал голод. Уровень питания населения в большую часть времени был ниже физиологического прожиточного минимума человека, что вызывает сомнение.

Расхождения в оценках уровня питания в пределах одного года, систематически встречающиеся у различных авторов, нивелируются при реализации процедуры осреднения. При этом предложенные ФАО

оценки не учитывались. Не учитывались также оценки питания наименее обеспеченной группы населения РФ. Небольшие пробелы в осредненном ряде заполнены с помощью метода линейной интерполяции. В таблице 10 они выделены жирным шрифтом.

Наилучшим решением, приближающим оценки уровня питания в РФ к действительности, является осреднение приведенных данных (рис. 9).

Еще одним источником информации об уровне питания населения являются многочисленные *временные ряды потребления отдельных продуктов питания*, выраженные в весовых единицах измерения. Остановимся здесь только на одной работе на эту тему¹⁷. В ней с дискретностью 5 лет приводятся временные ряды потребления 8 видов продуктов питания населением СССР и РФ в 1935–2015 годах, выраженные в килокалориях на человека в год (табл. 11). Для перевода весовых единиц в энергетические воспользуемся таблицей калорийности.

Примем: молоко и молочные продукты – 590 ккал/кг, яйца – 86 ккал в одном яйце, рыба и рыбопродукты – 1160 ккал/кг, мясо и мясопродукты – 2574 ккал/кг, сахар – 3980 ккал/кг, хлеб и хлебопродукты – 2690 ккал/кг, картофель – 760 ккал/кг, овощи и бахчевые – 375 ккал/кг, фрукты и ягоды – 372 ккал/кг. В последнем столбце таблицы приведена энергетическая ценность питания населения страны, выраженная в калориях на душу населения в сутки.

Данные таблицы не только дополняют временные ряды энергетической составляющей питания населения, но и дают представление о временной изменчивости структуры питания. В период 1950–1991 годов в рационе питания населения постоянно повышалась доля продуктов, богатых белком животного происхождения: мяса и мясопродуктов, рыбы и рыбопродуктов, молока и молокопродуктов, яиц. Доля хлеба, хлебопродуктов, круп и картофеля в рационе посто-

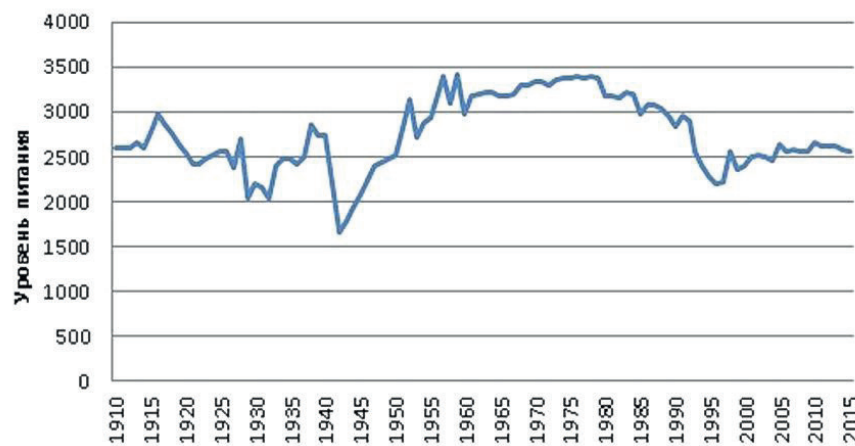


Рис. 9. Временная изменчивость уровня питания населения России в период 1910–2015 годов (в ккал/сутки на человека)

**Потребление основных продуктов питания населением СССР и Российской Федерации
(в кг на душу населения в год и килокалориях на человека в сутки)**

Годы	1913	1935	1937	1939	1940	1947	1950	1955	1960	1965
Молоко, кг	154	138	141	143	143	172	174	175	238	251
Молоко, ккал.	249	223	228	231	231	278	281	283	385	406
Яйца, штук	48	43	45	51	55	60	60	84	114	124
Яйца, ккал.	11	10	11	12	13	14	14	20	27	29
Рыба, кг	6,7	5,6	5,2	5,1	5,0	7,0	7,5	9,0	9,8	12,6
Рыба, ккал.	21	18	17	16	16	22	24	29	31	40
Мясо, кг	29	18	18	21	34	26	26	32	39	41
Мясо, ккал.	205	127	127	148	240	183	183	226	275	289
Сахар, кг	8,1	12	13,8	10	8,7	8,0	11,6	21,0	28,5	32,2
Сахар, ккал.	88	131	150	109	95	87	126	229	311	351
Хлеб, кг	200	192	193	195	197	172	176	180	167	156
Хлеб, ккал.	1474	1415	1422	1437	1452	1268	1297	1327	1231	1150
Картофель, кг	75	151	150	135	118	141	153	145	142	130
Картофель, ккал.	156	314	312	281	246	294	319	302	296	271
Овощи, кг	40	78	78	67	64	51	51	66	70	72
Овощи, ккал.	39	80	80	68	66	52	52	68	72	74
Фрукты, кг	11									28
Фрукты, ккал.	11									29
Сумма, ккал.	2254	2318	2347	2303	2359	1198	2296	2484	2625	2639
Годы	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Молоко, кг	307	316	314	325	387	254	215	238	247	239
Молоко, ккал.	496	511	508	525	626	411	348	378	399	386
Яйца, кг	159	216	239	216	297	216	229	250	269	269
Яйца, ккал.	37	51	56	61	70	51	54	59	63	63
Рыба, кг	15,4	16,8	17,6	18,0	20,4	9,7	10,4	12,6	15,6	14,0
Рыба, ккал.	49	53	56	57	65	31	33	40	50	44
Мясо, кг	48	57	58	62	75	55	45	55	69	73
Мясо, ккал.	338	402	409	437	529	388	317	389	487	515
Сахар, кг	38,8	40,9	44,4	42,2	47,0	32,0	35,0	38,0	39,0	39,0
Сахар, ккал.	423	446	484	460	510	349	382	414	425	425
Хлеб, кг	149	141	138	133	120	117	121	120	118	118
Хлеб, ккал.	1098	1039	1017	980	884	862	892	884	870	870
Картофель, кг	130	120	109	104	106	124	109	109	104	112
Картофель, ккал.	271	250	227	217	221	258	227	227	217	233
Овощи, кг	82	89	97	102	89	76	79	87	101	111
Овощи, ккал.	84	91	99	105	91	78	81	89	103	113
Фрукты, кг	35	39	38	48	35	29	32	46	58	61
Фрукты, ккал.	36	40	39	49	36	30	33	47	59	62
Сумма, ккал.	2832	2883	2895	2891	3032	2458	2376	2527	2673	2711

янно снижалась. В 1995 году потребление мяса уменьшилось на 28%, молока – на 37%, сахара – на 25% по сравнению с 1991 годом. За 28 лет рыночных реформ так и не был достигнут скудный уровень потребления продуктов питания в СССР в 1990 году.

4.2. Уровень медицинского обслуживания

При сборе и анализе информации о временной изменчивости уровня медицинских услуг в Российской империи, СССР и Российской Федерации необходимо учитывать изменчивость курса рубля и доллара за счет инфляции. В используемой в работе методике распознавания качества жизни населения используется функция влияния уровня развития здравоохранения на качество жизни, предложенная Д. Медоузом в глобальной модели развития «Мир-3».

Аргументом этой функции является финансирование здравоохранения, выраженное в долларах США в ценах 1900 года. Минимальная установленная законом заработная плата в США выросла с 75 центов за час в 1950 году до 7,25 доллара за час в 2009 году¹⁸. В связи со сказанным расходы на здравоохранение в Российской империи, СССР и Российской Федерации, выраженные в рублях, переводились в доллары США по текущему банковскому курсу, а затем, с помощью калькулятора инфляции в США, выражались в ценах 1913 года¹⁹.

4.2.1. Уровень медицинских услуг на душу населения в Российской империи

В Российской империи (РИ) было крайне мало врачей, врачебных участков и больничных коек, особенно в сельской местности, где проживало 82% населения. В 1913 году численность населения РИ составляла 163,7 млн человек. Во всей империи в это время работали 24030 врачей, и было 208 тысяч больничных коек, которые обслужили 98 млн зарегистрированных больных. Для сравнения: в СССР в 1990 году при численности населения 287 млн человек работали 1 млн 279 тыс. врачей. В бюджете РИ отсутствовал раздел «финансирование здравоохранения». До сентября 1916 года отсутствовало и министерство здравоохранения. Проблемами здравоохранения

занималось министерство внутренних дел по остаточному принципу.

В 1901 году на здравоохранение в РИ было выделено 43,7 млн рублей, или 32 копейки на душу населения. К 1912 году финансирование возросло до 181,4 млн рублей, или до 1,08 рубля на человека в год. Из них только 11,2% приходилось на долю госбюджета; 64704 тысячи рублей выделили земства и 28800 – города. В 1913 году расходы на здравоохранение составляли 145,1 млн рублей, или 90 копеек на человека в год²⁰.

Во время Первой мировой войны финансирование гражданского здравоохранения осуществлялось только за счет бюджетов земств и городов, а госпиталей – за счет военного бюджета и Красного Креста. Сведения о расходах на здравоохранение в денежном выражении за период 1914–1917 годов в литературе отсутствуют, но есть информация о количестве больничных коек в госпиталях. К ноябрю 1915 года их количество возросло до 783 тысяч, а к концу 1917 года превысило миллион (источник – «Военная медицина в русской армии в годы Первой мировой войны»²¹).

В 1912 году стоимость лечения на одной больничной койке составляла 6,36 рубля в год. В предположении, что эта стоимость в военное время не изменилась, нетрудно получить оценки расходов на здравоохранение в период 1914–1917 годов в ценах 1912 года: в 1914 году – 1,94, в 1915-м – 3,03, в 1916-м – 3,70, в 1917 году – 4,38 рубля на человека в год.

4.2.2. Уровень медицинских услуг на душу населения в СССР

В годы советской власти, с 1918 по 1991 год, в ежегодных Государственных бюджетах страны отдельной строкой указывались расходы на здравоохранение²².

Исключениями не являлись годы Гражданской и Великой Отечественной войн. Уровень медицинских услуг на человека в год, выраженный в рублях, определяется как частное от деления бюджетных расходов на здравоохранение на численность населения страны (табл. 13). В этой же таблице приводятся курс рубля по отношению к доллару и расходы на здравоохранение на душу населения, выраженные в долларах США по текущему банковскому курсу.

Табл. 12

Финансирование здравоохранения на душу населения в год в Российской империи в долларах США в ценах 1913 года

Годы	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916	1917
Финансирование	0,53	0,52	0,53	0,46	1,00	1,52	1,66	1,67

¹⁸ <https://news.rambler.ru/other/41880809-istoriya-razvitiya-zolotogo-standarta-ssha-i-prichiny-ego-otmeny/>

¹⁹ <https://www.statbureau.org/ru/united-states/inflation-calculators>

²⁰ <https://allemand1990.livejournal.com/19717.html>

²¹ <https://historymedjournal.com/ru/stati/item/578-voennaya-meditsina-v-russkoy-armii-v-gody-pervoy-mirovoy-voyny>

²² <http://istmat.info/node/47225>; <http://istmat.info/node/18773>

Табл. 13

Расходы на здравоохранение в СССР, выраженные в рублях и долларах США по текущему курсу банка

Годы	1918	1919	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927
Финансирование в млрд рублей в год	0,26	8,97	70,9	343	0,05	0,06	0,10	0,14	0,19	0,24
Расходы на душу населения в рублях в год	1,75	63,1	514	2505			0,70	0,96	1,27	0,59
Курс рубля к доллару	0,03	0,014	0,004	0,001			0,45	0,52	0,52	0,51
Расходы на душу населения в долларах в год	0,06	0,87	2,00	1,80	1,30	0,81	0,31	0,50	0,65	0,82
Годы	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937
Финансирование	0,27	0,33	0,41	0,56	0,77	0,96	1,80	4,03	5,62	6,93
Расходы в рублях	1,83	2,15	2,71	3,65	4,94	6,10	11,3	25,2	34,1	42,8
Курс рубля к доллару	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,80	0,87	0,20	0,20
Расходы в долларах	0,94	1,10	1,39	1,88	2,54	3,14	9,09	21,9	6,93	8,48
Годы	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947
Финансирование	7,59	8,25	8,95	6,81	6,77	8,45	10,2	11,4	13,4	18,1
Расходы в рублях	46,0	48,4	47,1	34,9	35,4	45,4	56,6	65,3	79,0	107
Курс рубля к доллару	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Расходы в долларах	8,69	9,13	8,89	6,60	6,69	9,13	10,7	12,3	14,9	20,1
Годы	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957
Финансирование	19,6	20,9	21,1	21,4	22,0	23,9	28,4	30,6		
Расходы в рублях	114	119	117	118	119	127	148	156		
Курс рубля к доллару	0,19	0,19	0,19	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Расходы в долларах	21,4	22,5	29,3	29,4	29,8	31,8	36,9	39,2	37,2	34,2
Годы	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
Финансирование			4,78	4,95	4,89	5,21	5,62	6,62	7,05	7,38
Расходы в рублях			22,4	22,8	22,2	23,7	24,9	28,8	30,3	31,4
Курс рубля к доллару	0,25	0,25	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Расходы в долларах	31,4	27,8	24,9	25,3	24,7	26,3	26,7	32,0	33,7	34,9
Годы	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
Финансирование	8,07	8,49	9,21	9,55	9,96	10,4	10,9	11,4	11,8	12,3
Расходы в рублях	34,0	35,4	38,0	39,3	40,3	41,7	43,1	44,6	45,8	47,6
Курс рубля к доллару	1,11	1,11	1,11	1,11	1,21	1,21	1,33	1,37	1,32	1,35
Расходы в долларах	37,8	39,9	42,3	43,6	48,8	50,5	57,2	59,4	60,3	64,0
Годы	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Финансирование	13,3	13,8	14,7	15,1	15,9	16,3	17,0	17,5	17,9	19,3
Расходы в рублях	50,9	52,7	55,3	56,4	58,9	59,8	61,9	62,9	63,9	67,8
Курс рубля к доллару	1,42	1,52	1,56	1,48	1,41	1,41	1,26	1,42	1,32	1,49
Расходы в долларах	72,1	79,9	86,4	83,5	83,2	84,6	78,3	89,3	84,2	101
Годы	1988	1989	1990	1991						
Финансирование	21,4	24,4								
Расходы в рублях	75,1	85,1								
Курс рубля к доллару	1,72	1,65	1,65	1,78						
Расходы в долларах	129	140	140	140						

Финансирование здравоохранения на душу населения в год в СССР, выраженное в долларах США в ценах 1913 года

Годы	1918	1919	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927
Финансирование	0,04	0,46	1,04	1,05	0,78	0,47	0,18	0,28	0,37	0,48
Годы	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937
Финансирование	0,56	0,65	0,87	1,30	1,96	2,40	4,34	3,67	4,99	5,95
Годы	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947
Финансирование	6,27	6,59	6,37	4,30	4,00	5,30	6,07	6,83	7,00	8,68
Годы	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957
Финансирование	8,97	9,63	11,8	11,2	11,3	11,9	14,0	14,8	13,3	11,9
Годы	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
Финансирование	10,8	9,65	8,44	8,52	8,21	8,60	8,93	10,2	10,4	10,4
Годы	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
Финансирование	10,8	10,7	10,7	10,7	11,6	11,0	11,1	10,8	10,4	10,4
Годы	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Финансирование	10,8	10,5	10,1	8,97	8,61	8,43	7,51	8,25	7,70	8,86
Годы	1988	1989	1990	1991						
Финансирование	10,8	11,2	11,8	12,7						

Расходы на здравоохранение в СССР, выраженные в долларах США в ценах 1913 года, приводятся в табл. 14.

4.2.3. Уровень медицинских услуг в Российской Федерации

В Российской Федерации в 1992–2015 годах использовались как фиксированный, так и плавающий курсы рубля. Значительная внутригодовая изменчивость курса рубля в эти годы затрудняет использование информации о расходах на здравоохранение, приводимых в ежегодных Государственных бюджетах. Поэтому расходы на здравоохранение в Российской Федерации приведены в долларах США по курсу Центрального банка (табл. 15).

Заметим, что существенный рост расходов на здравоохранение в РФ по сравнению с аналогичными расходами, имевшими место в 1980-е годы в СССР, не свидетельствует о повышении уровня развития здравоохранения в стране в целом. Рост расходов произошел главным образом за счет появления платных медицинских услуг, малодоступных для большей части населения страны. В такой ситуации наилучшим решением, приближающим оценки уровня здравоохранения в РФ к действительности, является осреднение частных и государственных расходов (рис. 10). При этом следует учитывать, что реальный, доступный большей части населения страны уровень здравоохранения остается существенно завышенным.

4.3. Временной ряд уровня загрязнения окружающей среды

Категория «окружающая среда» – весьма емкое понятие, включающее в себя воздушную и водную среды, почвы, урбоземы, растительный и животный миры. Не менее емким является понятие «загрязнение среды обитания». Оно включает в себя площадные и локальные выбросы и сбросы сотен видов загрязняющих природную среду веществ, а также генерируемые человеком тепловое, радиоактивное, ионизационное, электромагнитное и шумовое загрязнение.

При решении прикладной задачи понятие «загрязнение окружающей среды» нуждается в конкретизации. Для упрощения оценочных расчетов в статье принято, что *репрезентативным элементом окружающей среды, отражающим долговременную антропогенную нагрузку на среду обитания в целом, является водная среда, а точнее качество воды (и/или трофический статус) пресноводных озер и водохранилищ*. Сила тяжести в сочетании с текучестью и химической активностью воды как растворителя способствует аккумуляции загрязняющих веществ в водотоках и водоемах.

Термином «качество воды» обозначается сочетание химического и биологического состава, а также физических свойств воды, отражающих ее пригодность для конкретных видов водопользования. В этом определении отражается антропоцентрический подход к понятию «качество воды». Для идентификации сте-

**Расходы на здравоохранение в Российской Федерации, выраженные в долларах США
по курсу Центрального банка и в ценах 1913 года**

Годы	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Источник: [\$96]	205	227	248	270	270	400	370	350
Источник: [\$97]				110	140	200	120	70
Источник: [\$98]				110	150	200	110	90
Источник: [\$99]				300	300	400	350	300
Источник: [\$100]				325	316	368	298	294
Источник: [\$101]								
Источник: [\$102]								
Источник: [\$103]							350	350
Источник: [\$104]				437	425	496	401	395
Источник: [\$105]								
Среднее за год	205	227	248	270	292	344	286	264
Среднее в ценах 1913 года	13,7	14,6	15,8	16,9	18,6	21,5	17,6	15,8
Годы	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Источник: [\$96]	375	400	470	520	520	650	770	875
Источник: [\$97]	100	120	140	170	210	280	370	490
Источник: [\$98]	100	110	130	170	200	280	380	500
Источник: [\$99]	350	450	500	525	525	650	775	900
Источник: [\$100]	316	325	368	351	368	412	500	575
Источник: [\$101]			280	300	310	370	490	570
Источник: [\$102]				318	340	336	481	574
Источник: [\$103]	360	375	500	520	520	625	760	875
Источник: [\$104]	425	437	496	472	496	555	667	493
Источник: [\$105]						616	790	893
Среднее за год	289	317	361	418	388	477	512	615
Среднее в ценах 1913 года	16,8	18,1	20,2	22,9	20,6	24,5	25,6	29,6
Годы	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Источник: [\$96]	1250	1480	1370	1500	1540	1600		
Источник: [\$97]	600	520	670	810				
Источник: [\$98]	720	620	720	900	980	1030	900	
Источник: [\$99]	1250	1450	1400	1500	1650	1800	1850	
Источник: [\$100]	625	661	620	684	747	811	742	524
Источник: [\$101]	680	770	750	780	770	750		
Источник: [\$102]	631	675	727	747	862	910	840	800
Источник: [\$103]	1020	1130	1250	1310	1500			1300
Источник: [\$104]								
Источник: [\$105]	1252	1400	1397	1490	1654	1777	1836	
Среднее за год	892	972	989	1080	1276	1321	1170	875
Среднее в ценах 1910 года	42,9	45,5	45,6	48,3	56,1	57,3	50,3	37,4

Источники информации: [\$96] – <http://kaig.ru/rzdr.pdf>, [\$97] – <http://kaig.ru/bger29.pdf>, [\$98] – <http://kaig.ru/singapore.html>, [\$99] – <http://kaig.ru/tyrz1.pdf>, [\$100] – В кн.: Неформальные платежи за медицинскую помощь в России. М., 2003, с. 13–23. [\$101] – <https://dibit.ru/statistics/who/rus/health.html>, [\$102] – <http://rusrand.ru/analytics/analyticszdravoohranenie-rossii-mify-realnost-reshenija>, [\$103] – <http://kaig.ru/zdr50.pdf>, [\$104] – http://siteresources.worldbank.org/INTRUSSIANFEDERATION/Resources/Public_Spending_report_ru.pdf, [\$105] – <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-finansovogo-obespecheniya-rossijskogo-zdravoohraneniya-kratkij-statisticheskij-obzor>.

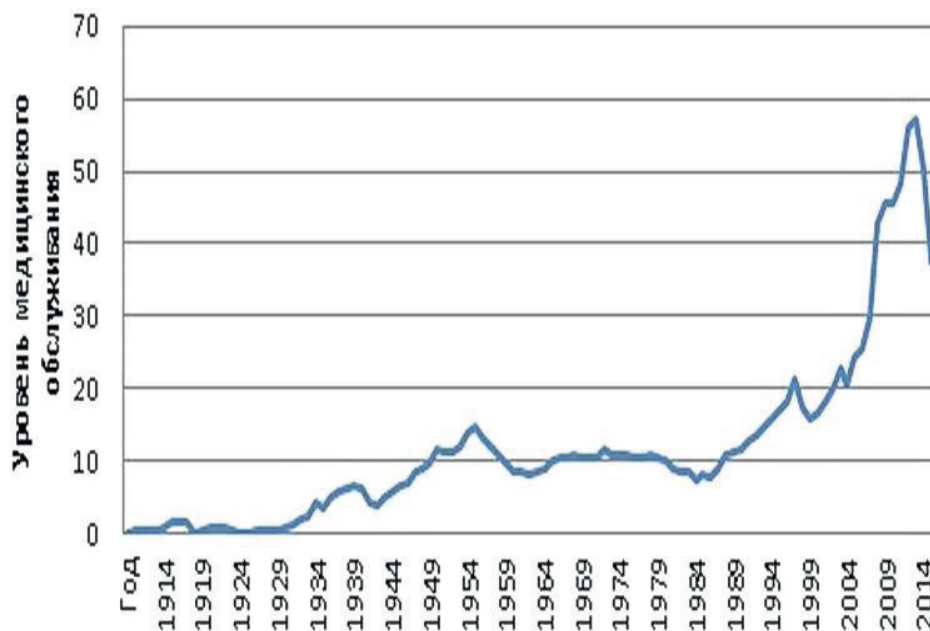


Рис. 10. Временная изменчивость уровня медицинского обслуживания населения России в период 1910–2015 годов (в \$ США по курсу 1913 года)

Табл. 16

Временная изменчивость нормированных показателей трофического статуса озер СССР

Годы	1910	1926	1939	1959	1970	1979	1988
Валдайское	0,04	0,06	0,08	0,11	0,17	0,29	0,41
Севан	0,09	0,10	0,11	0,12	0,27	0,48	0,53
Ладожское	0,01	0,02	0,02	0,04	0,12	0,15	0,18
Онежское	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,06
Сям озеро	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,09	0,13
Красное	0,01	0,01	0,02	0,07	0,13	0,18	0,24
Чудское	0,02	0,04	0,08	0,14	0,36	0,40	0,44
Выгсьярви	0,01	0,01	0,02	0,37	0,49	0,53	0,55
Юлимисте	0,01	0,01	0,03	0,20	0,63	0,64	0,66
Тренд трофности	0,023	0,030	0,043	0,121	0,248	0,311	0,356

пени эвтрофирования водоема используется понятие «трофический статус» – классификация вод по степени продуктивности или трофности. Категории качества вод и трофического статуса водоема взаимосвязаны. Их изменение, чаще всего, однонаправленное. Категорию трофического статуса будем рассматривать как подмножество категории качества воды. Это позволяет в рассмотренном здесь оценочном подходе в значительной степени унифицировать состав информации, необходимой для диагностики качества среды [17].

Дефицит информации о внутригодовой и внутрисезонной изменчивости экологических характеристик может быть частично преодолен при оценке качества и

трофического статуса вод методом сводных показателей. Применительно к экологическим задачам этот метод адаптирован соавторами статьи в [12] и других работах.

Для оценки временной изменчивости антропогенной нагрузки на водную среду России необходимо располагать многолетними рядами наблюдений за водными объектами, расположенными в различных по степени хозяйственного освоения регионах и климатических зонах страны. Такая, хотя и ограниченная, информация приводится в работе [14]. Авторы рассматривают антропогенные факторы как ускорители биотического и геохимического циклов озер с дискретностью 10 лет (табл. 16).

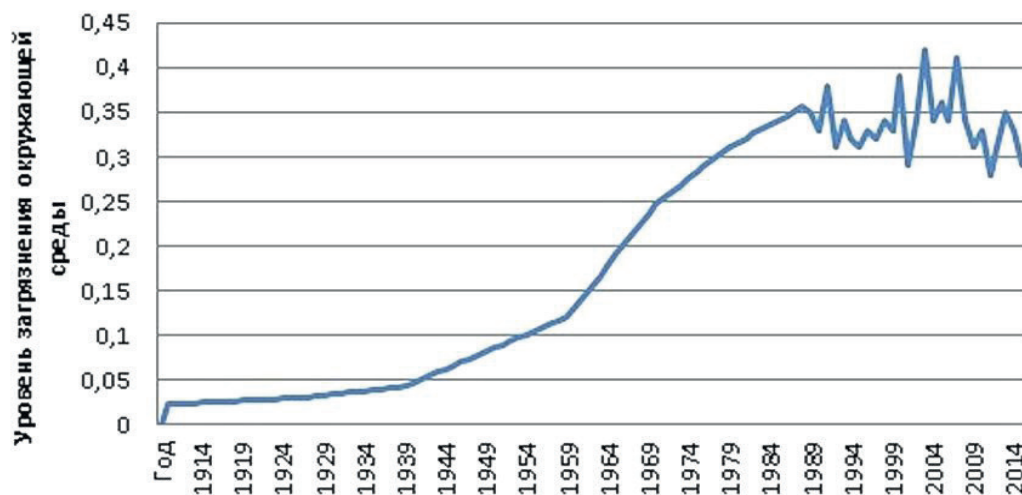


Рис. 11. Временная изменчивость уровня загрязнения окружающей среды России в период 1910–2015 годов (в долях единицы)

Ежегодные значения показателей трофического статуса озер получены линейной интерполяцией тренда их трофности (рис. 11). Качество поверхностных вод РФ в период 1981–2015 годов оценивалось по загрязнению Невской губы – конечного звена водной системы р. Нева – бассейн Ладожского озера, площадью 258600 км² [14]. Санкт-Петербург с 1990 года является «единственным крупным источником поступления фосфора и азота в Финский залив и Балтийское море» [32], а процессы седиментации тяжелых металлов в Невской губе превратили ее в «техногенную лагуну» [33].

Оценка изменчивости качества воды и трофического статуса Невской губы проводилась методом сводных показателей для временного интервала 1988–2016 годов по данным экологических наблюдений, опубликованных в ежегодниках (фонды СЗ УГМС). При этом использовались 8 классификационных признаков трофности и 13 признаков качества воды [17].

5. Результаты исследования и их анализ.

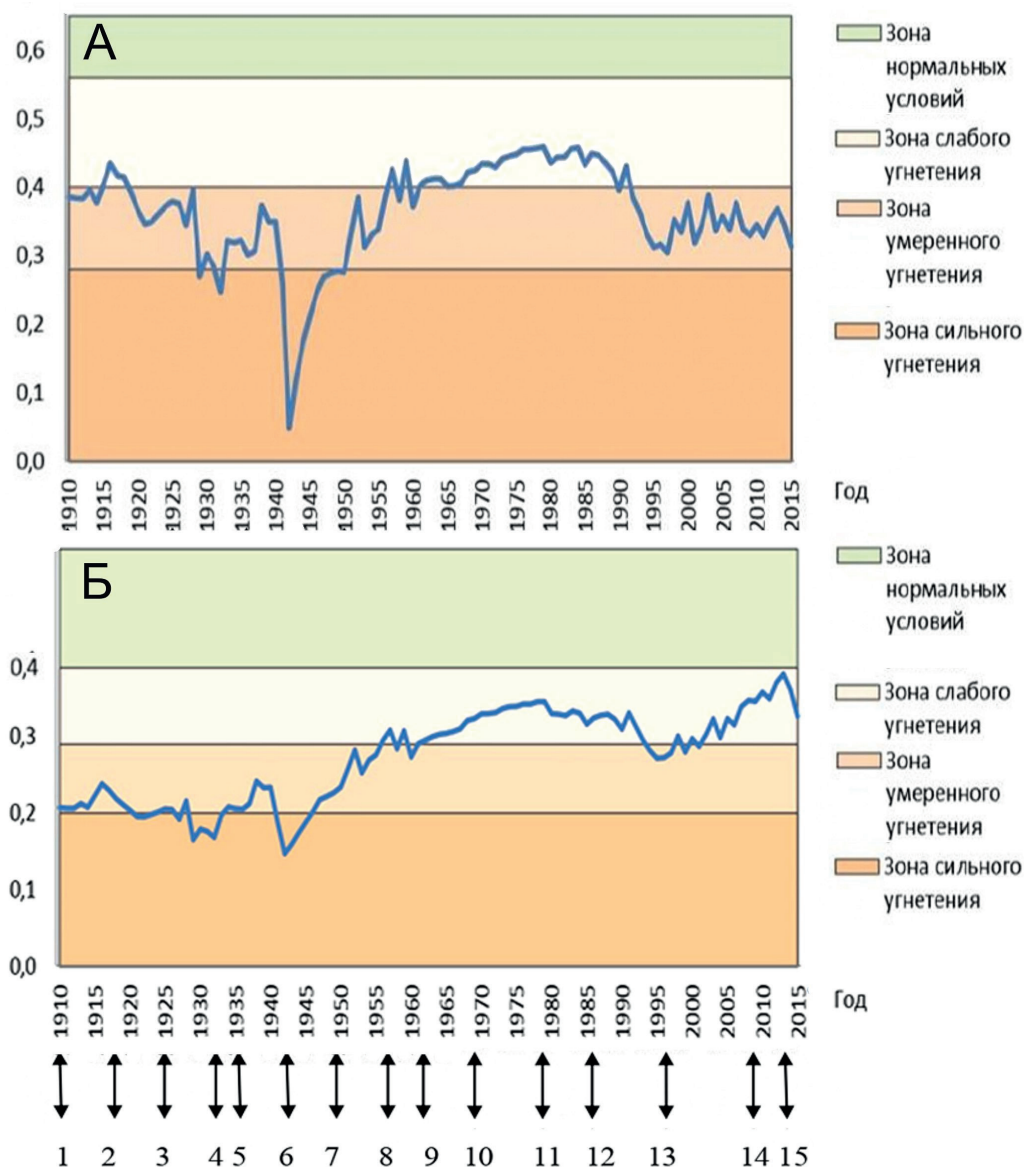
5.1. Выбор наилучшего критерия распознавания качества жизни населения по хронологической последовательности основных этапов изменений социально-экологической системы России

Наилучшим критерием распознавания КЖН оказалась $Q(q_{n,i}; P_{n,i})$, соответствующий оценке по среднему взвешенному значимости признаков качества жизни (алфавиту классов $D(S_{n,i})(P_{n,i})$). Этот вывод следует из анализа рис. 12, иллюстрирующего временную изменчивость уровня КЖН России на период с 1910 по 2015 год.

Переломы на графиках, показанных на рис. 12, можно, как оказалось, привязать к определенным этапам изменений социально-экологической системы России: 1) реформы Витте и Столыпина (1892–1913); 2) Первая мировая и Гражданская войны; 3) военный коммунизм и нэп; 4) коллективизация и голодомор; 5) 1-я, 2-я, 3-я пятилетки, индустриализация страны; 6) Великая Отечественная война (июнь 1941–май 1945); 7) послевоенное восстановление народного хозяйства (1945–1953); 8) «Коллективное руководство страной»; 9) «Хрущевская оттепель» (1959–1964); 10) «Ленинский принцип коллективного руководства страной» (1964–1976); 11) «Брежневский застой в экономике» страны (1977–1995); 12) «Перестройка» Горбачева; 13) «Ельцинское лихолетье» (1992–1999); 14) возрождение России, пассионарная «Эпоха Путина»; 15) Украинский кризис.

Наилучшее качественное совпадение результатов распознавания КЖН России с исторической действительностью определяет наилучший критерий распознавания.

Действительно, на рис. 12А прослеживаются: относительно благополучное качество жизни населения перед Первой мировой войной; его падение в период Первой мировой войны, Гражданской войны и продразверстки; рост КЖН в период продналога и нэпа (1922–1928); падение в период коллективизации сельского хозяйства и голодомора в начале 1930 года; рост КЖН во время 2-й и 3-й пятилеток индустриализации страны (1933–1941); резкое снижение качества жизни во время Великой Отечественной войны; постепенный его рост в послевоенное время (1945–1953) и в период «коллективного руководства страной»; небольшое падение КЖН в период реформ Н.С. Хрущева (1960–1963); его подъем до максимального уровня в период «Ленинского принципа коллектив-



Основные этапы развития социально-экологической системы России

Рис. 12. Временная изменчивость качества жизни населения России, рассчитанная **А)** по критерию распознавания $Q(a_{n,i}; P_{n,i})$ (среднее взвешенное по значимости признаков качества жизни) и **Б)** по критерию распознавания $Q(a_{n,i}; P_n)$ (среднее взвешенное по факторам смертности). Градуировка осей ординат указана в табл. 5. Цифры под стрелками соответствуют нумерации этапов изменения социально-экологической ситуации в России (см. текст)

ного руководства страной» (1964–1976); стабилизация КЖН в период «застоя» (1977–1985); падение во время перестройки (1986–1991); резкое падение качества жизни в «лихие девяностые» (1992–1999) – во время стихийной рыночной экономики; постепенное его повышение в 2000-е годы – в период становления регулируемой рыночной экономики; ухудшение качества жизни, связанное с введением экономических санкций против РФ в 2014–2015 годах.

Таким образом, основные этапы социально-экономического развития России в XX – начале XXI века могут служить индикаторами, обеспечивающими оценку пригодности применяемых в работе алгоритмов распознавания качества жизни населения. *Наличие индикаторов дает возможность пересмотреть класс системы распознавания образов. Она переходит из класса систем с обучением в класс систем без обучения. Этапы-индикаторы позволяют не толь-*

ко подтвердить выбранный принцип распознавания качества жизни населения России, определить все классы качества жизни, но и распознавать в деталях особенности ее временной изменчивости внутри градаций алфавита классов.

Сказанное позволяет рассматривать критерий $Q(q_{n,i;p_{n,i}})$ как своеобразный «эталон» распознавания КЖН России. Заметим, что такая точка зрения не лишена субъективизма. Правильнее было бы говорить, что $Q(q_{n,i;p_{n,i}})$ является наилучшим среди рассмотренных критериев распознавания.

Вторым по качеству распознавания КЖН России можно признать критерий $Q(q_{n,i;p_n})$, соответствующий сценарию «С» (оценке КЖН с использованием среднего взвешенного по факторам смертности населения в качестве весового коэффициента). Здесь также прослеживаются все этапы исторического развития страны, но выражены они несколько слабее (рис. 12Б). Кроме того, анализ рисунка свидетельствует о том, что критерий $Q(q_{n,i;p_n})$ не обеспечивает фильтрацию результатов распознавания от негативного влияния завышенной оценки уровня развития здравоохранения в период рыночных реформ. Видимым эффектом этого является занижение КЖН в первой половине XX века и завышение во второй половине.

В основу рис. 12Б положена модель КЖН, в которой веса переменных F, σ, Z приняты в соответствии с оценками факторов смертности во всем мире в 1975 году (см. рис. 2). При этом считается, что смертность зависит только от уровней питания, медицинского обслуживания населения и загрязнения окружающей среды. Другие факторы в расчет не приняты. Поэтому здесь правильнее говорить об условной смертности.

Из рис. 12Б следует, что КЖН в годы Гражданской войны было существенно ниже, чем в 2010-е годы, и это представляется соответствующим действительности, в отличие от того, что видно на рис. 12А, где уровни КЖН в 1920-е и 2010-е близки. Но на рис. 12А стабильный рост КЖН с начала 1990-х отсутствовал, тогда как на рис. 12Б он выгля-

дит явным. Этот эффект можно объяснить тем, что в «лихие 90-е» в стране возникла и расцвела платная медицинская помощь, недоступная для большей части населения. По такой причине КЖН россиян на рис. 12Б в это время росло, что не соответствует действительности. По такой же причине временная изменчивость качества жизни населения России, рассчитанная по критерию распознавания $Q(q_{n,i;p_n})$ (среднее взвешенное по факторам смертности) в иерархии моделей КЖН может быть поставлена на второе, а не первое место.

Здесь важным является то, что необходимым условием получения корректных выводов на основе разработанных алгоритмов является возможность сопоставлять состояние СЭСС по разным наборам параметров на достаточно длительном временном интервале. Это требует отдельного исследования с привлечением дополнительных материалов и будет продолжением разработки идей и методик, изложенных в данной статье.

5.2. Алгоритм выбора оптимального критерия распознавания качества жизни населения

Критерии распознавания КЖН России можно рассматривать как случайные величины (СВ) $Q(q_{n,i}), Q(q_{n,i}), Q(q_{n,i;p_n}), Q(q_{n,i;p_{n,i}})$ (в дальнейшем будем обозначать их через X_1, X_2, X_3, X_4 соответственно), каждая из которых представлена $m = 105$ значениями случайной величины (СВ). Эти СВ зависят друг от друга, поскольку при определении их значений использовались одни и те же признаки F, σ, Z . Зависимые СВ образуют системы случайных величин.

Для приближенной количественной оценки близости временных рядов КЖН, полученных с помощью различных критериев распознавания, воспользуемся безразмерной числовой характеристикой распределения «коэффициентом корреляции r_{xy} », характеризующим степень тесноты линейной зависимости $Y = aX + b$ между СВ.

Табл. 17

Корреляции оценок качества жизни населения России с различными критериями распознавания

	X_1 $Q(q_{n,i})$	X_2 $Q(q_{n,i})$	X_3 $Q(q_{n,i;p_n})$	X_4 $Q(q_{n,i;p_{n,i}})$
X_1 $Q(q_{n,i})$	$r_{x_1x_1} = 1$	$r_{x_1x_2} = 0,95$	$r_{x_1x_3} = 0,96$	$r_{x_1x_4} = 0,48$
X_2 $Q(q_{n,i})$		$r_{x_2x_2} = 1$	$r_{x_2x_3} = 0,90$	$r_{x_2x_4} = 0,61$
X_3 $Q(q_{n,i;p_n})$			$r_{x_3x_3} = 1$	$r_{x_3x_4} = 0,23$
X_4 $Q(q_{n,i;p_{n,i}})$				$r_{x_4x_4} = 1$

С помощью коэффициентов парной корреляции систему случайных величин $Q(q_{n,i}), Q^-(q_{n,i}), Q(q_{n,i;P_n}), Q(q_{n,i;P_n,i})$ можно охарактеризовать корреляционной таблицей (матрицей), симметричной относительно главной диагонали (табл. 17).

При исследовании связи между двумя переменными обычно одну из них рассматривают как функцию, другую – как аргумент. Однако ни одна из коррелированных переменных не может рассматриваться как причина изменения другой. Корреляция возникает на основе общих причин, совместно влияющих на обе переменные.

В математике, информатике и исследовании операций оптимизацией называется задача нахождения экстремумов целевой функции в некоторой области конечномерного пространства, ограниченного набором линейных или нелинейных равенств и/или неравенств. Задача оптимизации формулируется следующим образом: среди элементов $X^{(X_k X_l)}$, образующих множество S , найти такой элемент $X^{(X_k X_l)*}$, который доставляет минимальное значение, $r(X_k X_l)^*$ заданной функции $r(X_k X_l)$.

Рассмотрим систему случайных величин: (X_1, X_2, X_3, X_4) или случайный вектор \vec{X} с составляющими X_1, X_2, X_3, X_4 .

Используя табл. 17, составим векторы подсистем

$$\left(\overline{X_i^{r_{X_i X_j}}}, \overline{X_j^{r_{X_i X_j}}} \right)$$

системы \vec{X} с указанием в надстрочном индексе соответствующего элемента корреляционной матрицы $r_{X_i X_j}$ с учетом того, что $r_{X_i X_j} = r_{X_j X_i}$ и $i \neq j$ при $i, j = 1, 2, 3, 4$:

$$\left(\overline{X_1^{r_{X_1 X_2}}}, \overline{X_2^{r_{X_1 X_2}}} \right), \left(\overline{X_1^{r_{X_1 X_3}}}, \overline{X_3^{r_{X_1 X_3}}} \right), \left(\overline{X_1^{r_{X_1 X_4}}}, \overline{X_4^{r_{X_1 X_4}}} \right), \quad (30)$$

$$\left(\overline{X_2^{r_{X_2 X_3}}}, \overline{X_3^{r_{X_2 X_3}}} \right), \left(\overline{X_2^{r_{X_2 X_4}}}, \overline{X_4^{r_{X_2 X_4}}} \right), \left(\overline{X_3^{r_{X_3 X_4}}}, \overline{X_4^{r_{X_3 X_4}}} \right).$$

Составим векторы одноименных по нижним индексам случайных величин

$$\left(\overline{X_1^{r_{X_i X_j}}} \right), \left(\overline{X_2^{r_{X_i X_j}}} \right), \left(\overline{X_3^{r_{X_i X_j}}} \right), \left(\overline{X_4^{r_{X_i X_j}}} \right)$$

с указанием в надстрочных индексах соответствующих элементов корреляционной матрицы:

$$\left(\overline{X_1^{r_{X_1 X_2}}}, \overline{X_1^{r_{X_1 X_3}}}, \overline{X_1^{r_{X_1 X_4}}} \right), \left(\overline{X_2^{r_{X_1 X_2}}}, \overline{X_2^{r_{X_2 X_3}}}, \overline{X_2^{r_{X_2 X_4}}} \right), \quad (31)$$

$$\left(\overline{X_3^{r_{X_1 X_3}}}, \overline{X_3^{r_{X_2 X_3}}}, \overline{X_3^{r_{X_3 X_4}}} \right), \left(\overline{X_4^{r_{X_1 X_4}}}, \overline{X_4^{r_{X_2 X_4}}}, \overline{X_4^{r_{X_3 X_4}}} \right).$$

Вычислим средние значения коэффициентов корреляции каждого из векторов (31):

$$\left(\overline{X_1^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = \frac{1}{3} (r_{X_1 X_2} + r_{X_1 X_3} + r_{X_1 X_4}) \right),$$

$$\left(\overline{X_2^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = \frac{1}{3} (r_{X_1 X_2} + r_{X_2 X_3} + r_{X_2 X_4}) \right), \quad (32)$$

$$\left(\overline{X_3^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = \frac{1}{3} (r_{X_1 X_3} + r_{X_2 X_3} + r_{X_3 X_4}) \right),$$

$$\left(\overline{X_4^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = \frac{1}{3} (r_{X_1 X_4} + r_{X_2 X_4} + r_{X_3 X_4}) \right).$$

Подставив в выражения (32) числовые значения коэффициентов корреляции из табл. 6, получим:

$$\left(\overline{X_1^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,78 \right), \left(\overline{X_2^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,84 \right), \quad (33)$$

$$\left(\overline{X_3^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,70 \right), \left(\overline{X_4^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,44 \right).$$

Выполнив ранжирование (полный перебор) случайных величин $X^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}$ ($n = 1, 2, 3, 4$) от min до max по среднему значению коэффициентов корреляции $\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)$, получим:

$$\left(\overline{X_4^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,44 \right), \left(\overline{X_3^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,70 \right), \quad (34)$$

$$\left(\overline{X_1^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,78 \right), \left(\overline{X_2^{\frac{1}{3} \sum_{r \in S} r(X_k, X_l)}} = 0,84 \right).$$

В содержательных обозначениях ранжированная последовательность критериев распознавания записывается в виде: $Q(q_{n,i;P_n,i}), Q(q_{n,i;P_n}), Q(q_{n,i}), Q^-(q_{n,i})$. Таким образом, выбор оптимального критерия распознавания качества жизни, выполненный количественным методом и путем качественной оценки, совпадают.

Использованные в статье критерии распознавания не исчерпывают их перечня. Возможно использование и других критериев: среднего степенного, среднего Колмогорова, гармонического среднего, среднего геометрического взвешенного и т. п. Разные критерии (модели) распознавания могут привести к различным результатам. В этом нет ничего неожиданного. *Разнообразие подходов позволяет выбрать наилучший из них. Среди задач работы указана разработка алгоритма выбора оптимального критерия распознавания качества жизни населения. Такой алгоритм впервые предложен в этой статье. И оптимальный критерий распознавания с его помощью выбран. Им является критерий $Q(q_{n,i;P_n,i})$ (среднее взвешенное по значимости признаков качества жизни).*

Выводы

1. В статье впервые выполнена оценка временной изменчивости качества жизни населения России за период 1910–2015 годов. Показано, что большую часть времени качество жизни россиян оценивается как «умеренно угнетенное». На двух временных интервалах – начало 1930-х годов (время коллективизации сельского хозяйства и голодомора) и первая половина 1940-х годов (Великая Отечественная война) – качество жизни относится к классу «сильно угнетенное». «Лихие девяностые годы» также вплотную приближаются к этому классу. На интервале 1965–1987 годов (время «застоя» в экономике) качество жизни устойчиво оценивается как «слабо угнетенное».

2. Рассмотрена возможность использования трендов качества воды и/или трофического статуса пресноводных водоемов и водотоков, расположенных в экономически развитых районах страны, для характеристики загрязнения окружающей среды в целом.

3. Предложен и реализован алгоритм построения алфавита классов качества жизни, функционально связанный с пространством классификационных признаков и их градациями.

4. Реализованы четыре модели оценки качества жизни населения в пространстве признаков «уровень питания», «уровень медицинского обслуживания», «уровень загрязнения». В моделях в качестве критериев распознавания используются среднее арифметическое ($Q(q_{n,i})$), среднее геометрическое ($Q^-(q_{n,i})$), среднее взвешенное по факторам смертности ($Q(q_{n,i};P_{n,i})$) и среднее взвешенное по значимости признаков качества жизни ($Q(q_{n,i};P_n)$).

5. Сопоставление модельных сценариев временной изменчивости качества жизни населения России с аналогичными оценками, предложенными экспертами ООН, показало, что использованные экспертами ООН признаки: ожидаемая продолжительность жизни, ВНД на душу населения, уровень образования и его перспективное развитие – не являются репрезентативными для оценки качества жизни населения России. Репрезентативными признаками, рассмотренными в статье, являются: уровень питания, уровень медицинского обслуживания населения и уровень загрязнения окружающей среды.

6. Использование различных алгоритмов и критериев распознавания оказывает существенное влияние на

оценку временной изменчивости качества жизни населения России. Предпочтения заслуживают: алгоритм вычисления среднего взвешенного совокупности признаков с весами, соответствующими значимости показателей качества жизни, и алгоритм вычисления среднего взвешенного по факторам смертности населения. При их реализации хорошо прослеживаются определяемые логикой событий основные социально-экономические, внешне- и внутривитальные этапы развития страны.

7. Предложен алгоритм выбора оптимального критерия распознавания качества жизни населения из совокупности критериев и ранжирования этой совокупности по степени пригодности критериев для практического использования. Основные этапы социально-экономического развития России в XX – начале XXI века могут служить индикаторами, обеспечивающими оценку пригодности применяемых в работе алгоритмов распознавания качества жизни населения. Наличие индикаторов дает возможность пересмотреть класс системы распознавания образов. Этапы-индикаторы позволяют не только подтвердить выбранный принцип распознавания качества жизни населения России, определить все классы качества жизни, но и распознавать, в деталях, особенности ее временной изменчивости внутри градаций алфавита классов.

Благодарности. Авторы выражают признательность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за поддержку исследований в рамках выполнения гранта № 18-05-00328-а.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Айвазян СА. Сравнительный анализ интегральных характеристик качества жизни населения субъектов Российской Федерации / Препринт # WP/2001/125. М.: ЦЭМИ РАН; 2001.
2. Беляев ВС. Теория сложных геосистем. Киев: Наукова думка; 1978.
3. Бобков ВН, Денисов НА, Маликов НС. Оценка качества жизни населения на основе системы социальных стандартов. Уровень жизни населения регионов России. 2009;(6):19-24.
4. Глухов ВВ, Окрепилов ВВ. Управление качеством жизни. СПб.: Наука; 2008.
5. Голубев АГ. Парниковые газы, культурные традиции и ожидаемая продолжительность жизни: история с географией. Биосфера 2012;4(4):474-87.
6. Голубев АГ. Куда нас выводит кривая Престона? Успехи геронтологии. 2018;31(5):616-27.
7. Гумилев ЛН. Этносфера. История людей и история природы. М.: Экспресс; 1993.
8. Калабеков ИГ. Россия и страны мира в цифрах. <http://kaig.ru/>
9. Кулеш ВП, Сергеев ЮН. Экологическая ниша Хатчинсона как показатель качества жизни населения. Вестник СПбГУ. 2016;7(4):66-81.

10. Лопатников ЛИ. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки. М.: Дело; 2003.
11. Мартинчик АН. Индексы качества питания как инструмент интегральной оценки рациона питания. Вопросы питания. 2019;88:5-12.
12. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. Дмитриев ВВ, Хованов НВ (ред). Деп. ВИНТИ 01.09.2000 № деп. 2342В00. <https://proxy.library.spbu.ru:3693/item.asp?id=30689943>.
13. Оленьев ВВ, Федоров АП. Глобалистика на пороге XXI века. Вопросы философии. 2003;(4):18-30.
14. Пастухов ЕВ, Соловьева АА, Волкова ЛД. Антропогенный фактор как ускоритель биотического и геохимического циклов лимнических систем. Пятый съезд Всесоюзного гидробиологического общества. Ч. 2 Куйбышев; 1986. С. 280-1.
15. Реймерс НФ. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Мысль; 1990.
16. Сергеев ЮН, Лю С. Модели водных экосистем. Имитации антропогенного эвтрофирования водоемов. СПб.: ГеоГраф; 2005.
17. Сергеев ЮН, Денисенко АВ, Дмитриев ВВ, Кулеш ВП. Модель распознавания образов как инструмент для оценки качества вод Невской губы. Изв. РГО. 2018;150(5S):3-16. DOI: 10.1134/S0869607118050075.
18. Талалушкина ЮН. Анализ качества жизни населения в России. Экономический анализ: теория и практика. 2014;(2):28-36.
19. Урланис БЦ. Эволюция продолжительности жизни. М.: Статистика; 1978.
20. Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука; 1978.
21. Хованов НВ. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.; 1996.
22. Хованов НВ. Оценка сложных экономических объектов и процессов в условиях неопределенности: к 95-летию метода сводных показателей АН Крылова. Вестник СПбГУ. 2005;5(1): 138-44.
23. Хит О. Фотосинтез (Физиологические аспекты). М.: Мир; 1972.
24. Чабан НП. Теория и алгоритмы распознавания образов. М.: МИИГАиК; 2004.
2. Beliayev VS. Teoriya Slozhnykh Gyeosistem. [The Theory of Complex Geosystems]. Kiev: Naukova Dumka; 1978. (In Russ.)
3. Bobrov VN, Denisov NA, Malikov NS. [Assessment of the quality of life of the population based on the system of social standards]. Uroven Zhizni Naseleniya Regionov Rossii 2009;6:19-24. (In Russ.)
4. Glukhov VV, Okrepilov VV. Upravleniye Kachestvom Zhizni. [Quality of Life Management]. Saint Petersburg: Nauka; 2008. (In Russ.)
5. Golubev AG. [Greenhouse gases, cultural traditions and life expectancy: History and geography]. Biosfera. 2012;4:474-87. (In Russ.)
6. Golubev AG. [Where does the Preston curve take us?]. Uspekhi Gerontologii 2018;31(5):616-27. (In Russ.)
7. Gumilev LN. Etnosfera. Istoriya Liudey i Istoriya Prirody. [The Ethnosphere. The history of People and the History of Nature]. Moskva: Ekopros; 1993. (In Russ.)
8. Kaladekov IG. Rossiya i Strany Mira v Tsifrakh. [Russia and the Countries of the World by Numbers]. <http://kaig.ru/> (In Russ.)
9. Kulesh VP, Sergeev YuN. [Hutchinson's ecological niche as an indicator of the quality of life of the population]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. 2006;7(4):66-81. (In Russ.)
10. Lopatnikov LI. Ekonomiko-Matematicheskii Slovar': Slovar' Sovremennoy Ekonomicheskoy Nauki. Moscow: Delo; 2003.
11. Martinchik AN. Indices of diet quality as an instrument of the integral assessment of nutritional ration. Voprosy Pitaniya. 2019;88:5-12.
12. Mnogokriterialnaya Geografoekologicheskaya Otsenka Sostoyaniya i Ustoychivosti Prirodnykh i Urbanizirovannykh Sistem. [Multicriterial Geographic and Ecological Assessments of the State and Sustainability of Natural and Urbanized Systems]. Ed. by Dmitriev VV, Khovanov NV. Dep. VINITI 01.09.2000 № 2342V00. <https://proxy.library.spbu.ru:3693/item.asp?id=30689943>. (In Russ.)
13. Olenev VV, Fedorov AP. [Globalistics at the turn of the 21st century]. Voprosy Filosofii. 2003;(5):18-30. (In Russ.)
14. Pastukhov YeV, Solovyeva AA, Volkova LD. Antropogennyye Faktory Kak Uskoritel Bioticheskogo i Geokhimicheskogo Tsiklov Limnitheskikh Sistem. [Anthropogenic factor as an accelerator of biotic and geochemical cycles of limnic systems]. In: 5th Syezd Vsesoyuznogo Gidrobiologicheskogo

Общий список литературы/References List

1. Aivazyan SA. Sravnitelny Analiz Integralnykh Kharakteristik Kachestva Zhizni Naseleniya Subyektov Rossiyskoy Federatsii. [Comparative Analysis of the Integral Characteristics of the Quality

- Obshchestva. Vol. 2. Kuybyshev; 1986. P. 280-1. (In Russ.)
15. Reymers NF. Prirodopolzovaniye. [Nature Management]. Moscow: Mysl; 1990. (In Russ.)
 16. Sergeyev YuN, Lu S. Modeli Vodnykh Ekosistem. Imitatsii Antropogennogo Evtrofirovaniya Vodoyemov. [Models of Aquatic Ecosystems. Simulation of Anthropogenic Eutrophication of Water Bodies]. Saint Petersburg: GeoGraf; 2005. (In Russ.)
 17. Sergeyev YuN, Denisenko AV, Dmitriev VV, Kulesh VP. [Pattern recognition model as a tool for assessing water quality of Neva Bay]. Izvestiya RGO.2018;150(5S):3-16. DOI: 10.1134/S0869607118050075. (In Russ.)
 18. TalalushkinaYuN. [Analysis of the quality of life of the population in Russia]. Ekonomicheskii Analiz Teoriya i Praktika. 2014;2(353):28-36. (In Russ.)
 19. Uralnis BTs. Evoliutsiya Prodolzhitel'nosti Zhizni. [Lifespan Evolution]. Moscow: Statistika; 1978. (In Russ.)
 20. Forrester DZh. Mirovaya Dinamika. [World dynamics]. Moscow: Nauka; 1978. (In Russ.)
 21. Khovanov NV. Analiz i Sintez Pokazateley Pri Informatsionnom Defitsite. [Analysis and Synthesis of Indicators upon Information Deficit]. Saint Petersburg; 1996. (In Russ.)
 22. Khovanov NV. [Assessment of complex economic objects and processes in conditions of uncertainty: To the 95th anniversary of the AN Krylov's method of summary indicators]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. 2005;5(1):138-44. (In Russ.)
 23. Khit O. Fotosintez (Fiziologicheskie Aspekty). [Photosynthesis (Physiological Aspects)]. Moscow: Mir; 1972. (In Russ.)
 24. Chaban NP. Teoriya i Algoritmy Raspoznavaniya Obrazov. [Pattern Recognition Theory and Algorithms]. Moscow: MIIGAIK; 2004. (In Russ.)
 25. Bauer RA. Social Indicators. Cambridge, Mass., London: MIT Press; 1966.
 26. Brousmiche D, Occelli F, Genin M, Cuny D, Deram A, Lanier C. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. Ecological Indicators. 2020;111:106023.
 27. Dmitriev VV, Kaledin NV. Russian Northwest: An integral assessment of the conditions of regional social, environmental and economic systems and quality of life. Baltic Region. 2016;8(2):87-98. DOI: 10.5922/2079-8555-2016-2-7.
 28. Dmitriev V, Kulesh V, Sergeev Yu. Integral Assessment of the Sustainability of Socio-Ecological and Economic Systems and the Quality of Life of the Population in the Regions of the Arctic Zone of the Russian Federation. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. Vol. 302. IOP Publishing; 2019. DOI:10.1088/1755-1315/302/1/012135.
 29. Galbraith JK. The Affluent Society. Boston: Houghton Mifflin; 1958.
 30. Global, regional, and national life expectancy, all-cause mortality, and cause-specific mortality for 249 causes of death, 1980-2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. Lancet. 2016;388:1459-544. doi:10.1016/s0140-6736(16)31012-1.
 31. Meadows DL, Meadows DH. Dynamics of Growth in a Finite World: Cambridge (Mass): Wright Allen Press Inc; 1974.
 32. HELCOM. The fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-5). Baltic Sea Environment Proc. № 2011a.
 33. HELCOM. Eutrophication Status of the Baltic Sea 2007-2011. A Concise Thematic Assessment of Baltic Sea Environment. 2011.
 34. Odum EP Fundamentals of Ecology. W. B. Saunders Company, Philadelphia-London-Toronto; 1971.
 35. Preston SH. The changing relation between mortality and level of economic development. Population Studies. 1975;29: 231-48.
 36. Starodubov V et al. The burden of disease in Russia from 1980 to 2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study. The Lancet. 2016;392:1138-46. doi:10.1016/S0140-6736(18)31485-5.
 37. Wheatcroft SG. (1999) The Great Leap Upward: Anthropometric Data and indicators of crises and secular change in Soviet welfare levels, 1880-1960. Slavic Review. 1999;58:27-60.

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

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

Это первая часть обзора работ по изучению адаптивных реакций древесных растений на техногенные изменения среды. Рассмотрены научные публикации, в которых описаны макро- и микроморфологические изменения хвои и листьев древесных растений. Выделены специфические и неспецифические реакции разных древесных видов как на один и тот же техногенный фактор, так и на разные виды воздействия, включая искусственную фумигацию и внесение токсикантов в среду. Показана относительная независимость адаптивных реакций в пределах листа и хвои, несмотря на единство и целостность этих органов. Обсуждаются причины данных поливариантных реакций, лежащие в основе адаптивного потенциала, принципа множественного обеспечения биологически необходимых функций для сохранения гомеостаза, толерантности видов к техногенезу.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, макро-, микроморфология хвои/листьев, адаптивные реакции.

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

R.V. URAZGILDIN*, A.YU. KULAGIN

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

Email: urv@anrb.ru

The first of a series of reviews of the adaptive responses of woody plants to anthropogenic environmental changes addresses publications where macro- and micromorphological changes of leaves and needles are described. Specific and nonspecific responses of different species to the same factor or to different factors including experimental fumigation and toxicant application are delineated. The relative independency of different adaptive responses within a leaf or needle is demonstrated despite that these organs are highly integrated entities. The causes of such diverse responses are discussed with emphasis on the importance of multiple ways of maintenance of biological functions for homeostasis and tolerance to anthropogenic impacts.

Keywords: industrial pollution, macro- and micromorphology, leaves and needles, adaptive responses.

Введение

Лист является наиболее чувствительным и в то же время информативным органом растительного организма, отражающим влияние изменчивых условий окружающей среды. Длительное постоянное воздействие техногенных загрязнителей на растительность

приводит к изменению анатомического строения листьев растений и их выраженной ксероморфизации, что проявляется в изменении размеров листьев, клеток, толщины эпидермиса, мезофилла, в более мощном развитии механической ткани, увеличении плотности жилкования и плотности устьиц на 1 мм²

поверхности листа, уменьшении ширины устьичных щелей в течение дня и т. д. Наибольшие морфологические изменения претерпевают листья, подвергающиеся действию химических веществ в зачаточном состоянии. Наиболее общей реакцией, возникающей в процессе приспособления к условиям загрязнения, является редукция площади листа. Уменьшение размеров листовой пластинки в неблагоприятных условиях среды обусловлено короткой стадией деления клеток, подавлением фазы растяжения клеток из-за недостатка ассимилянтов и нарушения гормональной регуляции роста, быстрой дифференциацией тканей, снижением скорости роста листьев и ранним их старением. Сокращение листовой поверхности ведет в свою очередь к снижению транспирации, уменьшению поглощенного излучения и, следовательно, к снижению фотосинтетической активности. Слоистость мезофилла при этом у растений, не имеющих специализированной хлорофиллоносной обкладки проводящих пучков, увеличивается, и особенно сильно развивается палисадная ткань [1, 7, 13, 15, 16, 20, 24, 27–29, 36, 37, 49]. Увеличение числа слоев и плотности столбчатых клеток до некоторой степени компенсирует малую площадь листа. Вместе с тем, основные направления структурных адаптаций листьев в условиях стресса связывают с развитием плотной упаковки клеток мезофилла (пикноморфное), склеренхимной обкладки пучков прокамбиального происхождения (склероморфное) и большого объема водоносной паренхимы (суккулентное) [8, 10]. Сделан вывод, что увеличение плотности жилкования является показателем процесса адаптации к антропогенным нагрузкам, а его ослабление – признак угнетения растения [14].

Анализ большого массива публикаций показывает, что в дендрэкологии к специфическим адаптивным реакциям принято относить следующие морфологические изменения: уменьшение линейных размеров, площади и массы листа/хвои, размеров устьиц, толщины губчатой паренхимы; увеличение устьичной плотности, плотности жилкования, толщины листа и всех тканей (кроме губчатой паренхимы) и др. Данные адаптивные реакции направлены на активное ограничение влияния стрессового фактора и уменьшение проникновения токсикантов внутрь ассимиляционного аппарата.

Таким образом, макро- и микроморфология хвои и листьев очень часто используются для мониторинга повреждения промышленными загрязнителями. Наиболее общей и частой реакцией для всех видов растений в дендрэкологии считается усиление ксероморфности вегетативных органов древесных растений, с другой стороны, различные промышленные загрязнители по-разному влияют на их морфологию, и ответные реакции могут быть как специфическими, так и неспецифическими.

1. Влияние техногенеза на макроморфологию ассимиляционного аппарата: специфические и неспецифические реакции

Обзор влияния техногенеза на макроморфологические параметры ассимиляционного аппарата древесных растений проведен по климатическим зонам в направлении с запада на восток. В первую очередь дан обзор Европейской зоны в пределах Российской Федерации: Мурманск-Мончегорск-Москва-Арзамас-Йошкар-Ола-Казань-Сыктывкар-Ижевск-Уфа-Кемерово-Красноярск-Иркутск. Второй пояс составляют зарубежные страны Европы, Азии и островов Тихого океана: Польша-Болгария-Иран-Пакистан-Индия-Филиппины. Третий пояс составляют континенты Северной и Южной Америки, а также Африка.

Исследования динамики роста листьев и годичных побегов эндемичного вида Фенноскандии рябины Городкова (*Sorbus gorodkovii* Pojark) в условиях полиметаллического загрязнения медно-никелевого комбината «Печенганикель», расположенного в арктической зоне РФ, выявили, что промышленное загрязнение оказывает значительное ингибирующее воздействие на апикальный рост листьев. Особенно этот эффект выражен в начале вегетации, когда длина листьев в условиях загрязнения на 60–77% меньше контрольных значений, к середине вегетации ингибирование роста снижалось до 50%, во второй половине вегетации – до 30–40%, к концу вегетации – до 16–26%. Длина побегов на экспериментальных площадках меньше контрольных значений на 50–60%, причем рост побегов ингибировался более значительно, чем рост листьев. Аналогичные данные были получены в условиях урбанизированной территории при исследовании ценопопуляций *S. gorodkovii* в г. Мурманске [11, 12].

Основным источником техногенного загрязнения окружающей среды г. Мончегорска является крупнейший в Европе комбинат цветной металлургии «Североникель», от которого в атмосферу поступают загрязнители в виде сульфидов и пыль, содержащая тяжелые металлы (никель, медь, кобальт). Техногенное загрязнение ингибировало рост побегов и размеры листьев (длина и ширина) березы Черепанова на протяжении всего вегетационного периода, причем этот эффект наиболее выражен в первые дни вегетации в зонах техногенной пустоши и редколесья [23]. При этом уточняется, что в экотопах со средним уровнем загрязнения наблюдалось увеличение размеров листьев берез, а при возрастании степени загрязнения тяжелыми металлами размеры листьев значительно уменьшались, и начинали преобладать процессы ксерофитизации [18]. Однако у ели сибирской в этих же условиях наблюдалась нелинейная изменчивость мор-

фометрических характеристик хвои: на стадии интенсивной дефолиации длина и масса хвои достоверно больше, чем в фоновых условиях, что обусловлено возрастанием подвижности элементов питания в почве, а на последующих стадиях происходило снижение этих характеристик. Наименьшую относительную массу имели хвоя текущего года и однолетняя хвоя на последних стадиях разрушения (стадия редколесья) [32]. Степень изменений в анатомическом и морфологическом строении ассимиляционных органов зависит от концентрации и токсичности загрязняющих веществ, а также от длительности их действия и чувствительности видов. Высокие концентрации металлов вызывают ксерофитизацию и задержку роста листьев, в то время как низкие приводят к увеличению их размеров, что связано с растяжением клеток и увеличением межклеточных пространств [4].

В насаждениях ели европейской в зонах действия промышленных выбросов предприятий Московской области не установлено достоверных различий с контролем по длине, толщине хвои и ее массе в абсолютно сухом состоянии, но выявлено устойчивое снижение количества хвои на годичных побегах (до 47%), плотности охвоения побегов, возраста хвои (на 2–3 года), линейного прироста боковых побегов (длина – до 39%, диаметр – до 25–31%) и их сухой массы (до 50%) [3].

Изучены морфологические показатели листьев липы *Tilia cordata* Mill., тополя *Populus tremula* L. и двух ив *Salix fragilis* L., *Salix alba* L. из разных городских районов Арзамаса, характеризующихся разным уровнем техногенного загрязнения и развитыми отраслями машиностроения, приборостроения, производства строительных материалов и др. Увеличение техногенной нагрузки приводило к уменьшению размеров листьев, повышению содержания золы и увеличению массы листьев. Полученные данные указывают на большую устойчивость *T. cordata*, *S. fragilis* и *S. alba* к загрязнителям в сравнении с *P. tremula* [61].

В г. Йошкар-Оле (доля выбросов автотранспорта составляет 70–85%, промышленных предприятий – 15–30%) в техногенной среде у молодых генеративных деревьев березы *Betula pendula* Roth уменьшался суммарный прирост и среднестатистический прирост побегов за год, а у старых генеративных деревьев проявлялась поливариантность морфологии удлинённых побегов: увеличивалась длина побегов третьего порядка (за счет значительного растяжения междоузлий) и числа побегов четвертого порядка, однако число метамеров на годичном побеге и количество укороченных побегов четвертого порядка оставалось постоянным у особей всех генеративных групп. У молодых и средневозрастных генеративных групп деревьев липы *Tilia cordata* Mill. происходило угнетение ростовых процессов удлинённых побегов, которое вы-

ражалось в уменьшении среднегодового прироста, числа метамеров и числа побегов следующего порядка, а у старовозрастных генеративных деревьев, напротив, отмечалась активация ростовых процессов побегов – увеличивался среднегодовой прирост (в 1,3–1,6 раз), число метамеров и побегов следующего порядка. Кроме того, у *T. cordata* уменьшались линейные размеры и емкость почек, а у *B. pendula* изменения этих параметров отсутствовали. На основании этих исследований сделан вывод, что *B. pendula* является более приспособленной к специфическому микроклимату и загрязнению среды г. Йошкар-Олы [35].

Показано, что в условиях Казанского промышленного центра, представляющего собой совокупность химических и нефтехимических производств с преобладающим углеводородным типом загрязнения, длина однолетней хвои и побегов 1, 2 и 3 годов сосны обыкновенной значительно превосходила контрольные значения, а у березы бородавчатой, напротив, наблюдались значительное уменьшение размеров листьев и интенсивный преждевременный листопад, однако достоверных различий по длине одно- и двухлетних побегов не обнаружено [5].

В зоне загрязнения Сыктывкарского лесопромышленного комплекса отмечено увеличение длины хвои ели *Picea obovata* Ledeb., но уменьшение площади поперечного сечения. Указывается, что после сокращения объемов выбросов загрязняющих веществ различия стали менее выраженными [34].

В условиях г. Ижевска (наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносят предприятия черной металлургии, теплоэнергетики, машиностроения, а в составе выбросов присутствуют диоксид углерода, оксиды азота, диоксид серы, углеводороды, органические соединения, пыль) установлено, что с увеличением техногенной нагрузки происходило удлинение годичного побега у ивы козьей, рябины обыкновенной, яблони ягодной, тополя бальзамического и березы повислой [9].

Углеводородное загрязнение способствует проявлению видоспецифических реакций у древесных видов в условиях нефтехимического загрязнения Уфимского промышленного центра, вызывая усиление ксероморфности одних морфологических параметров и ослабление других: у сосны наблюдалось увеличение размеров хвои при уменьшении ее массы, у лиственницы и дуба – уменьшение размеров хвои и листьев при увеличении их массы, у ели – увеличение размеров и массы хвои, у липы – уменьшение размеров листьев при стабильности их массы, у березы – уменьшение всех морфологических параметров. При этом у сосны, лиственницы, дуба и ели побеги удлинялись, а у липы и березы побеги укорачивались. Следовательно, только у березы проявлялась «классическая» ответная реакция – ксероморфизация листьев и побегов. По степени усиления ксероморфности ассимиляци-

онного аппарата в ответ на промышленное загрязнение исследуемые виды образуют ряд ель<сосна<дуб<лиственница<липа<береза. Указывается, что листовым древесным видам в целом характерна большая степень ксероморфности ассимиляционного аппарата, чем хвойным [2, 6, 19, 21, 30, 31].

На территории г. Кемерово источниками загрязнения атмосферного воздуха являются Кемеровская ГРЭС, КОАО «Химпром», ОАО «Кокс», а приоритетными выбросами являются оксиды азота, диоксид серы, оксид углерода, полиароматические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен, и взвешенные вещества. Показано достоверное удлинение годичных побегов древесных видов в непосредственной близости от промзоны по сравнению с самой удаленной от промзоны точкой: у ели сибирской – на 54–57%, у рябины сибирской – на 14–25, у березы повислой – на 30–116%. У сосны обыкновенной, напротив, уменьшался прирост годичных побегов в длину, снижались сухой вес и продолжительность жизни хвои, но увеличивалась ее длина [22, 26].

Комплексный анализ хвои ели сибирской, произрастающей в магистральных посадках г. Красноярск, показал, что общей тенденцией являлось снижение сырого (на 9–61%) и абсолютно-сухого веса хвои (на 9–55%), количества хвоинок на побеге второго и третьего годов жизни (на 15–34%) относительно контрольных значений. Однако отличий по длине хвои не выявлено [17].

Исследовались изменения в морфологии хвои сосны обыкновенной при нарушении почвенных элементов питания в условиях атмосферного загрязнения Иркутско-Черемховского промышленного центра, выбросы которого обусловлены предприятиями теплоэнергетики, металлургии, химической и нефтехимической промышленности и содержат соединения серы и азота, оксиды углерода, пыль, стойкие органические загрязнители и др. Показано, что в условиях загрязнения уровень S, F, Fe, Al, Pb, Cd, Hg, N, Ca, Mg в сосновой хвое увеличивался, а содержание P, K, Mn, наоборот, уменьшалось. Это приводило к снижению длины и массы хвои, длины побегов, количества хвоинок на побегах. Сделан вывод, что воздействие атмосферных техногенных загрязнителей приводит к системному нарушению функционирования организма растений [56].

Проведены исследования реакций листьев липы сердцевидной *Tilia cordata* Mill. по отношению к промышленному загрязнению на юго-западе Польши на территории провинции Нижняя Силезия, которая подвергается выбросам от различных пылегазовых загрязнений от точечных источников (медной, угольной и энергетической промышленности). Выявлено, что большая площадь и ширина листьев соответствовали

участкам с более высокими концентрациями металлов в почвах и листьях, а более низкие значения этих параметров относились к участкам, непосредственно не подвергающимся промышленным и городским выбросам. Аналогичным образом на загрязненных участках была зафиксирована значительная асимметрия листьев, в то время как листья из незагрязненных участков менее асимметричны. Более высокие коэффициенты вариабельности проанализированных параметров листьев также имели место в загрязненных участках. Высокая и значительная дифференциация листовых черт между участками являлась реакцией на загрязнение окружающей среды [50].

В условиях загрязнения SO_2 , N_xO_x , Pb, As, Zn, Cu, промышленной пылью и др. в районе сталелитейного завода «Kremikovtzi» в Софийской долине (Болгария) у деревьев клена *Acer platanoides* L. наблюдались значительно ускоренные распускание, рост и развитие листьев на начальных этапах (апрель) вегетационного периода: листья появились на две недели раньше, а линейные размеры и площадь вдвое больше в сравнении с контролем (Национальный парк Витоша). Данные реакции рассматриваются как адаптация растений к промышленному загрязнению, то есть признак толерантности. Однако у зрелых листьев (май-октябрь) размеры листовых пластинок в условиях загрязнения, напротив, значительно меньше. У платана *Platanus acerifolia* Willd. площадь листа в условиях загрязнения снижалась приблизительно в два раза, а листья практически не повреждались хлорозами и некрозами. У ясеня *Fraxinus americana* L. в условиях загрязнения в два раза снижалась площадь листа (на $44,1 \text{ см}^2$), а на листьях наблюдалось множество мелких некротических пятен [45–47].

Ряд исследований посвящен оценке морфологических параметров древесных видов в Иране. В условиях высоких уровней промышленного загрязнения от нефтехимических компаний в высокотемпературных районах Ирана основными токсикантами являются NO_x , SO_2 , CO, HF, NH_3 , Cl, HCl, CaO, CaCO_3 , твердые и жидкие аэрозоли и органические соединения, повышенные концентрации Si, Al, Na, Fe, Cd и более низкие концентрации Mg, Ca, Ni, Pb, Cu, Zn, Mg, а также пыль. Были исследованы леса каллистемона *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels (10–15-летние деревья) в промышленном районе города Махшахр на юге Ирана, альбиции *Albizia lebeck* Benth. в районе Хузестан и пропозиса *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. вокруг одного из нефтяных месторождений на юго-западе Ирана. Все морфологические признаки *C. citrinus* и *P. juliflora* (длина, ширина и площадь листа, длина черешка) показали уменьшение в условиях загрязнения по сравнению с контролем, однако морфологические признаки *A. lebeck* показали увеличение длины и ширины листьев, но уменьшение площади листа, что говорит

об изменении формы листа под влиянием нефтехимического загрязнения [62–65]. Изменения листьев вяза (*Ulmus minor* «Umbraculifera») были исследованы в условиях слабого, сильного и очень сильного автотранспортного загрязнения воздуха в Тегеране. Результаты показали, что при усилении загрязнения длина, ширина, площадь и флуктуирующая асимметрия листа, а также длина черешка значительно, но статистически недостоверно увеличивались, из чего сделан вывод об относительной устойчивости макроморфологических черт листьев вяза к загрязнению. При этом значительно, но также статистически недостоверно уменьшается плотность листовых зубчиков и удельная площадь листа [38]. Результаты исследования морфологических особенностей ясеня *Fraxinus rotundifolia* Mill. и шелковицы *Morus alba* L. вдоль дороги Малайер-Хамедан с высоким трафиком движения в провинции Хамедан показали, что по мере приближения к дороге (30→20→10 м) и усиления загрязнения размеры листьев (длина и ширина) у обоих видов значительно уменьшались (особенно у *M. alba*), при этом значительно увеличивались количество листовых зубчиков и количество жилок (особенно у *M. alba*). Количество жилок обоих растений характеризовалось низкой пластичностью по отношению к усилению загрязнения [39].

Ряд статей посвящен исследованиям морфологии листьев деревьев в различных городах Пакистана. Город Карачи, будучи индустриальным центром, страдает как от промышленных, так и автомобильных выбросов (оксиды азота и серы, углеводороды, озон, твердые частицы, фторид водорода, пероксиацилнитраты и т. д.). Показано, что вдоль центральной автодороги Гуру Миндира (самая высокая плотность транспортных средств) у листьев фикуса *Ficus bengalensis* L. и эвкалипта *Eucalyptus sp.* незначительно и недостоверно уменьшались длина, ширина и площадь листа и длина черешка по сравнению с контролем, а у гваякового дерева *Guaiacum officinale* L. – значительно и достоверно [48]. Изучено влияние загрязнения воздуха в г. Кветта на морфологические характеристики листьев 13 видов растений: лох *Elaeagnus angustifolia* L., эвкалипт *Eucalyptus tereticornis* L., фикус *Ficus carica* L., ясень *Fraxinus excelsior* L., мелия *Melia azadirach* L., шелковицы *Morus alba* L. и *Morus nigra* L., фисташковое дерево *Fistacia vera* L., слива *Prunus armeniaca* L., гранат *Punica granatum* L., робиния *Robinia pseudo-acacia* L., роза *Rosa indica* L. и виноград *Vitis vinifera* L. Результаты показали, что в городских условиях у всех видов растений наблюдалось значительное снижение длины, ширины, площади листа и длины черешка по сравнению с незагрязненными пригородными условиями, причем значительные различия в этих параметрах выявлены в зависимости от сезона: максимальное их снижение обнаружено летом (на 33,9, 36,6,

37,1 и 46,2% соответственно), среднее – осенью, а наименьшее – весной (на 28,4, 23,5, 32,5 и 26,3% соответственно). Среди исследованных видов минимальное уменьшение длины (19,9%), ширины (17,8%), площади листа (22,7%) и длины черешка (2,6%) наблюдали у *Vitis vinefera*, *Fistacia vera*, *Ficus carica* и *Fistacia vera*, а максимальное снижение этих параметров (72,6, 50,6, 57,9 и 65,5% соответственно) отмечено у *Punica granatum*, *Elaeagnus angustifolia*, *Rosa indica* и *Eucalyptus tereticornis*. По мере старения растений степень уменьшения морфологических характеристик листьев в загрязненных условиях возрастала по сравнению с незагрязненными [53].

Серия работ направлена на исследования морфологии листьев деревьев в различных городах Индии. В пределах двухкилометровой зоны в районе металлургических и химических заводов промышленного центра Калунга с преимущественным загрязнением SO₂, NO_x и промышленной пылью показано уменьшение длины, ширины и площади листьев растений по мере приближения к источникам эмиссий, причем у одних видов значительное (сенна *Cassia siamea* Lam., манго *Mangifera indica* L., калотропис *Calotropis procera* (Aiton) Dryand., тамаринд *Tamarindus indica* L.), а у других не столь значимое (лантана *Lantana camara* L., дальбергия *Dalbergia sissoo* Roxb., ним *Azadirachta indica* A. Juss, прутняк *Vitex negundo* L.). На значительное изменение формы листа указывает отсутствие у видов прямой связи между степенью уменьшения морфологических параметров, то есть значительному уменьшению площади листовой пластинки могли соответствовать незначительные уменьшения длины и ширины [68]. На разных расстояниях (0,5, 4 и 18 км) от места сброса летучей золы от Бадарпурской ТЭЦ в г. Нью-Дели выбраны три экспериментальных площадки с древостоями *A. indica*. Показано, что значительнее всего уменьшалась длина листа, меньше всего – ширина листа, а площадь листа в целом показывала тенденцию к снижению от контроля к среднезагрязненному участку, но при этом в условиях сильного загрязнения площадь листа значительно превосходила величину в среднезагрязненных и контрольных условиях [59]. Исследование эффективности удаления пыли городскими придорожными деревьями и влияния пылевой нагрузки на физиологию и морфологию листьев проведено на 12 пробных площадях в городе Ахмадабаде, имеющем источники загрязнения – теплоэлектростанцию, железнодорожную станцию и дороги. Результаты показали, что площадь листьев всех видов деревьев уменьшалась прямо пропорционально увеличению уровня загрязнения на протяжении всего года. Корреляция между пылевой нагрузкой и площадью листьев показала статистически высокую значимость у всех видов деревьев также на протяжении всего года. Самая высокая чувст-

вительность площади листьев к пыли обнаружена у фикуса зеленеющего *Ficus virens* Aiton, за которым следуют фикус священный *Ficus religiosa* L. > кассия *Cassia fistula* L. > ним *Azadirachta indica* A. Juss. Сухой вес листа значительно уменьшился в местах с высокой пылевой нагрузкой по сравнению с местами с меньшей пылевой нагрузкой. Максимальное сокращение биомассы листьев наблюдалось у *C. fistula* (42%), а *A. indica* показал наименьшую чувствительность в отношении сухой биомассы по сравнению с другими видами растений [43].

Сравнивали размеры листьев двух городских деревьев – птерокарпус *Pterocarpus indicus* forma *echinatus* Willd. и свитения *Sweetenia macrophylla* King, растущих в загрязненных (улицы с наибольшим потоком автотранспорта в день) и не загрязненных районах (пригородный поселок, расположенный на расстоянии 2 км от главной магистрали) города Кагаян-де-Оро (Филиппины). Результаты показали, что листья обоих видов, растущие в загрязненных условиях, значительно уступали по длине, ширине и площади по сравнению с контрольными условиями. Однако наблюдались вариации по длине черешка, причем в загрязненной области у *P. indicus* черешок длиннее, а у *S. macrophylla* короче, чем в контроле [41].

Сравнение морфологических характеристик листьев деревьев клена *Acer rubrum* L. в лесах небольшого (Ньюарк) и крупного (Филадельфия) городов (США) показало, что существенных различий в весе свежих и сухих листьев, площади сухих листьев и удельной площади листьев, содержании сухого вещества в листьях в кленовых древостоях этих городов не обнаружено, в целом эти морфологические черты сходны [55].

Проанализированы макроморфологические характеристики листьев бразильской вишни *Eugenia uniflora* L. вдоль главной городской дороги в Рио-де-Жанейро (Бразилия). Такие количественные параметры, как площадь и удельная площадь листа, масса сырого и сухого листа, толщина и плотность сырого листа, суккулентность существенно не различались между загрязненными условиями и контролем. Показано, что площадь, масса сырого и сухого листа характеризуются высоким индексом фенотипической пластичности [42].

В метрополисе Кумаси (Гана) исследованы изменения в листьях четырех придорожных деревьев: фикуса *Ficus platyphylla* Del., манго *Mangifera indica* L., полиалтии *Polyalthia longifolia* Sonn. и терминалии *Terminalia catappa* L. в условиях с экстремальной, тяжелой и эпизодической транспортной загруженностью. В сравнении с контролем во всех трех вариантах загрязненных условий наблюдается значительное уменьшение площади листьев у всех четырех пород

деревьев, однако при рассмотрении в градиенте увеличения степени загрязнения наблюдается значительное возрастание площади листьев от эпизодической до тяжелой загруженности и резкое падение в условиях экстремальной загруженности [69].

Оценены листья дерева брахилена *Brachylaena discolor* DC. в качестве биоиндикатора загрязнения диоксидом серы в промышленном районе Южный Дурбанский бассейн в Южной Африке. Показано значительное уменьшение площади листьев при увеличении уровня загрязнения на участках по сравнению с контролем, причем этот показатель значительно коррелировал с сезонным изменением концентраций SO_2 в приземном слое воздуха и в листьях. На всех исследованных участках максимальные размеры листьев всегда наблюдались весной, а минимальные – зимой, однако не удалось установить четкой зависимости между усилением степени загрязнения и изменением площади листьев по сезонам (весна-лето-осень-зима) [40].

II. Влияние техногенеза на микроморфологию ассимиляционного аппарата: специфические и неспецифические реакции

Обзор влияния техногенеза на микроморфологические параметры ассимиляционного аппарата древесных растений также проведен по климатическим зонам в направлении с запада на восток. В первую очередь дан обзор зарубежных стран Европы и Азии: Болгария-Саудовская Аравия-Иран-Пакистан-Непал-Бангладеш-Китай. Второй пояс составляют континенты Северной и Южной Америки, а также Африка. Отдельно показаны адаптивные реакции при искусственной имитации стрессовых условий.

Район сталелитейного завода «Kremikovtzi» в Софийской долине (Болгария) в значительной степени загрязняют SO_2 , N_xO_x , Pb, As, Zn, Cu, промышленная пыль и др. На фоне загрязнения у деревьев клена *Acer platanoides* L. на начальных этапах (апрель) вегетационного периода толщина листа, верхнего эпидермиса, столбчатой паренхимы, нижнего эпидермиса и нижней кутикулы в загрязненных условиях значительно снижались относительно контроля, но увеличивались толщина верхней кутикулы и губчатой паренхимы. Однако у зрелых листьев (май-октябрь) в анатомических параметрах наблюдалось следующее перераспределение: значительно увеличивались толщина листа, столбчатой и губчатой паренхимы, но становились тоньше верхний и нижний эпидермис, а верхняя и нижняя кутикулы имели одинаковую толщину в сравнении с контролем. Резко возрастающий коэффициент палисадности (который является индексом интенсивности газообмена в листьях) свидетельствует об увеличении доли столбчатой паренхимы на

фоне снижения доли губчатой паренхимы. У платана *Platanus acerifolia* Willd. значительно и достоверно увеличивались как толщина листа (на 100,8 мкм), так и толщина всех тканей (верхняя кутикула – на 5,2, верхний эпидермис – на 11,8, столбчатая паренхима – на 31, губчатая паренхима – на 43,7, нижний эпидермис – на 8,99, нижняя кутикула – на 0,18 мкм). Коэффициент палисадности в условиях загрязнения незначительно снижался относительно контроля (52 и 56% соответственно), что свидетельствует об уменьшении доли столбчатой паренхимы в мезофилле. Другая группа деревьев характеризовалась совершенно иными структурными перестройками. Для листьев клена *Acer negundo* L. в условиях загрязнения только у нижнего эпидермиса выявлено существенное уменьшение по сравнению с контролем (на 2,1 мкм), все остальные анатомические параметры напротив показали высокие значения: более толстые – верхняя кутикула (на 1,5 мкм), верхний эпидермис (на 2,1 мкм), палисадная паренхима (на 25,5 мкм), губчатая паренхима (на 8,4 мкм). Губчатая паренхима в условиях загрязнения представлена плотно упакованными клетками, напоминающими палисадную паренхиму, а внутриклеточные пространства крайне малы. Все изменения структуры листовой пластинки значительны и направлены на увеличение ксерофитных характеристик листьев. Только нижняя кутикула имеет одинаковую толщину на обоих сравниваемых участках (1,25 мкм). У ясеня *Fraxinus americana* L. в условиях загрязнения при значительном и достоверном уменьшении толщины листа (на 9,4 мкм) выявлены внутренние перестройки в тканях листа: наблюдалось значительное снижение толщины только верхнего эпидермиса (на 3,4 мкм) и губчатой паренхимы (на 12,4 мкм), остальные ткани незначительно утолщались (верхняя кутикула – на 0,5, столбчатая паренхима – на 2,8, нижний эпидермис – на 1,9, нижняя кутикула – на 1,24 мкм). Коэффициент палисадности в условиях загрязнения незначительно возрос относительно контроля (49 и 47% соответственно), что свидетельствовало об увеличении доли столбчатой паренхимы в мезофилле. Таким образом, наблюдалось усиление ксерофитных черт тканей в листьях *A. platanoides* и *P. acerifolia*, данная адаптация способствует уменьшению потерь воды растением и выживанию в условиях техногенного стресса, однако *A. negundo* и *F. americana* характеризуются относительной толерантностью к загрязненной среде [45–47].

Исследование воздействия загрязнения воздуха в промышленном районе города Джидда (Саудовская Аравия) на три древесных вида (коричник *Cinnamomum camphora* (L.) J. Presl, лавсония *Lawsonia inermis* L. и бугенвиллея *Bougainvillea spectabilis* Willd.) показало, что у всех видов наблюдалось значительное уменьшение числа устьиц в промышлен-

ной зоне по сравнению с контролем. При этом в условиях загрязнения значительно увеличивались длина и ширина устьиц, а также длина и ширина устьичных щелей в сравнении с контролем. Эти изменения могут служить индикатором экологического стресса и могут быть рекомендованы для раннего выявления загрязнения воздуха в промышленных районах [66].

Ряд исследований посвящен оценке микроморфологических параметров древесных видов в Иране. Морфологические изменения листьев вяза (*Ulmus minor* «*Umbraculifera*») были исследованы в условиях слабого, сильного и очень сильного автотранспортного загрязнения воздуха в Тегеране. Результаты показали, что при усилении загрязнения устьичная плотность значительно и достоверно увеличивалась, но уменьшались размеры устьиц, длина и ширина устьичной щели, что позволяет контролировать попадание загрязнителей и компенсировать дефицит газообмена. Одновременно увеличивалась толщина листа, что позволяет сохранять его фотосинтетический потенциал. Сделан вывод, что виды вяза устойчивы к стрессу городского и промышленного загрязнения воздуха, а устьичная плотность и размеры устьичной щели являются хорошими показателями оценки качества окружающей среды [38]. Аналогично показано увеличение адаксиальной и абаксиальной устьичной плотности листьев робинии *Robinia pseudoacacia* L. в г. Тегеране, однако их длина не изменяется в ответ на загрязнение городского воздуха. Выявлены следующие видоспецифические перераспределения анатомических параметров листа: при значительном уменьшении толщины листа и мезофилла наблюдались увеличение толщины столбчатой паренхимы (при редукции числа ее слоев), абаксиальной и адаксиальной кутикул и адаксиального эпидермиса за счет значительного уменьшения толщины и числа слоев губчатой паренхимы и толщины абаксиального эпидермиса. Не менее значимые изменения происходили с главной жилкой листа: увеличивались как ее толщина, так и толщина сосудистого пучка, толщина и число слоев адаксиальной и абаксиальной колленхим, толщина и число слоев абаксиальной паренхимы, но при этом снижалась толщина мезофилла главной жилки, а число сосудистых пучков не изменялось. Корреляционный анализ показал очень сильные связи между изменением адаксиальной и абаксиальной устьичной плотности, толщины адаксиальной кутикулы и толщины тканей главной жилки с одной стороны и увеличением загрязнения воздуха NO_2 , SO_2 и O_3 – с другой (11 значительных корреляций). В отношении климатического градиента (в более теплых условиях по отношению к прохладным) были обнаружены во многом аналогичные реакции. Такая адаптация на два резко различающихся набора экологических переменных отражает функциональное совпадение

между механизмами, предназначенными для ограничения потерь воды в сухом климате, и механизмами, которые сводят к минимуму поглощение токсичных газов в загрязненных местообитаниях [60]. Результаты исследования анатомических особенностей ясеня *Fraxinus rotundifolia* Mill. и шелковицы *Morus alba* L. вдоль дороги Малайер-Хамедан с высоким трафиком движения в провинции Хамедан показали, что по мере приближения к дороге (30→20→10 м) и усиления загрязнения в отношении размеров устьиц виды проявляли противоположные реакции – наблюдалось значительное уменьшение длины, ширины и площади устьиц у *F. rotundifolia* и значительное увеличение у *M. alba*. Наименьшей пластичностью по отношению к усилению загрязнения для *M. alba* характеризовалась длина устьиц в сравнении с *F. rotundifolia*. На одном и том же расстоянии от дороги устьицы у *M. alba* закрыты больше, чем у *F. rotundifolia*. Результаты исследования показывают, что *F. rotundifolia* более устойчив к загрязнению [39]. В результате автотранспортного загрязнения в мегаполисе Мешхед в листьях платана *Platanus orientalis* L. накапливался Pb в 2,4 раза больше, чем в условиях контроля (сельская местность в 20 км от города), по остальным металлам (Zn, Ni, Co, Cr, Cu) различия отсутствовали. Устьичная плотность и ширина устьичной щели в загрязненных условиях значительно уменьшались (на 87 шт./см² и на 2,4 мкм соответственно), но увеличивались длина устьиц (12,5 мкм) и плотность защитных клеток. Несмотря на увеличенное осаждение пыли, устьица листьев в загрязненных условиях не были закупорены частицами. Исследования поперечного сечения листьев не выявили анатомических нарушений, такие цитологические параметры, как длина, ширина и площадь проекции клеток палисадной паренхимы, и губчатой паренхимы не различались между загрязнением и контролем, однако верхняя кутикула значительно уменьшалась в городских условиях (на 2,3 мкм). Сделан вывод, что городские условия могут привести к снижению фотосинтеза через уменьшение площади листьев, устьичной плотности и ширины пор, а также повысить чувствительность к засухе из-за тонкой кутикулы, однако не затрагивают внутреннюю функциональную анатомию листа [58].

Ряд статей посвящен исследованиям микроморфологии листьев деревьев в различных городах Пакистана. В г. Кветте оценивалось влияние загрязнения от сжигания твердых бытовых отходов на морфологию листьев полыни *Artemisia maritima* L., ясеня *Fraxinus excelsior* L., щирицы *Amaranthus viridis* L., свинорога *Cynodon dactylon* L., мари *Chenopodium album* L., робинии *Robinia pseudoacacia* L., софоры *Sophora mollis* (Royle) Baker, растущих на расстоянии 1 м, 500 м и 1000 м от источника. Результаты показали, что устьичная плотность и доля частич-

но закупоренных устьиц выше вблизи источника загрязнения, а с увеличением расстояния доля открытых устьиц соответственно увеличивалась [52]. Индустриальный центр г. Карачи подвергается как промышленным, так и автотранспортным выбросам (оксиды азота и серы, углеводороды, озон, твердые частицы, фторид водорода, пероксиацилнитраты и т. д.). Анатомические исследования вдоль центральной автодороги Гуру Миндира (самая высокая плотность транспортных средств) выявили видоспецифические адаптивные перестройки в тканях листьев деревьев: у фикуса *Ficus bengalensis* L. уменьшались верхняя кутикула, верхняя столбчатая паренхима и губчатая паренхима, но увеличивались верхний эпидермис, нижняя столбчатая паренхима и нижний эпидермис, а нижняя кутикула оставалась без изменений (все изменения незначительны с низкой достоверностью, за исключением верхней столбчатой паренхимы); у эвкалипта *Eucalyptus* sp. уменьшались верхняя кутикула, верхний эпидермис, верхняя столбчатая паренхима, губчатая паренхима и нижний эпидермис, но увеличивались верхний и нижний гиподермис, нижняя столбчатая паренхима и нижняя кутикула (все изменения незначительны с низкой достоверностью различий, за исключением нижнего гиподермиса); у гваякового дерева *Guaiacum officinale* L. уменьшались все анатомические параметры, но незначительно и недостоверно. Таким образом, больше всего страдают клетки столбчатой и губчатой паренхимы, они становятся «сплюснутыми» из-за непрерывного воздействия загрязняющих веществ [48].

В долине Катманду в центральной части Непала исследовали сильно загрязненный (высокий поток транспортных средств), умеренно загрязненный (относительно низкий поток транспортных средств) и слабо загрязненный (низкий поток транспортных средств) участки городских улиц. Было обнаружено, что с усилением загрязнения устьичная плотность и количество вспомогательных клеток значительно снижались у каллистемона *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels и незначительно – у лагерстрёмии *Lagerstroemia indica* L., однако в отношении устьичного индекса, размеров устьичной щели (длина и ширина) и количества эпидермальных клеток на единицу площади листа виды меняли реакцию – наблюдалось значительное снижение этих параметров у *L. indica* и незначительное – у *C. citrinus*. Количество закупоренных устьиц незначительно увеличивалось у *L. indica*, но у *C. citrinus* оставалось неизменным. Основываясь на результатах исследования, сделан вывод, что *C. citrinus* является наиболее толерантным видом по отношению к автотранспортному загрязнению [67].

Показаны анатомические изменения листьев и стеблей придорожных деревьев манго *Mangifera indica*

L., альбиции *Albizia procera* (Roxb.) Benth. и свитении *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq. в городах Газипур и Ми-менсингх (Бангладеш). Листья всех трех видов растений характеризовались меньшим размером клеток в сравнении с контролем, внутри клеток верхнего и нижнего эпидермиса обнаружены черные точечные скопления загрязняющих веществ, а палисадная и губчатая паренхима вовсе имели черный цвет из-за осаждения загрязняющих веществ. Такие же изменения обнаружены во флоэме стебля, однако листья и стебли растений в контрольных условиях характеризуются нормальной анатомией [57].

Способность осаждения взвешенных частиц листовой деревьев прямо связана с морфологией листьев. У 25 древесных видов оценена при помощи фумигационных камер способность захватывать $PM_{2,5}$ (твердые частицы размером менее 2,5 микрон) в Пекине (7 широколиственных и 3 хвойных) и Чунцине (13 широколиственных и 2 хвойных). Удельная площадь листовых канавок, опушение листьев на 1 мм^2 , устьичная плотность и размер устьиц были выбраны в качестве показателей морфологии листьев. Результаты показали, что удельная площадь листовых канавок имела сильные корреляционные связи с количеством осажденных взвешенных частиц ($R^2 = 0,33-0,65$), однако опушение листьев ($R^2 = 0,08$), размер устьиц ($R^2 = 0,01-0,03$) и устьичная плотность ($R^2 = 0,01-0,06$) не обнаружили значительных положительных корреляций. Следует отметить интересную зависимость в отношении размеров устьиц: при оценке корреляционных связей между усредненными размерами устьиц и осаждением пыли сильные связи не обнаружались, однако разбиение на кластеры по размерам устьиц показало, что чем меньше устьица, тем сильнее корреляционные связи с осаждением пыли ($R^2 = 0,41$). Широколиственные виды со значительными морфологическими параметрами (удельная площадь листовых канавок, размер устьиц и опушение листьев) осаждали на единицу площади поверхности листьев больше взвешенных частиц, чем хвойные, однако хвойные осаждали больше взвешенных частиц суммарно на одно дерево из-за большей площади хвои на одно дерево. Среди хвойных наиболее эффективным осаждением пыли характеризовались кипарис *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook., плоскоцветник *Platyclusus orientalis* (L.) Franco, сосна *Pinus armandii* Franch., а среди лиственных – гревиллея *Grevillea robusta* A.Cunn. ex R.Br., эритрина *Erythrina variegata* L., кельрейтерия *Koelreuteria bipinnata* Franch., тополь *Populus tomentosa* Carrière, ясень *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. В Чунцине суммарная эффективность осаждения взвешенных веществ значительно выше, чем в Пекине, из-за существенной разницы между деревьями по морфологическим характеристикам листьев [54].

Сравнение характеристик листьев деревьев клена *Acer rubrum* L. в лесах небольшого (Ньюарк) и крупного (Филадельфия) городов (США) показало, что существенных различий в толщине листьев, верхнего эпидермиса, губчатой паренхимы и палисадной паренхимы не выявлено. Аналогично, на абаксиальной поверхности листьев не обнаружено различий в устьичной плотности, однако размеры устьиц (длина и ширина) значительно больше у кленов в лесах Филадельфии по сравнению с Ньюарком. Увеличение размеров устьиц предполагает потенциальное изменение газообмена, направленное на смягчение абиотического стресса [55].

Проанализированы листья суринамской вишни *Eugenia uniflora* L. вдоль главной городской дороги в Рио-де-Жанейро (Бразилия). Выявлена обратная зависимость между устьичной плотностью и размером устьиц, при этом для городских условий характерно большее количество устьиц и меньшие их размеры, чем в контроле. В городских листьях больше кристаллов оксалата кальция, секреторных желез и фенольных соединений. Кроме того, в городских условиях увеличивались толщина листа и столбчатой паренхимы, но уменьшались толщина абаксиального эпидермиса и губчатой паренхимы, а толщина адаксиального эпидермиса оставалась неизменной. Показано, что суккулентность, толщина палисадной, губчатой паренхимы и абаксиального эпидермиса, плотность устьиц, кристаллов оксалата кальция и секреторных желез характеризуются высоким индексом фенотипической пластичности. Наличие многочисленных кристаллов оксалата кальция и высокий индекс пластичности рассматриваются в качестве анатомического маркера для оценки воздействия городской среды [42].

Три магистральные дороги с экстремальной, тяжелой и эпизодической транспортной загруженностью в метрополисе Кумаси (Гана) отобраны для исследования изменений в листьях четырех придорожных деревьев – фикуса *Ficus platyphylla* Del., манго *Mangifera indica* L., полиалтии *Polyalthia longifolia* Sonn. и терминалии *Terminalia catappa* L. Результаты показали, что у всех четырех видов деревьев размер, плотность и индекс устьиц в условиях загрязнения значительно, но недостоверно уменьшались, в то же время значительно, но недостоверно увеличивались число и длина эпидермальных клеток и длина трихом. Устьицы на абаксиальной поверхности листьев в контроле имели небольшую закупорку или вообще не были закупорены, в то время как большая часть устьиц в условиях загрязнения была закупорена. Множественный регрессионный анализ показал, что СО являлся значимым фактором для числа эпидермальных клеток и размера устьиц *T. catappa*, SO_2 – для числа эпидермальных клеток *T. catappa* и *M. Indica*, СО и NO_2 –

для числа эпидермальных клеток *F. platyphylla*, SO₂ – для числа эпидермальных клеток и размера устьиц *F. platyphylla*, однако ни один из загрязнителей не являлся значимым фактором для числа устьиц, размера устьиц, числа эпидермальных клеток и длины трихомы *P. longifolia*. Изученные параметры предлагается рассматривать как показатели экологического стресса в условиях загрязнения воздуха в городах [69].

В эксперименте сеянцы суринамской вишни *Eugenia uniflora* L. и клузии *Clusia hilariana* Schldt. подвергали имитационному кислотному дождю с pH = 3 в течение 40 дней, через 24 часа после последнего опрыскивания определяли степень анатомических и микроморфологических изменений и повреждений листьев. У *E. uniflora* некротические пятна были сосредоточены в основном в районе центральной жилки, мезофилл стал тоньше, но с гипертрофированными клетками, наблюдались интенсивное шелушение верхнего и нижнего кутикулярных слоев в форме чешуи, деградация и коллапс клеток адаксиального эпидермиса и части губчатой паренхимы, клетки палисадной паренхимы приобрели изодиаметрическую форму без дифференцировки слоев, на абаксиальной поверхности листьев наблюдались деформация устьиц и разрыв устьичного края, степень открытия устьиц больше, чем у контрольных растений. У *C. hilariana* некротические пятна были сосредоточены в основном на краю листьев, обнаружены фрагментация эпидермиса, коллапс клеток гиподермиса, разрушение и увеличение объема клеток губчатой паренхимы, плазмолиз клеток палисадной паренхимы, на адаксиальном эпидермисе присутствовали выступы, углубления и перфорации в виде разрывов клеток кутикулы и эпидермиса, на абаксиальном эпидермисе хорошо просматривался пересеченный рельеф эпи-

дермальных клеток, вспомогательные клетки скручены, а защитные клетки вялые и с поврежденными стенками, иногда наблюдались разрыв устьичного края и наличие повреждений на внешней поверхности защитных клеток. Структурные изменения показали большую восприимчивость *E. uniflora* к кислотному дождю, а меньшая чувствительность *C. hilariana* связана с такими анатомическими характеристиками, как толстая кутикула, наличие трех слоев гиподермы и более толстый и компактный мезофилл [44].

Заключение

Основная масса исследований указывает на значительное уменьшение макро- и микроморфологических параметров ассимиляционного аппарата древесных растений в условиях техногенеза (табл. 1, строки 1, 5), но в то же время независимо от древесного вида и типа промышленного загрязнения в отношении морфологических параметров могут наблюдаться как неспецифические, так и нейтральные адаптивные реакции.

Наибольший интерес вызывает относительная независимость адаптивных реакций в пределах одного органа: лист и хвоя, являясь едиными целостными органами, следуя логике, должны проявлять к одному и тому же стрессовому фактору однонаправленные адаптивные реакции, однако во многих исследованиях мы одновременно видим разнонаправленные специфические и неспецифические реакции в пределах одного органа (табл. 1, строки 2–4, 6–8). Следует отметить отсутствие синхронного проявления неспецифических и нейтральных адаптивных реакций, одновременно проявляются только специфические и нейтральные реакции. Это относится и к макро-, и к микроморфологическим характеристикам. Из этого можно предположить, что неспецифические адаптивные реакции составляют обособленное «направ-

Табл. 1

Распределение цитированных публикаций по встречаемости в результатах исследований специфических, неспецифических и нейтральных адаптивных реакций микро- и макроморфологических параметров ассимиляционных органов в ответ на техногенное загрязнение

№ строки	Неспецифические реакции	Специфические реакции	Нейтральные реакции
<i>Макроморфологические характеристики</i>			
1	[9, 19, 38, 46, 50]	[2, 6, 11, 12, 21, 23, 39, 40, 43, 45, 48, 53, 56, 61, 62, 65, 68, 69]	[42, 55]
2		[4, 18, 22, 26, 32, 34, 41, 59, 64]	
3		[3, 17, 30]	
4		[5, 35]	
<i>Микроморфологические характеристики</i>			
5	[66, 67]	[38, 52, 57]	[55]
6		[39, 44, 45, 69]	
7		[54]	
8		[42, 46–48, 58, 60]	

ление», характеризующее повышенный адаптивный потенциал древесных видов по отношению к техногенезу. Также обращает на себя внимание то, что во многих случаях одни морфологические параметры изменяются значительно и достоверно (или недостоверно), а другие – незначительно и недостоверно [22, 26, 32, 38, 45–48, 69]. Все эти специфические явления обнаруживаются вследствие того, что рассмотренные в обзоре исследования проведены в разных климатических зонах, на разных видах древесных растений, в условиях различных типов загрязнения и различного уровня загрязнения. Поэтому разработка методов и критериев, позволяющих унифицировать или адаптировать результаты разных исследователей для выделения наиболее общих закономерностей, является задачей для будущих исследователей.

В основе выявленного многообразия адаптивных реакций лежит принцип множественного обеспечения биологически необходимых функций для сохранения гомеостаза, когда биосистема для поддержания своего существования в стрессовых условиях должна противопоставить воздействию внешней среды достаточное разнообразие соответствующих реакций. Чем большее число механизмов адаптации используется растением одновременно на самых разных уровнях организации ассимиляционного аппарата, тем более устойчив организм к действию токсических ингредиентов. Кроме того, не каждый стресс обязательно негативен для деревьев, но может вместо этого выз-

вать повышенную устойчивость к стрессу, а кратковременная стрессовая реакция может не совпадать с длительным изменением жизненного состояния деревьев [25, 33, 51]. Таким образом, в зависимости от величины адаптивного потенциала растения в процессе приспособления включаются те механизмы, которые позволяют при наименьших энергетических затратах повысить его толерантность к стрессовому фактору, а многообразие реакций является залогом повышения устойчивости к фитотоксикантам.

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 № 20-14-50281-Экспансия. Funding: The reported study was funded by RFBR, project number 20-14-50281.

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. Автухович ИЕ, Ягодин БА. Деревья как индикаторы экологически неблагоприятных условий крупного мегаполиса. Известия ТСХА. 2000;1:180-183.
2. Аминева КЗ. Эколого-биологическая характеристика дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения (на примере Уфимского промышленного центра) (диссертация). Тольятти: ИЭВБ РАН; 2016.
3. Баканов АВ. Экологическая оценка состояния лесных насаждений с помощью методов фитоиндикации на примере Сергиево-Посадского района (диссертация). М.: МГУЛ; 1997.
4. Башкот ЕН, Дорогобидова АС. Хлорофилльный фотосинтетический потенциал посева как биоиндикатор экологического мониторинга. В кн.: Современные аспекты экологии и экологического образования. Казань; 2005. С. 402-4.
5. Бикмуллин РХ. Оценка состояния древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) на территории Казанского промышленного центра Республики Татарстан (диссертация). Оренбург: ГОУ ВПО ОГПУ; 2012.
6. 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.
7. Бурда РИ. К вопросу об антропогенной трансформации флоры. Украинский ботанический журнал. 1996;53(1-2):26-31.
8. Бутник АА. Адаптация анатомического строения видов семейства *Chenopodiaceae* Vent к аридным условиям (диссертация). Ташкент; 1984.
9. Бухарина ИЛ, Ведерников КЕ, Поварничина ТМ. К вопросу о влиянии техногенной среды на формирование и биохимический состав годичного побега древесных растений. Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007;(2):145-8.

10. Василевская ВК. Структурные приспособления растений жарких и холодных пустынь Средней Азии и Казахстана. В кн.: Проблемы современной ботаники. Том 2. М.: Наука; 1965. С. 5-17.
11. Василевская НВ, Сидорчук АВ. Воздействие промышленного загрязнения комбината «Печенганикель» на динамику роста *Sorbus gorodkovii* Rojark (Мурманская область). Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2018;3(172):28-35.
12. Василевская НВ, Лебедев ИЕ. Воздействие техногенного загрязнения г. Мурманска на рост и развитие *Sorbus gorodkovii* Rojark. Естественные и технические науки. 2016;4(94):23-8.
13. Васильев БР. Строение листа древесных растений различных климатических зон. Л.: Издательство ЛГУ; 1988.
14. Вишневская ЛИ. Некоторые экологические аспекты исследования жилкования листа древесных. В кн.: Материалы конференции молодых ботаников к 40-летию Главного ботанического сада АН СССР. М.: ГБС АН СССР; 1990. С. 3-9.
15. Гетко НВ. Растения в техногенной среде: Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника; 1989.
16. Горышина ТК. Растения в городе. Л.: ЛГУ; 1991.
17. Донцов АС, Сунцова ЛН, Иншаков ЕМ. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской. Хвойные бореальной зоны. 2016;37(5-6):246-50.
18. Жиров ВК, Голубева ЕИ, Говорова АФ, Хаитбаев АХ. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем Севере. М.: Наука; 2007.
19. Зайцев ГА, Кулагин АЮ. Сосна обыкновенная и нефтехимическое загрязнение. Дендрэкологическая характеристика, адаптивный потенциал и использование. М.: Наука; 2006.
20. Калиниченко АА. Влияние хлорхолинхлорида на изменение некоторых морфологических признаков у древесных растений. Научные труды Украинской сельскохозяйственной академии. 1973;94(2):56-8.
21. Кулагин АА, Зайцев ГА. Лиственница Сукачева в экстремальных лесорастительных условиях Южного Урала. М.: Наука; 2008.
22. Легощина ОМ. Оценка ростовых процессов у древесных растений в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово. Бюллетень науки и практики. 2016;(5):14-9.
23. Лукина ЮМ. Влияние техногенного загрязнения комбината «Североникель» на рост и развитие древесных растений: на примере *Betula Czerepanovii* Orlova (диссертация). Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет; 2011.
24. Марценюк ВБ. Зависимость повреждаемости листьев растений от концентрации газа и экспозиции опыта. В кн.: Газоустойчивость растений. Новосибирск: Наука; 1980. С. 173.
25. Маслов СП. Ограничения возможностей гомеостаза мультифункциональностью и главные пути его обхода. В кн.: Уровни организации биологических систем. М.: Наука; 1980. С. 8-19.
26. Неверова ОА. Морфометрическая и дендрохронологическая диагностика состояния древесных насаждений как способ индикации загрязнения урбанизированной среды. Успехи современного естествознания. Биологические науки. 2002;(1):57-64.
27. Неверова ОА, Колмогорова ЕЮ. Ксерофитизация листьев древесных растений как показатель загрязнения атмосферного воздуха (на примере г. Кемерово). Лесное хозяйство. 2002;(3):29-33.
28. Николаевский ВС. Некоторые закономерности поглощения сернистого ангидрида древесными растениями. Ученые записки Пермского университета. 1971;2(277):29-35.
29. Оскворидзе ТД. Анатомическое строение листьев и хвои основных лесобразующих пород. Тбилиси: Мицнерба; 1975.
30. 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.
31. Скотников ДВ. Дендрэкологическая характеристика ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях нефтехимического загрязнения (Уфимский промышленный центр) (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2007.
32. Сухарева ТА, Лукина НВ. Химический состав и морфометрические характеристики хвои ели сибирской на Кольском полуострове в процессе деградационной сукцессии лесов. Лесоведение. 2004;(2):36-43.
33. 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.
34. Тужилкина ВВ, Плюснина СН. Комплексная оценка состояния хвои *Piceae obovata* (Pinaceae) в условиях аэротехногенного загрязнения. Растительные ресурсы. 2014;50(4):579-86.

35. Турмухаметова НВ. Особенности морфогенеза побегов и феноритмов *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. в условиях городской среды (диссертация). Новосибирск: ЦСБС СО РАН; 2005.
36. Тутаюк ВХ. Анатомия и морфология растений. М.: Высшая школа; 1972.
37. Эсау К. Анатомия растений. Т. 1, Т. 2. М.: Мир; 1969.

Общий список литературы/Reference List

1. Avtukhovich IYe, Yagodin BA. [Trees as indicators of environmentally disadvantaged conditions of a large metropolis]. *Izvestiya TSKhA*. 2000;1:180-3. (In Russ.)
2. Amineva KZ. [Ecological and biological characteristic of oak (*Quercus robur* L.) in conditions of technogenic pollution as exemplified with Ufa industrial center (dissertation)]. Tolyatti: IEVB RAN; 2016. (In Russ.)
3. Bakanov AV. [Ecological assessment of the conditions of forest plantations using phytoindication methods as exemplified with Sergiev Posad district (dissertation)]. М.: MGUL; 1997. (In Russ.)
4. Bashkot YeN, Dorogobidova AS. [Chlorophyll photosynthetic potential of crop as a bioindicator of environmental monitoring]. In: *Sovremennyye Aspekty Ekologii i Ekologicheskogo Obrazovaniya*. Kazan; 2005, P. 402-4. (In Russ.)
5. Bikmullin RKh. [Assessment of the condition of pine forest stands (*Pinus sylvestris* L.) and birch (*Betula pendula* Roth) in the territory of Kazan Industrial Center of the Tatarstan Republic (dissertation)]. Orenburg: GOU VPO OGPU; 2012. (In Russ.)
6. 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.)
7. Burda RI. [On the issue of anthropogenic flora transformation]. *Ukrainskiy Botanicheskiy Zhurnal*. 1996;53(1-2):26-31. (In Russ.)
8. Butnik AA. [Adaptation of the anatomical structure of species of the Chenopodiaceae Vent family to arid conditions (dissertation)]. Tashkent; 1984. (In Russ.)
9. Bukharina IL, Vedernikov KE, Povarnitsina TM. [On the issue of influence of the technogenic environment on the formation and biochemical composition of the annual shoot of woody plants]. *Vestnik Izhevskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2007;(2):145-8. (In Russ.)
10. Vasilevskaya VK. [Structural adaptations of plants of hot and cold deserts of Central Asia and Kazakhstan]. In: *Problemy Sovremennoy Botaniki*. Tom 2. Moscow: Nauka; 1965, P. 5-17. (In Russ.)
11. Vasilevskaya NV, Sidorchuk AV. [Impact of industrial pollution of “Pechenganikel” plant on the growth dynamics of *Sorbus gorodkovii* Pojark (Murmansk region)]. *Uchenyye Zapiski Petrozavodskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2018;3(172):28-35. (In Russ.)
12. Vasilevskaya NV, Lebedevich IYe. [Impact of technogenic pollution of Murmansk city on the growth and development of *Sorbus gorodkovii* Pojark]. *Yestestvennyye i Tekhnicheskiye Nauki*. 2016;4(94):23-8. (In Russ.)
13. Vasilyev BR. *Stroyeniye Lista Drevesnykh Rasteniy Razlichnykh Klimaticheskikh Zon*. [Structure of Leaves of Woody Plants of Different Climatic Zones]. Leningrad: Izdatelstvo LGU; 1988. (In Russ.)
14. Vishnevskaya LI. [Some ecological aspects of the study of leaf venation of woody plants]. In: *Materialy Konferentsii Molodykh Botanikov k 40-Letiyyu Glavnogo Botanicheskogo Sada AN SSSR*. М.: GBS AN SSSR; 1990. P. 3-9. (In Russ.)
15. Getko NV. *Rasteniya v Tekhnogennoy Srede: Struktura i Funktsiya Assimiliatsionnogo Apparata*. [Plants in the Technogenic Environment: Structure and Function of the Assimilation Apparatus]. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1989. (In Russ.)
16. Goryshina TK. *Rasteniya v Gorode*. [Plants in the City]. Leningrad.: LGU; 1991. (In Russ.)
17. Dontsov AS, Suntsova LN, Inshakov YeM. [Assessment of the state of the environment of Krasnoyarsk city by the state of the photosynthetic apparatus of Siberian spruce]. *Khvoynye Borealnoy Zony*. 2016;37(5-6):246-50. (In Russ.)
18. Zhironov VK, Golubeva YeI, Govorova AF, Khaitbayev AKh. *Strukturno-Funktsionalnye Izmeneniya Rastitelnosti v Usloviyakh Tkhnogennogo Zagriazneniy na Kraynem Severe*. [Structural and Functional Changes in Vegetation under Conditions of Technogenic Pollution in the Far North]. М.: Nauka; 2007. (In Russ.)
19. Zaytsev GA, Kulagin AYu. *Sosna Obyknoennaya i Neftekhimicheskoye Zagriazneniye. Dendrologicheskaya Kharakteristika, Adaptivnyi Potentsial i Ispolzovaniye*. [The Pine and Petrochemical Pollution. Dendroecological Characteristic, Adaptive Potential and Use]. Moscow: Nauka; 2006. (In Russ.)
20. Kalinichenko AA. [Effect of chlorocholine chloride on the change of some morphological features in woody plants]. *Nauchnyye Trudy Ukrainskoy Selskokhozyaystvennoy Akademii*. 1973;94(2):56-8. (In Russ.)
21. Kulagin AA, Zaytsev GA. *Listvennitsa Sukacheva v Ekstremalnykh Lesorastitelnykh Usloviyakh*

- Yuzhnogo Urala. [Larch in Extreme Forest Conditions of the Southern Urals]. Moscow: Nauka; 2008. (In Russ.)
22. Legoshchina OM. [Assessment of growth processes in woody plants under conditions of prevailing influence of Kemerovo industrial zone emissions]. Byulleten Nauki i Praktiki. 2016;(5):14-9. (In Russ.)
 23. Lukina YuM. [Effect of technogenic pollution of the “Severonikel” plant on the growth and development of woody plants: on the example of *Betula Czerepanovii* Orlova (dissertation)]. Petrozavodsk: Petrozavodskiy Gosudarstvennyy Universitet; 2011. (In Russ.)
 24. Martsenyuk VB. [Dependence of plant leaf damage on gas concentration and experience exposure]. In: Gazoustoychivost Rasteniy. Novosibirsk: Nauka; 1980. P. 173. (In Russ.)
 25. Maslov SP. [Limitations of homeostatic capabilities by multifunctionality and the main ways to bypass it]. In: Urovni Organizatsii Biologicheskikh Sistem. Moscow: Nauka; 1980. P. 8-19. (In Russ.)
 26. 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.)
 27. Neverova OA, Kolmogorova YeYu. [Xerophytization of leaves of woody plants as an indicator of atmospheric air pollution as exemplified with emerovo city)]. Lesnoye Khozyaystvo. 2002;(3):29-33. (In Russ.)
 28. Nikolayevskiy VS. [Some regularities of sulphurous anhydride uptake by woody plants]. Uchenye Zapiski Permskogo Universiteta. 1971;2(277):29-35. (In Russ.)
 29. Oskvoridze TD. Anatomicheskoye Stroyeniye List'yev i Khvoi Osnovnykh Lesoobrazuyuschikh Porod. [Anatomical Structure of Leaves and Needles of the Main Forest-Forming Species]. Tbilisi: Mitsnerba; 1975. (In Russ.)
 30. Seydafariyov RA. [Ecological and biological features of lime (*Tilia cordata* Mill.) in conditions of anthropogenic pollution as exemplified with Ufa industrial center] (dissertation)]. Ufa: IB UNTS RAN; 2009. (In Russ.)
 31. 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.)
 32. Sukhareva TA, Lukina NV. [Chemical composition and morphometric characteristics of Siberian spruce needles on the Kola Peninsula during forests degradation succession]. Lesovedeniye. 2004;(2):36-43. (In Russ.)
 33. 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.)
 34. Tuzhilkina VV, Plyusnina SN. [Complex assessment of *Piceae obovata* (Pinaceae) needles under conditions of aerotechnogenic contamination]. Rastitelnye Resursy. 2014;50(4):579-86. (In Russ.)
 35. Turmukhametova NV. [Features of shoots morphogenesis and phenorhythms of *Betula pendula* Roth and *Tilia cordata* Mill. in conditions of the urban environment (dissertation)]. Novosibirsk: TSSBS SO RAN; 2005. (In Russ.)
 36. Tutayuk VKh. Anatomiya i Morfologiya Rasteniy. [Anatomy and Morphology of Plants]. Moscow: Vysshaya Shkola; 1972. (In Russ.)
 37. Esau K. [Anatomy of Plants. Vol. 1, Vol. 2]. Moscow: Mir; 1969. (In Russ.)
 38. Abbasi S, Hosseini S, Khorasani N, Karbassi A. Responses of the morphological traits of elm (*Ulmus minor* “Umbraculifera”) leaves to air pollution in urban areas (a case study of Tehran metropolitan city, Iran). Applied Ecol Environ Res. 2018;16 (4):4955-68.
 39. Allahnouri M, Ghasemi AF, Pazhouhan I. Traffic effects on leaf macro- and micromorphological traits. Folia Oecologica. 2018;45(2):92-101.
 40. Areington CA, Varghese B, Sershen N. The utility of biochemical, physiological and morphological biomarkers of leaf sulfate levels in establishing *Brachylaena discolor* leaves as a bioindicator of SO₂ pollution. Plant Physiol Biochem. 2017;118:295-305.
 41. Aribal LG, Llamas EJM, Bruno AGT, Medina MA. Comparative leaf morphometrics of two urban tree species: an assessment to air pollution impacts. J Biodivers Environ Sci. 2016;9(1):106-15.
 42. Bezerra LA, Callado CH, Cunha MD. Does an urban environment affect leaf structure of *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae)? Acta Botanica Brasiliica. 2020;34(2):266-76.
 43. Chaudhary IJ, Rathore D. Dust pollution: Its removal and effect on foliage physiology of urban trees. Sustainable Cities Soc. 2019;51:101696.
 44. Da Silva LC, Oliva MA, Azevedo AA, Araújo JM, Aguiar RM. Micromorphological and anatomical alterations caused by simulated acid rain in resting plants: *Eugenia uniflora* and *Clusia hilariana*. Water Air Soil Pollut. 2005;(168):129-43.
 45. Dineva SB. Comparative studies of the leaf morphology and structure of white ash *Fraxinus americana* L. and London plane tree *Platanus acerifo-*

- lia Willd growing in polluted area. Dendrobiology. 2004;52:3-8.
46. Dineva SB. Development of the leaf blades of *Acer platanoides* in industrially contaminated environment. Dendrobiology. 2006;55:25-32.
 47. Dineva SB. Leaf blade structure and the tolerance of *Acer negundo* L. (Box elder) to the polluted environment. Dendrobiology. 2005;53:11-16.
 48. Jahan S, Iqbal MZ. Morphological and anatomical studies of leaves of different plants affected by motor vehicles exhaust. J Islam Acad Sci. 1992;5(1):21-3.
 49. Kocon J. Influence of NO₂ and SO₂ as well as of acid rain of the structure of needles and wood quality of *Abies alba* Mill. Stand. Ann Warsaw Agricult Univ – SGGWAR Forestry Wood Technol. 1990;(40):75-81.
 50. Kosiba P. Variability of morphometric leaf traits in small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) under the influence of air pollution. Acta Soc Bot Polon. 2008;77(2):25-137.
 51. Kozłowski TT, Pallardy SG. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. Bot Rev. 2002;68(2):270-334.
 52. Lagharil SK, Zaidil MA, Razaq G. Impact of solid waste burning air pollution on some physiological characteristics of some plants. Pakistan J Bot. 2015;47(1):225-32.
 53. Leghari SK, Asrar M. Effect of air pollution on the leaf morphology of common plant species of Quetta city. Pakistan J Bot. 2013;(45):447-54.
 54. Liang D, Ma C, Wang Y, Wang Y, Chen-xi Z. Quantifying PM_{2.5} capture capability of greening trees based on leaf factors analyzing. Environ Sci Pollut Res. 2016;(23):21176-86.
 55. Mc Dermot CR, D'Amico V, Trammell T. Sensitivity of stomate size in red maple (*Acer rubrum* L.) trees in deciduous forests to urban conditions. Preprints. 2020:2020040235. doi: 10.20944/preprints202004.0235.v1
 56. Mikhailova TA, Afanasieva LV, Kalugina OV, Shergina OV, Taranenko EN. Changes in nutrition and pigment complex in pine (*Pinus sylvestris* L.) needles under technogenic pollution in Irkutsk region, Russia. J Forest Res. 2017;22(6):386-92.
 57. Mitu KJ, Islam MA, Biswas P, Marzia S, Ali MA. Effects of different environmental pollutants on the anatomical features of roadside plants. Progressive Agriculture. 2019;30(4):344-51.
 58. Pourkhabbaz A, Rastin N, Olbrich A, Langenfeld-Heyser R, Polle A. Influence of Environmental Pollution on Leaf Properties of Urban Plane Trees, *Platanus orientalis* L. Bull Environ Contaminat Toxicol. 2010;(85):251-5.
 59. Qadir SU, Raja V, Siddiqui WA. Morphological and biochemical changes in *Azadirachta indica* from coal combustion fly ash dumping site from a thermal power plant in Delhi. India. Ecotoxicol Environ Safety. 2016;129:320-8.
 60. Rashidi F, Jalili A, Kafaki SB, Sagheb-Talebi K, Hodgson J. Anatomical responses of leaves of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) to urban pollutant gases and climatic factors. Trees. 2012;(26):363-75.
 61. Rostunov A, Konchina T, Zhestkova E, Gusev D, Kharitonov S. The dependence of morphological and physiological indicators of the leaves of woody plants on the degree of technogenic pollution. In: Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. "Environment. Technology. Resources". Vol. I. Latvia: Rezekne Academy of Technologies; 2017. p. 235-9.
 62. Seyyednejad SM, Koochak H. Some morphological and biochemical responses due to industrial air pollution in *Prosopis juliflora* (Swartz) DC plant. African J Agricult Resh. 2013;8(18):1968-74.
 63. Seyyednejad SM, Niknejad M, Koochak H. A Review of some different effects of air pollution on plants. Res J Environ Sci. 2011;5(4):302-9.
 64. Seyyednejad SM, Niknejad M, Yusefi M. Study of air pollution effects on some physiology and morphology factors of *Albizia lebbek* in high temperature condition in Khuzestan. J Plant Sci. 2009a;4:122-6.
 65. Seyyednejad SM, Niknejad M, Yusefi M. The effect of air pollution on some morphological and biochemical factors of *Callistemon citrinus* in petrochemical zone in South of Iran. Asian J Plant Sci. 2009b;(8):562-5.
 66. Shaheen AM, Al-Toukhy AA, Hajar AS. Effect of air pollution on leaf traits of three tree species growing in the industrial zone of Jeddah, Saudi Arabia. Meteorol Environ Arid Land Agricult Sci. 2016;26(2):33-40.
 67. Shrestha SD, Devkota A, Jha PK. Assessment of air pollution impact on micro-morphological and biochemical properties of *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels and *Lagerstroemia indica* L. Scientific World. 2021;14(14):132-40.
 68. Swain S, Mallick SN, Prasad P. Effect of industrial dust deposition on photosynthetic pigment chlorophyll and growth of selected plant species in Kalunga Industrial areas, Sundargarh, Odisha. Int J Bot Studies. 2016;1(5):1-5.
 69. Uka UN, Belford EJD. Response of roadside tree leaves in a tropical city to automobile pollution. Notulae Scientia Biologicae. 2020;12(3): 752-68.

ТЕХНОГЕНЕЗ И СТРУКТУРНО- ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ: ПОВРЕЖДЕНИЯ, АДАПТАЦИИ, СТРАТЕГИИ. ЧАСТЬ 2. ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ.

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

Это вторая часть обзора работ по изучению адаптивных реакций древесных растений на техногенные изменения среды. Рассмотрены научные публикации, в которых описаны физиологические реакции ассимиляционного аппарата древесных растений. Рассмотрены специфические и неспецифические реакции различных древесных видов на уровнях водного обмена и пигментного комплекса как на один и тот же техногенный фактор, так и на разные виды воздействия, включая имитацию стрессовых условий в экспериментах с дозированным внесением токсикантов в среду. Обсуждается отсутствие прямой зависимости между физиологическими параметрами, используемыми при подсчете индекса толерантности, который дает противоречивые результаты и не в полной мере отражает чувствительность физиологических процессов к уровню загрязнения. Показана относительная независимость физиологических адаптивных реакций листа и хвои, несмотря на единство и целостность этих органов. Обсуждаются причины таких поливариантных реакций, лежащие в основе адаптивного потенциала и толерантности видов к техногенезу.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, водный обмен хвои/листьев, пигментный комплекс хвои/листьев, адаптивные реакции.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL RESPONSES OF WOODY PLANTS TO ANTHROPOGENIC ENVIRONMENTAL CHANGES: DAMAGE, ADAPTATIONS AND STRATEGIES. PART 2. EFFECTS ON PHYSIOLOGICAL FUNCTIONS

R.V. Urazgildin*, A.Yu. Kulagin

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

* Email: urv@anrb.ru

The second in a series of reviews of studies of the adaptive responses of woody plants to anthropogenic environmental changes addresses publications where physiological responses of the assimilation apparatus of woody plants are described. Considered are the specific and nonspecific changes at the levels of water metabolism and pigment complex occurring in different species in response both to a particular anthropogenic factor and to different impacts, including mimicking of stressor conditions in experiments where dosed levels of toxicants were introduced into the environment. Discussed is the absence of direct relationships between the physiological parameters used to calculate the tolerance index, which proved to be an inconsistent measure and to reflect loosely the sensitivity of physiological processes to pollution levels. The adaptive responses of leaves and needles appear relatively independent from each other despite the integrity of these organs. The causes of such diverse responses at the base of the adaptive potential and tolerance of woody plant species to anthropogenic impacts are discussed.

Keywords: industrial pollution, water metabolism of leaves/needles, pigment complex of leaves/needles, adaptive responses.

ВВЕДЕНИЕ ВОДНЫЙ ОБМЕН

Водный обмен – поступление воды в растение и отдача ее растением – в условиях техногенеза имеет свою специфику. Промышленное загрязнение влияет на ча-

стичное разрушение кутикулярного слоя и покровных тканей, под влиянием неблагоприятных факторов повышает транспирацию листа в несколько раз, снижает общее содержание воды, содержание связанной воды и водоудерживающую способность, в результате чего

оводненность листьев растений, произрастающих в условиях высокой загрязненности воздуха, обычно на 10–15% ниже при сравнении с растениями, находящимися в чистой атмосфере. Последствия стресса могут проявиться и при формировании листьев новой генерации, не имеющих прямого контакта со стрессовым фактором [12, 15, 21, 24, 25, 31, 53, 77].

В настоящее время в литературе имеются многочисленные исследования о связи водного обмена с устойчивостью растений к ряду неблагоприятных факторов окружающей среды. По мнению некоторых авторов, устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды в большей мере определяется состоянием внутриклеточной воды, включая соотношение свободной и связанной воды. Растения способны снижать потери воды за счет перевода ее в осмотически неактивную форму путем связывания с различными веществами [14, 20, 23, 31]. Считается, что содержание свободной воды определяет интенсивность физиологических процессов, а связанной – устойчивость к обезвоживанию клеток [1, 39]. У более устойчивых видов при произрастании в условиях промышленного загрязнения происходит увеличение количества связанной воды [36]. При нормальном водоснабжении для устойчивых видов характерно повышенное содержание общей и свободной воды и повышенная водоудерживающая способность [31].

Транспирация – наиболее важный фактор водного обмена растений, так как испарение воды создает градиент, который является причиной передвижения воды по растению [24]. По мнению многих авторов, транспирация является основным процессом, характеризующим водный обмен растения в условиях загрязнения [12, 14, 21, 22, 53]. Уменьшение интенсивности транспирации в условиях загрязнения не только приводит к нарушению температурного режима, но и способствует большей аккумуляции токсикантов в растениях. Их избыточное накопление в листьях в свою очередь увеличивает водоудерживающую способность тканей, что снижает количество свободной воды и приводит к перегреву листьев [31].

Дефицит водного насыщения – лабильный и чувствительный к различным внешним воздействиям показатель [12]. Возникновение дефицита водного насыщения приводит к специфическим изменениям метаболизма, что некоторые авторы рассматривают как адаптационные реакции, обеспечивающие устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды [19, 69]. Устойчивые виды отличаются повышенным содержанием трудно извлекаемой воды, повышают водоудерживающую способность на 6–22% по сравнению с контролем и имеют низкую величину водного дефицита [26, 31]. Физиологические процессы без заметных нарушений могут протекать при неболь-

шой величине водного дефицита – от 3 до 14%. Без ущерба переносится потеря воды до половины массы насыщения, а уровень, вызывающий серьезные нарушения, находится приблизительно между 1/4 и 3/4 от общего содержания воды [12].

ПИГМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС

Фотосинтез – очень чувствительный физиологический процесс, зависящий от состояния ассимиляционного аппарата и растения в целом. Изучение реакций пигментного фонда растений в онтогенезе и в зависимости от основных факторов внешней среды создает возможность воздействия на фотосинтетическую продуктивность через ее основу – пигментный аппарат [49]. Общее содержание различных пигментов в листьях варьируется у разных растений. Древесные растения в целом характеризуются меньшей интенсивностью фотосинтеза по сравнению с травянистыми, что связано с меньшим количеством фотосинтетических единиц в хлоропластах древесных растений [12]. Считается, что различия в содержании пигментов у растений разных видов и экотипов связаны с теми условиями инсоляции, в которых происходило их формирование [51]. Эти различия наследственно закреплены и выступают как фотоиндикаторы условий среды. Сезонные изменения фотосинтетической активности происходят при изменении площади растущего листа: в течение вегетации фотосинтетическая активность листьев повышается до момента полного формирования листовой пластинки, затем с увеличением возраста – понижается [10, 24]. Уровень фотосинтетической активности в значительной степени зависит от соотношения скоростей образования новых и разрушения старых молекул хлорофилла. Последнее находится в прямой зависимости от физиологического состояния клетки и растения, определяемого условиями произрастания и давлением стрессовых факторов [60, 83].

В условиях города из-за более высоких температур воздуха, асфальтового покрытия, повышенной плотности почв, загрязненности почв легко растворимыми солями (вызывающими осмотическое связывание воды) уменьшается листовая поверхность и существенно снижается фотосинтетическая деятельность деревьев [26, 30, 31, 40]. К факторам, снижающим фотосинтетическую активность древесных растений в условиях техногенеза, следует отнести также пыль и сажу в воздухе, которые приводят к закупориванию устьиц, задержке поглощения CO_2 растениями, изменению оптических свойств и теплового баланса листа, а повышенная мутность городской атмосферы уменьшает поступление солнечной радиации и продолжительность солнечного влияния [10, 21, 48, 52].

Газы техногенного происхождения (SO_2 , NO_x , HF, HCl) понижают водный потенциал клеточных стенок

(что приводит к плазмолизу), вызывают набухание хлоропластов, дезорганизацию их внутренней мембранной системы, снижают синтез хлорофилла и его активность [7]. Синергическое взаимодействие нескольких загрязняющих газов оказывает более сильное влияние на количество пигментов фотосинтеза, чем действие каждого газа в отдельности [12, 25, 95]. В условиях техногенного загрязнения усиливается синтез абсцизовой кислоты, ингибирующей процесс фотосинтеза [9, 11, 29].

В условиях интенсивной техногенной нагрузки возможны изменения в пигментном фонде растений, которые могут служить индикатором их толерантности к этому фактору. О степени сформированности фотосинтетического аппарата можно судить по отношениям «хлорофилл *a* (Хл *a*) / хлорофилл *b* (Хл *b*)» и «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды», которые являются маркерами антропогенного воздействия на окружающую среду. Считается, что при загрязнении атмосферы первое соотношение уменьшается, а второе – увеличивается. Некоторые авторы указывают на то, что снижение величины «Хл *a* / Хл *b*» может характеризовать газоустойчивость растений. Чаще всего хлорофилл *a* является более лабильным в отношении любых нарушений естественного пигментного комплекса [12, 13, 17, 21, 25, 28, 33–35, 38, 49–51, 73].

Таким образом, реакции показателей водного обмена и пигментного комплекса хвои и листьев очень часто используются для мониторинга повреждения промышленными загрязнителями. Наиболее общей и частой реакцией для всех видов растений в дендрэкологии считается подавление процессов водного обмена, угнетение фотосинтеза, интенсивное разрушение всех пигментов и деструкция хлоропластов. С другой стороны, интенсивное загрязнение атмосферы промышленными токсикантами по-разному влияет на физиологические процессы в ассимиляционных органах древесных растений: металлоустойчивость и ответные реакции водного обмена и пигментного комплекса на техногенное воздействие довольно сложны и могут проявляться как специфическими, так и неспецифическими реакциями.

В дендрэкологии к специфическим адаптивным реакциям принято относить следующие основные физиологические изменения:

- уменьшение интенсивности транспирации (как показатель уменьшения вентиляруемости внутренних полостей листа для уменьшения проникновения токсикантов) при кратковременной и незначительной фумигации токсикантами, а при хронической фумигации – значительное усиление интенсивности транспирации (потеря возможности контролировать транспирационный процесс);
- увеличение относительного содержания воды в листе (как результат уменьшения интенсивности

транспирации и увеличения количества физиологически связанной воды);

- уменьшение дефицита водного насыщения листа (как результат уменьшения интенсивности транспирации и увеличения относительного содержания воды в листе);

- уменьшение содержания Хл *a* и компенсаторное увеличение Хл *b* и каротиноидов;

- уменьшение соотношения «Хл *a* / Хл *b*» и увеличение соотношения «(Хл *a* + Хл *b*) / каротиноиды».

I. Влияние техногенеза на водный обмен ассимиляционного аппарата: специфические и неспецифические реакции

Обзор влияния техногенеза на водный обмен ассимиляционного аппарата древесных растений проведен по климатическим зонам в направлении с запада на восток. В первую очередь дан обзор Европейской зоны начиная с зарубежных стран (Германия и Польша) и в пределах Российской Федерации: Псков-Сыктывкар-Ижевск-Уфа-Кемерово-Красноярск. Второй пояс составляют зарубежные страны Азии – Индия и Китай. Отдельно показаны адаптивные реакции при искусственной имитации стрессовых условий.

Промышленные центры, городская среда, автотранспорт

Анализ содержания воды в живой хвое *Picea abies* L. с помощью микроизображения, полученного методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ¹H (1H-NMR), показал увеличение содержания воды в хвое древостоев загрязненных районов (повышенное загрязнение атмосферы SO₂, NO, NO₂, O₃) северной Вестфалии (Германия). Авторы связывают это с пониженной скоростью испарения, вызванной деградацией трубчатых восков и ранним образованием восковых слоев, покрывающих поверхность хвои [74].

Исследования, выполненные в Польше, показывают, что в условиях избыточных концентраций Cd, Pb, Zn, Fe и Mn в почвах, прилегающих к промышленным заводам в городе Сосновец (главный центр Верхнесилезского промышленного района), выявлено пониженное относительное содержание воды (в среднем 76% по району исследований) в листьях робинии (*Robinia pseudoacacia* L.), причем с усилением загрязнения этот показатель значительно снижается (на 9% относительно контроля). Данная тенденция сохранялась на протяжении всего вегетационного периода. Выявлены значимые положительные корреляции (R² до 0,51) между показателями относительного содержания воды, pH клеточного сока и содержанием металлов в почве. Индекс толерантности к загрязнению воздуха (4,7–9,2) показал чувствительность робинии к загряз-

нению воздуха, включая тяжелые металлы, что позволяет использовать ее в качестве биоиндикатора [92].

В условиях загрязнения городской среды Кракова полициклическими ароматическими углеводородами от выбросов автотранспорта показано, что в динамике вегетационного периода наблюдалась смена реакции на усиление загрязнения у липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill) и тополя канадского (*Populus × canadensis* Moench сорт Robusta) по содержанию воды в листьях. У обоих видов отмечался постоянный рост содержания воды от мая до ноября, как в контрольных, так и в загрязненных условиях. При этом в период с мая по июль при усилении загрязнения этот показатель значительно понижался по сравнению с контрольными условиями, однако в период с августа по ноябрь реакция менялась на противоположную, и с усилением загрязнения оводненность листьев возрастала у обоих видов, причем к ноябрю разница между загрязнением и контролем становилась значительной, и особенно ярко это проявлялось у тополя [68].

В условиях города Пскова (повышенное содержание SO_2 , NO_2 , CO_2 , Pb и фторидов) отмечено уменьшение содержания общей воды в листьях у древесных видов центра города по сравнению с контролем, значительное – у березы *Betula pendula* Roth и липы *Tilia cordata* L. (на 6,3 и 4,7% соответственно), среднее – у сирени *Syringa vulgaris* L. (на 2,8%) и незначительное – у тополя *Populus nigra* L. (на 1,8%). При этом наблюдались видоспецифические перераспределения во фракционном составе – уменьшалось количество свободной воды, но увеличивалось количество связанной, значительно у липы (на 17,9 и 13,1%), умеренно у березы (на 11,7 и 5,4%) и тополя (на 10,8 и 9,4%), незначительно у сирени (на 7,7 и 4,9%). У всех видов при усилении загрязнения снижались водоудерживающая способность (значительно у сирени – на 6,9%, умеренно у тополя и березы – на 4,2 и 4%, незначительно у липы – на 2,3%) и степень суккулентности (приблизительно одинаково у всех видов – на 0,14–0,16 г/дм²), но усиливались интенсивность транспирации (значительно у сирени – на 6,6 г/дм²·час, умеренно у липы – на 4,8 г/дм²·час, незначительно у тополя – на 1,5 г/дм²·час) и, следовательно, дефицит водного насыщения (значительно у березы и липы – на 7,4 и 7,2%, незначительно у тополя и сирени – на 5 и 4,5%). Таким образом, ни у одного вида не наблюдалось тесных и прямых взаимосвязей между параметрами водного обмена в условиях загрязнения, всегда прослеживалась видоспецифичность в их соотношении, однако можно отметить, что тополь характеризуется наилучшей адаптацией водного обмена к загрязненным городским условиям [46].

В условиях загрязнения Сыктывкарского лесопромышленного комплекса показано, что не все процессы водного обмена хвои ели сибирской (*Picea obovata*

Ledeb.) претерпевали существенные изменения: на контрольном и загрязненном участках влагоемкость (57 и 58% соответственно), оводненность (53 и 57% соответственно) и водный потенциал (–0,2 Мп на обоих участках) были практически одинаковы, но в условиях загрязнения при возрастании устьичной проводимости (на 0,6 моль/м²·с) наблюдалось незначительное повышение водного дефицита (на 5%) и значительное снижение интенсивности транспирации (на 5,2 мкмоль/м²·с) и фотосинтеза (на 30,8 мкмоль/м²·с), что подтверждает высокую чувствительность транспирации к стрессовым воздействиям [32].

Наибольший вклад в загрязнение атмосферы г. Ижевска вносят предприятия черной металлургии, теплоэнергетики, машиностроения, автотранспорт. При усилении загрязнения в градиенте «контроль» → «магистральные посадки» → «насаждения санитарно-защитной зоны промышленных предприятий» листья березы повислой, клена ясенелистного, липы мелколистной и караганы древовидной увеличивали водоудерживающую способность значительно, а ивы козьей и яблони ягодной – незначительно. Противоположная реакция наблюдалась у тополя бальзамического и розы майской – снижение водоудерживающей способности в условиях загрязнения, а у рябины обыкновенной достоверных отличий не выявлено. На примере березы показано, что при значительном повышении водоудерживающей способности в условиях стресса наблюдалось снижение ассимиляционной активности, в то время как у клена при среднем уровне водоудерживающей способности более высокие показатели интенсивности фотосинтеза по сравнению с березой, что характеризует адаптивную роль данных показателей. За исключением клена, у остальных древесных растений в течение вегетации водоудерживающая способность достоверно снижалась, что может быть обусловлено нарушением защитных свойств мембран клеток листьев, связанных с продолжительным воздействием поллютантов на ассимиляционный аппарат растений и накоплением в них загрязняющих веществ [6–7].

В условиях нефтехимического загрязнения Уфимского промышленного центра показаны видоспецифические реакции водного обмена хвои и листьев основных лесообразователей (сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill), береза повислая (*Betula pendula* Roth)). Хвоя и листья исследованных видов характеризовались высоким относительным содержанием воды (ОСВ) и низким дефицитом водного насыщения (ДВН), при этом в условиях загрязнения у всех листовых видов и сосны наблюдалось увеличение ОСВ и снижение ДВН относительно контроля, а у лист-

венницы и ели достоверных изменений не выявлено. Интенсивность транспирации (ИТ) являлась параметром, наиболее подверженным воздействию промышленного загрязнения: наблюдалось значительное увеличение ИТ относительно контроля у сосны, лиственницы и дуба, у липы выявлено ее значительное и достоверное подавление, а у ели и березы достоверных изменений не выявлено. Показано нарушение суточной и вегетационной динамик ОСВ, ДВН и ИТ для всех лесообразователей [2, 18, 45]. Для клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и тополей дрожащего (*Populus tremula* L.), черного (*Populus nigra* L.) и бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях нефтехимического загрязнения показано, что листья исследованных древесных пород характеризовались высоким ОСВ и низким ДВН, причем характерной особенностью являлось то, что в условиях загрязнения ОСВ ниже, чем в условиях контроля, а ДВН выше. У всех видов в условиях загрязнения наблюдались усиление ИТ (незначительное у клена и тополей черного и бальзамического и значительное у тополя дрожащего) и нарушение суточного хода данного параметра [8, 44]. У ивы белой нефтехимическое загрязнение вызывало значительную перестройку адаптивных реакций в первой половине вегетационного периода: значительное и достоверное подавление ИТ в течение дня у молодых листьев в мае и значительную стимуляцию в июне. Во второй половине вегетации изменения ИТ в условиях загрязнения относительно контроля не значительные, и, как правило, не достоверные. Выявлено нарушение суточной и вегетационной динамик ИТ [4].

На отвалах «Кедровского» разреза угольной промышленности Кузбасса (приоритетными загрязнителями являются тяжелые металлы Cd, Pb, Zn, Mg, Ni на фоне недостатка воды в почве) у хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) выявлено незначительное повышение водоудерживающей способности относительно контроля (до 3–4%), снижение суточных потерь воды (до 5%) и значительное возрастание водного дефицита (до 20%). Показано, что в динамике вегетационного периода наиболее ярко эти тенденции проявляются в июле [47].

Увеличение интенсивности атмосферного загрязнения (контроль < густонаселенные районы с большим транспортным потоком < район сосредоточения промышленных предприятий) в условиях г. Красноярска значительно снижало водоудерживающую способность листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) относительно контроля. Для яблони лесной (*Malus sylvestris* Mill.) промышленное загрязнение также являлось фактором значительного снижения водоудерживающей способности, однако выбросы автотранспорта стимулировали ее возрастание относительно контроля. Черемуха Маака (*Padus maackii* Kom.) очень слабо реа-

гировала на оба вида загрязнения, однако характер реакций был сходен с яблоней. В течение вегетации указанные тенденции усиливались у всех исследованных видов, при этом черемуха выделена как более устойчивый вид по сравнению с яблоней и березой [37].

Обследование деревьев лагерстремии (*Lagerstroemia speciosa* L.), растущих вдоль обочины Национального шоссе в городе Дехрадун (Индия), показало, что листья характеризовались низкими скоростью ассимиляции углерода ($6,31 \mu\text{моль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), интенсивностью транспирации ($3,19 \text{мкмоль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), устьичной проводимостью ($0,13 \text{мкмоль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) и устьичным сопротивлением ($27,68 \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$), но при этом на фоне утолщения листьев наблюдалась повышенная эффективность водопользования ($1,99 \mu\text{моль CO}_2/\text{моль}^{-1} \text{H}_2\text{O}$). Выявлено, что по сравнению с контрольными насаждениями в условиях интенсивного грузового трафика наблюдались снижение скорости ассимиляции углерода на 36,7%, интенсивности транспирации на 42,14%, устьичной проводимости на 66,85%, устьичной сопротивляемости на 212,2%. При этом выявлено утолщение листа на 40,54% и увеличение эффективности водопользования на 9,4%. Также обнаружено, что в условиях загрязнения повышались дефицит давления пара (на 63,18%) и концентрация пролина в тканях листьев (на 15,61%), которые считаются индикаторами стресса. Корреляционный анализ показал, что снижение скорости ассимиляции CO_2 линейно связано с увеличением толщины листьев ($R^2 = 0,94$), интенсивностью транспирации ($R^2 = 96$), устьичной проводимостью ($R^2 = 77$) и устьичным сопротивлением ($R^2 = 79$). Кроме того, устьичное сопротивление линейно связано с интенсивностью транспирации ($R^2 = 73$) и устьичной проводимостью ($R^2 = 99$). Таким образом, интенсивное движение транспорта в значительной степени нарушало физиологические функции деревьев [91].

Атмосферные загрязнители оказывают лишь незначительное воздействие на транспирацию шести видов городских деревьев (гинкго *Ginkgo biloba* L., каштан *Aesculus chinensis* Bunge, магнолия *Magnolia liliiflora* Desr., робиния *Robinia pseudoacacia* L., сосна *Pinus tabulaeformis* Carr., кедр *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don) в Пекине (Китай). Вариационный анализ показал, что атмосферные осадки и концентрация NO в воздухе не оказывали существенного влияния на скорость транспирации этих древесных пород, а температура (воздуха, почвы и общая радиация), влажность (дефицит давления пара, относительная влажность воздуха и влажность почвы) и загрязнители (NO_2 , O_3 , SO_2 и $\text{PM}_{2,5}$ – твердые частицы размером менее 2,5 микрон) значительно влияли на транспирацию деревьев (как почасовую в течение суток, так и среднесуточную) на протяжении всего года. Атмосферное загрязнение, характеризующееся концентрациями отдельных загряз-

нителей, являлось лишь дополнительным незначительным фактором стресса в городской среде, а условия микроклимата, характеризующиеся параметрами влажности и температуры (как независимо, так и совместно), являлись определяющими факторами, регулирующими характер транспирации деревьев. Температура воздуха, температура почвы, общее излучение, дефицит давления пара и O_3 являлись наиболее существенными предикторами суточной интенсивности транспирации. Из всех атмосферных загрязнителей лишь O_3 оказывал значительное положительное воздействие на показатели транспирации всех деревьев, а SO_2 , NO , NO_2 и $PM_{2,5}$ практически на нее не влияли. Например, в дисперсионной модели транспирации каштана китайского из общей, составляющей 71,3%, дисперсии факторов, влияющих на транспирацию, 32,4% приходилось на температуру воздуха, почвы, общую радиацию, дефицит давления пара и O_3 (в сумме эти факторы объясняли 68% почасовых и 80% среднесуточных изменений транспирации), 17,9% – на загрязнители NO , NO_2 , SO_2 и $PM_{2,5}$, 12,3% – на относительную влажность воздуха, 8,7% – на влажность почвы и осадки. В то же время для сосны китайской показано, что в почасовой динамике ведущими факторами являлись фотосинтетически активное излучение и дефицит давления пара, в среднесуточной динамике – фотосинтетически активное излучение, температура воздуха и содержание воды в почве, а в сезонной и годовой динамике – содержание воды в почве, что свидетельствует о наличии варибельности между ведущими факторами у изученных древесных видов [98–100].

Обзор публикаций, посвященных проблеме «снижают ли повышенные концентрации CO_2 повреждающие эффекты O_3 », показал, что на фоне повышенной концентрации CO_2 кратковременное повышение O_3 уменьшало фотосинтез, который в свою очередь снижал устьичную проводимость. Длительное воздействие O_3 приводило к тому, что реакции устьиц в ответ на внешние воздействия становились замедленными, а повышение концентрации CO_2 стимулировало быстрое закрытие устьиц. Снижение устьичной проводимости, а вместе с ней и снижение фотосинтеза не может продолжаться длительное время, потому что устьица реагируют на изменения окружающей среды медленнее, чем фотосинтез, а повышение CO_2 может изменять чувствительность устьичных клеток к другим сигналам. Кроме того, снижение устьичной плотности и устьичной проводимости в ответ на длительное увеличение CO_2 предполагает устойчивое снижение последней. Следовательно, повышенная концентрация CO_2 снижает повреждающие эффекты O_3 , уменьшая устьичную проводимость и, таким образом, потенциальный поток O_3 в листья [84].

Экспериментальная имитация стрессовых условий

Эксперименты с обработкой листьев бузины черной (*Sambucus nigra* L.) аэрозолями $NaNO_3$ выявили усиление интенсивности транспирации, особенно через устьица с маленькой апертурой, что привело к увеличению устьичной проводимости листа от 45 до 90%, при этом эффективность использования воды уменьшилась. Указывается на физическое объяснение результатов – поглощение и десорбция воды солевыми отложениями вследствие изменения толщины слоя под солевой пленкой. Микроскопические наблюдения циклического процесса конденсации и испарения воды на поверхности листа при изменении проводимости пограничного слоя показали, что гигроскопические частицы действуют как краткосрочные промежуточные места скопления, или как основные места испарения воды, проходящей через устьичные поры вдоль пленок соляного раствора. Таким образом, процессы водного транспорта управляются не только устьичной проводимостью и апертурой, но и гигроскопическими солями на поверхности листа [57].

Саженьцы сосны (*Pinus radiata* D. Don) последовательно подвергали сначала имитированному кислотному дождю (pH 3,0) в течение 1 месяца, а затем, через две недели, имитированной засухе (20 дней). Оценка водного обмена хвои показала, что кислотные дожди не влияли ни на водный потенциал хвои, ни на относительное содержание воды, но отмечалось заметное увеличение транспирации в сравнении с контролем. Последовавшая засуха оказала большое влияние на потенциал воды в хвое (уменьшение на 2,5 МПа), относительное содержание воды (уменьшение на 50%), проницаемость мембраны (увеличение на 340%) и скорость транспирации (увеличение на 25%) в сравнении с контролем. Следовательно, кислотные дожди, не оказывая значительного прямого воздействия, изменяют толерантность этого вида к засухе и повышают чувствительность к обезвоживанию [78].

Фустигация листьев клена серебристого (*Acer saccharinum* L.) раздельно Cd^{2+} (в концентрациях 0, 5, 10 и 20 ppm в течение 45 ч) и SO_2 (в концентрациях 0,1 и 2 ppm в течение 30 минут) показала, что чистый фотосинтез и транспирация значительно снижались в обоих случаях, а совместное воздействие токсикантов снижало их еще гораздо больше. Диффузионные сопротивления листьев к переносу диоксида углерода и водяного пара увеличивались с увеличением концентрации как Cd^{2+} , так и SO_2 . Листья, обработанные 5 ppm Cd^{2+} , показали повышенный чистый фотосинтез и транспирацию и уменьшенную устойчивость к потоку диоксида углерода и водяного пара [71].

Показано, что атмосферное загрязнение вызывает изменения в газообмене листьев и хвои древесных ра-

стений бука *Fagus sylvatica* L., тополя *Populus deltoides* X *Populus nigra*, ели *Picea sitchensis* (Bong.) Carrière и *Picea abies* L.: наблюдались как ингибирование, так и стимуляция устьичной проводимости, часто не связанные с влиянием газообразных загрязнителей. Так, имитация кислотного дождя с pH 2,8 вызывала временное увеличение устьичной проводимости листьев *P. deltoides* X *P. nigra*, а повышенные концентрации O₃ увеличивали их устьичную проводимость в течение всего дня. Первоначальное воздействие газообразных SO₂ и NO₂ часто приводило к открытию устьиц, но долгосрочное воздействие сопровождалось их закрытием. Таким образом, связь между устьичной реакцией и увеличением концентраций разных газообразных загрязнителей остается неясной [62].

С использованием камер для фумигации изучены смачиваемость листьев и потеря воды листьями двух видов тополя (*Populus nigra* L. и *P. euramericana* L. сорт Robusta) и псевдотсуги (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) при трех режимах O₃ (1; 13–41; 30–45 частей на миллион по объему). Воздействие O₃ уменьшало углы контакта капель с листьями и увеличивало потери воды и проводимость водяного пара. Это приводило к появлению внешних симптомов повреждения листьев, снижению фотосинтетической биомассы, образованию меньшего количества новых листьев, уменьшению размеров листьев и преждевременному их опаданию, причем данные ответные реакции в значительной степени видоспецифичны. Несмотря на то что *P. euramericana* всегда считался толерантным видом по отношению к O₃, в данном эксперименте наиболее сильные и устойчивые негативные последствия воздействия проявились именно на нем. Однако реакции в камерах для фумигации и в полевых условиях, безусловно, будут различаться [89].

II. Влияние техногенеза на пигментный комплекс ассимиляционного аппарата: специфические и неспецифические реакции

Обзор влияния техногенеза на пигментный комплекс ассимиляционного аппарата древесных растений проведен по климатическим зонам в направлении с запада на восток. В первую очередь дан обзор Европейской зоны, начиная с Польши и в пределах Российской Федерации: Калининград-Арзамас-Барыш-Сыктывкар-Уфа-Красноярск-Иркутск. Второй пояс составляют зарубежные страны Азии (Иран-Индия-Южная Корея), островов Тихого Океана (Филиппины), а также Южная Африка. Отдельно рассмотрены работы, оценивающие индекс толерантности растений (Индия и Китай) и адаптивные реакции при имитации стрессовых условий.

Промышленные центры, городская среда, автотранспорт

Исследования каротиноидов в однолетней хвое *Pinus sylvestris* L. в 2 км от производства фосфорных удобрений в Лубоне (Польша) показали, что под воздействием промышленного загрязнения при сравнении с контрольными условиями значительно уменьшались концентрации неоксантина и виолаксантина, но значительно увеличивались концентрации лютеина и β-каротина. При этом нарушались естественные пропорции между каротиноидами: ряд возрастания каротиноидов в контроле «неоксантин > β-каротин > виолаксантин > лютеин» трансформировался в ряд возрастания в загрязненных условиях «лютеин > β-каротин > неоксантин > виолаксантин». В целом среди изученных пигментов преобладал β-каротин, что являлось результатом глубокого окисления (превращение зеаксантина в виолаксантин) и свидетельствовало о повреждении фотосистемы под воздействием промышленного загрязнения и о работе механизмов защиты фотосистем [75].

Промышленное загрязнение в Паневнике (индустриальная зона возле г. Катовице, Польша) в хвое текущего года генерации вызывало снижение содержания хлорофилльных пигментов у сосен *Pinus strabus* L. и *P. nigra* Arnd., но незначительное увеличение у *P. sylvestris* L. и псевдотсуги *Pseudotsuga menziesii* Franco. При этом у всех четырех видов наблюдалось значительное возрастание содержания феофитина. В то же время в хвое второго года генерации всех четырех видов все исследованные пигменты показали рост относительно контроля, но в разной степени интенсивности [64].

Загрязнение воздушного бассейна города Калининграда приводит к значительному увеличению уровня зеленых пигментов, каротиноидов и антоциановых пигментов у деревьев рябины (*Sorbus aucuparia* L.), липы (*Tilia cordata* Mill.), клена (*Acer platanoides* L.) и ели (*Picea pungens* Engelm.). У всех видов выявлена прямая корреляционная зависимость между количеством зеленых пигментов и аскорбиновой кислотой и обратная корреляция между содержанием хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов. Устойчивость древесных пород к загрязнению воздушной среды снижалась в ряду: ель→клен→липа→рябина [27].

Оценка физиологических показателей листьев липы *Tilia cordata* Mill., тополя *Populus tremula* L., ив *Salix fragilis* L., *Salix alba* L. из разных городских районов Арзамаса (промышленный город Нижегородской области) показала, что увеличение техногенной нагрузки привело к снижению концентрации всех фотосинтетических пигментов, наиболее сильно Хл *a*, но в то же время привело к увеличению концентрации каротиноидов, наиболее значительно в листьях липы, ивы

ломкой и, в меньшей степени, ивы белой, что свидетельствует об увеличении защитной роли этого пигмента. Кроме того, в листьях этих трех деревьев было установлено повышенное соотношение «Хл *a* / Хл *b*», характерное для устойчивых видов растений, что является признаком более высокой потенциальной фотохимической активности листьев и скорости фотосинтеза [88].

Показано не только влияние городского автотранспорта г. Барыш на снижение содержания пигментов у березы (*Betula pendula* Roth) относительно контроля, но и равноценное угнетающее действие ксилотрофных грибов 1 и 2 стадий развития (чага 1 и чага 2): Хл *a* уменьшается в ряду: загрязнение > чага 1 > чага 2; Хл *b* в ряду: чага 1 > чага 2 > загрязнение; Каротиноиды в ряду: чага 2 > загрязнение > чага 1; «Хл *a* / Хл *b*» в ряду: загрязнение > чага 2 > чага 1; «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды» в ряду чага 1 > чага 2 > загрязнение. Таким образом Хл *a* и каротиноиды сильнее подавлялись грибами, чем загрязнением от автотранспорта, на Хл *b* большее влияние оказывало загрязнение, чем грибы, но на сумму хлорофиллов загрязнение оказывало большее воздействие, чем грибы [5].

В условиях длительного неповреждающего воздействия промышленных выбросов Сыктывкарского лесопромышленного комплекса показан при сравнении с контролем рост содержания хлорофиллов у сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea obovata* Ledeb.) (в 1,2–1,3 раза), однако в отношении каротиноидов эти виды различались: у сосны содержание этих пигментов увеличивалось, а у ели уменьшалось. Соотношение «Хл *a* / Хл *b*» в условиях загрязнения возрастало у обоих видов, в то время как соотношение «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды» у сосны уменьшалось, а у ели, напротив, росло. Через 14 лет при значительном снижении объемов выбросов различия между загрязнением и контролем по всем показателям фактически исчезли и стали недостоверными. Сделан вывод о стабильности пигментного комплекса ели в условиях загрязнения, у сосны он более чувствителен [41–42].

В условиях нефтехимического загрязнения Уфимского промышленного центра показаны видоспецифические реакции пигментного комплекса основных лесобразователей: увеличение содержания всех пигментов у березы повислой (*Betula pendula* Roth); уменьшение содержания всех пигментов у лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.); увеличение содержания хлорофиллов и уменьшение содержания каротиноидов у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill); уменьшение содержания хлорофиллов и увеличение содержания каротиноидов у ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). У лиственных видов в течение вегетации происходило снижение содержания всех пигментов, в то время как у

хвойных наблюдалось снижение их содержания до июля и существенное увеличение к концу вегетации. Хвоя сосны, ели, лиственницы и листья дуба и березы характеризовались стабильностью пигментного состава по соотношению «Хл *a* / Хл *b*» на протяжении всего вегетационного периода, а у липы в условиях загрязнения резко возрастала доля хлорофилла *a* в составе фотосинтезирующих пигментов. Соотношение «Хл *a* + Хл *b* / Каротиноиды» показало, что у хвойных видов увеличивалась доля хлорофиллов *a* и *b* на фоне уменьшения доли каротиноидов, а у лиственных лесобразователей, напротив, увеличивалась доля каротиноидов на фоне уменьшения долей хлорофиллов *a* и *b*. Несмотря на значительную фотосинтетическую активность лиственницы и липы, превышающую таковую у сосны, ели, дуба и березы, их пигментный комплекс более чувствителен к промышленному загрязнению [43, 97]. У клена остролистного в условиях нефтехимического загрязнения наблюдалось снижение концентрации хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов, причем наиболее чувствительными к загрязнению являлись хлорофилл *b* и каротиноиды [8], а реакция пигментов ивы белой зависела от периода вегетации: до середины вегетации при усилении загрязнения наблюдались незначительные и недостоверные уменьшения содержания хлорофилла *a*, увеличение содержания хлорофилла *b* и значительное и достоверное компенсаторное увеличение содержания каротиноидов; в середине вегетации происходил резкий скачок увеличения содержания всех пигментов; в конце вегетации концентрация всех пигментов снижалась в ответ на усиление загрязнения [3].

Исследования содержания пигментов в хвое ели (*Picea obovata* Ledeb.) вдоль городских магистралей г. Красноярска показали их существенное и достоверное снижение относительно контроля: Хл *a* хвои второго года жизни в 2,3–3 раза, третьего года жизни в 1,6–1,7 раза; Хл *b* хвои второго года жизни в 2,6–3,5 раза, третьего года жизни в 3–3,2 раза; каротиноидов хвои второго года жизни в 2,8–3,6 раза, третьего года жизни в 1,4–1,6 раза. При этом соотношение пигментов «Хл *a* / Хл *b*» в хвое второго и третьего годов жизни в условиях техногенной среды были выше контрольных значений, что свидетельствовало о том, что изменения в пигментном комплексе происходили главным образом за счет снижения содержания Хл *b*. По степени наибольшего подавления пигменты располагались в ряду: Хл *a* < Хл *b* < Каротиноиды [16].

Выбросы Иркутско-Черемховского промышленного центра, обусловленные предприятиями теплоэнергетики, металлургии, химической и нефтехимической промышленности, привели к уменьшению содержания Хл *a*, Хл *b*, каротиноидов, доли хлорофиллов в светособирающем комплексе, максимальной флуоресценции хлорофилла и соотношения переменной

к максимальной флуоресценции хлорофилла в хвое сосны (*Pinus sylvestris* L.) по сравнению с контролем. В то же время соотношения «Хл *a* / Хл *b*» и «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды» росли по сравнению с фоновыми значениями, в первом случае за счет снижения уровня Хл *b*, во втором случае – за счет снижения уровня каротиноидов. Выявлены средние, сильные и очень сильные обратные корреляционные связи между содержанием в хвое S, F, Hg, Pb, Cd, Fe, Al и уровнем пигментов ($r = \text{от } -0,51 \text{ до } -0,95$) [79].

Высокие уровни промышленного загрязнения, вызванные нефтехимическими заводами в промышленном районе города Махшахр на юге Ирана, привели к повреждению лесов каллистемона *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels (10–15-летние деревья). В загрязненных областях при значительном уменьшении морфологических параметров листа наблюдались более высокие концентрации хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов по сравнению с деревьями в незагрязненных областях [90].

Значительный блок исследований посвящен оценке влияния автотранспорта и загрязнения в условиях городской среды на пигментный комплекс древесных растений в Индии. В Самбалпуре (штат Орисса) проведено исследование сезонных изменений в накоплении пыли на листьях и содержания пигментов в листьях шести видов растений вблизи автострады и двух рисовых заводов. Уменьшение осаждения пыли обнаружено в ряду табернемонтана *Tabernaemontana divaricata* R.Br. ex Roem. & Schult. > ипомея *Ipomea carnea* Jacq. > понгамия *Pongamia pinnata* (L.) Panigrahi > фикус *Ficus religiosa* L. > *F. benghalensis* L. > квисквалис *Quisqualis indica* L. У всех изученных видов показана значительная корреляция между сезонным увеличением пылевой нагрузки (сезон дождей < лето < зима) и уменьшением содержания пигментов. При этом Хл *a* у данных видов во все сезоны как минимум вдвое превышал содержание как Хл *b*, так и каротиноидов, которые всегда находились приблизительно на одинаковом уровне [86].

Аналогичные исследования проведены для деревьев фикуса *Ficus religiosa* L., *F. bengalensis* L., манго *Mangifera indica* L., дальбергии *Dalbergia sissoo* Roxb., гуайявы *Psidium guajava* L. и дендрокаламуса *Dendrocalamus strictus* (Roxb.) Nees вдоль центральной городской дороги с высокой плотностью движения в г. Варанаси. Все виды характеризовались максимальным осаждением пыли в зимний сезон, за которым по мере уменьшения осаждения следовали летний и дождливый сезоны. Содержание хлорофилла уменьшалось, а содержание аскорбиновой кислоты увеличивалось с увеличением осаждения пыли. Показаны очень сильные корреляции между осаждением пыли и содержанием хлорофилла (отрицательная) и аскор-

биновой кислоты (положительная) [85]. Совокупное и индивидуальное воздействие основных загрязнителей воздуха на тринадцать видов тропических деревьев в течение шести сезонов на протяжении двух лет в трех различных городских районах (транспортных, промышленных и жилых) г. Варанаси показало, что на содержание Хл *a* и Хл *b*, общего хлорофилла и каротиноидов у большинства видов растений значительное влияние оказали расположения точек взятия пробы и сезон. Были зарегистрированы различные вариации во всех функциональных характеристиках листьев с увеличением нагрузки загрязнения: Хл *a* – восемь видов растений показали значительное увеличение на 20–92%, а пять – значительное снижение на 17–73%; Хл *b* – девять видов растений показали значительное увеличение на 16–82%, а четыре – значительное снижение на 22–44%; «Хл *a* + Хл *b*» – восемь видов растений показали значительное увеличение на 19–85%, а пять – значительное снижение на 17–50%; каротиноиды – девять видов растений показали значительное увеличение на 15–36%, а четыре – значительное снижение на 8–39%; в соотношении «Хл *a* / Хл *b*» – восемь видов растений показали значительное приращение на 15–77%, а пять – значительное снижение на 18–72%; в соотношении «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды» девять видов растений показали значительные приращения на 26–95%, а четыре – значительное снижение на 6–37%. Сделан вывод, что тенденция к снижению соотношения «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды» являлась явным свидетельством раннего стресса у растений. Среди загрязнителей главными факторами стресса являлись взвешенные твердые частицы и O₃, вызывающие 47 и 33% изменчивости функциональных характеристик листьев [82].

Оценено содержание пигментов в растениях, растущих в загрязненной воде реки Митхи (г. Мумбаи). До 80% городских отходов оказывается в ее водах, причем по мере впадения притоков в реку уровень загрязнения повышается вплоть до выхода в море, на основании чего выделены 4 загрязненных участка и контроль. Несмотря на сильное варьирование содержания пигментов в листьях исследованных видов показано, что в контроле их содержание в целом выше, чем в загрязненных участках. Полученные данные позволили выделить виды индикаторы (клещевина *Ricinus communis* L., альтернантера *Alternanthera paronchiodes* A.St.-Hil., фикус *Ficus hispida* L.f.), у которых содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов значительно снижалось по мере усиления загрязнения реки, толерантные виды (авиценния *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh., сида *Sida acuta* Burm.f.), у которых при усилении загрязнения возрастала концентрация пигментов, и виды (тамаринд *Tamarindus indica* L., сальвадора *Salvadora persica* L., фикус *Ficus raecemosa* L.), не проявлявшие четких тенденций в ответ на загрязнение [81].

Оценка фотосинтеза и антиоксидантной ферментативной активности у деревьев *Platanus occidentalis* L., растущих на сильно загрязненных улицах Сеула (Южная Корея), и у деревьев *Erythrina orientalis* Murr., растущих в городах с высоким уровнем загрязнения воздуха Мафати и Кезоне (Филиппины), показали, что загрязнение SO₂, NO₂ и взвешенными веществами значительно снижали интенсивность фотосинтеза по сравнению с контрольными участками, но при этом значительно повышали активность антиоксидантных ферментов – аскорбатпероксидазы и глутатионредуктазы, что являлось компенсаторным механизмом для минимизации ущерба от стресса [101, 102].

Оценены листья дерева брахилена (*Brachylaena discolor* DC.) в качестве биоиндикатора загрязнения диоксидом серы в промышленном районе Южного Дурбанского бассейна в Южной Африке. Показано увеличение относительного содержания хлорофилла на загрязненных участках по сравнению с контролем, причем этот показатель значительно коррелировал с сезонным изменением концентраций SO₂ в приземном слое воздуха и в листьях [56].

Индекс толерантности

Интересный блок составляет серия исследований по оценке «Индекса толерантности» различных древесных и кустарниковых видов по отношению к разным типам загрязнения. Анализ литературных данных разных стран по индексу толерантности (одним из составляющих индекса является содержание общего хлорофилла) показал, что по степени снижения индекса у различных видов растений в ответ на промышленное загрязнение образуется ряд: Китай > Индия > Индонезия > Венгрия > Нигерия > Иран [80].

Выбросы кремниевого комбината в Курнуле (Андхра-Прадеш, Индия) стимулировали увеличение индекса толерантности листьев каяна *Cajanus cajan* (L.) по сравнению с контролем на 13,14%, и значительное увеличение содержания общего хлорофилла на 42,02% [76]. Аналогичные результаты выявлены в районе газового завода Оторогун (штат Дельта, Нигерия), где показано значительное увеличение (в 2–4 раза) содержания общего хлорофилла и индекса толерантности (от 2 до 45%) при сравнении с контролем у шести видов растений, имеющих следующий порядок толерантности: эмилия *Emilia sonchifolia* (L.) DC. ex Wight (1,49%) > маниок *Manihot esculenta* Crantz (2,19%) > масличная пальма *Elaeis guineensis* Jacq. (2,41%) > императа *Imperata cylindrica* (L.) P. Beauv. (25,56%) > хромолена *Eupatorium odoratum* L. (35,17%) > гуаява *Psidium guajava* L. (45,11%). Однако процент возрастания содержания общего хлорофилла исследованных видов не соотносился с процентом возрастания их индекса толерантности [55].

Такие же выводы были получены в исследованиях вокруг нефтеразведочной станции Эрхойке-Кокори того же штата Дельта. Здесь выявлен следующий порядок толерантности: *Mangifera indica* L. > *Eupatorium odoratum* L. > *Imperata cylindrica* (L.) P. Beauv. > *Manihot esculenta* Crantz > *Terminalia catappa* L. > *Anacardium occidentale* L. > *Bambusa bambos* (L.) Voss > *Musa paradisiaca* L. > *Elaeis guineensis* Jacq. > *Psidium guajava* L. [54].

Для оценки загрязнения на городских улицах Дехрадун (Индия) с умеренной, сильной и тяжелой нагрузками отобраны на основе индекса толерантности виды, чувствительные к загрязнению воздуха: кассия *Cassia fistula* L. (7,56) < манго *Mangifera indica* L. (8,10) < эвкалипт *Eucalyptus hybrid* (8,69). У всех видов показано резкое и значительное уменьшение содержания общего хлорофилла в условиях загрязнения относительно контроля и восстановление по мере уменьшения уровня загрязнения [96]. Аналогичные результаты представлены для 24 видов деревьев, произрастающих в промышленном районе Висахапатнама, характеризующемся выбросами тяжелой промышленности [70], для 14 видов деревьев и 6 видов кустарников, произрастающих на территории Руркельского металлургического завода [59], для древесных и кустарниковых растений, произрастающих в районе металлургических и химических заводов промышленного центра Калунга [93], для растительности, подверженной выбросам золы от Бадарпурской ТЭЦ [87] и выбросам взвешенных и органических веществ при производстве сахара [94]. Во всех описанных случаях показано, что в листьях происходит снижение содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, либо общего хлорофилла, значительное для одних видов и не столь значимое для других, наибольшее зимой и наименьшее в сезон дождей, и указывается, что индекс толерантности не в полной мере отражает чувствительность пигментного комплекса к уровню загрязнения, и прямая зависимость между этими параметрами отсутствует.

Исследованы деревья полиулия *Polyalthia longifolia* (Sonner) Thw., алыстония *Alstonia scholaris* R. Br., манго *Mangifera indica* L. и кустарники клеродендрон *Clerodendron infortunatum* L., хромолена *Eupatorium odoratum* L., хиптис *Hyptis suaveolens* (L.) Poit., растущие на 75-километровом участке вдоль Национального шоссе 47 (Индия). У этих видов наибольшие индексы толерантности наблюдались в муссон (июль), наименьшие – зимой (ноябрь) и летом (март), а наибольшее содержание общего хлорофилла – в муссон и зимой. При этом вдоль шоссе наблюдалось значительное уменьшение содержания общего хлорофилла относительно контроля во все исследованные сезоны [67].

Вдоль национальной автомагистрали № 58 в г. Харидвар (Индия) показано значительное снижение хло-

рофиллов *a* и *b*, общего хлорофилла и каротиноидов по сравнению с контролем у шести видов деревьев, ранжированных по уровню снижения пигментов: маллотус *Mallotus philippinensis* Muell-Arg (17,8%) < тик *Tectona grandis* Linn.f. (23,3%) < саль *Shorea robusta* Gaertn.f. (25,8%) < эвкалипт *Eucalyptus citriodora* Hook. Syn. (43,0%) < манго *Mangifera indica* L. (43,8%) < индийский вяз *Holoptelea integrifolia* (Roxb.) Planch (48,7%). При этом ранжирование по индексу толерантности представляло противоположную картину: *M. indica* (6,76) < *E. citriodora* (7,32) < *T. grandis* (7,4) < *S. robusta* (9,02) [65, 66].

Оценка индекса толерантности у двадцати трех видов растений, произрастающих возле Пекинского металлургического завода (Китай), показала вариабельность между параметрами, используемыми для его вычисления, связанную с изменениями температуры и влажности воздуха, водного статуса растения и периода вегетации. Единых тенденций как в пределах деревьев и в пределах кустарников, так и между деревьями и кустарниками не обнаружено. У большинства изученных видов изменение содержания общего хлорофилла в течение вегетационного периода четко соотносилось с адекватным изменением индекса толерантности, однако у 3 из 9 деревьев и у 2 из 6 кустарников изменение этих показателей характеризовалось разнонаправленностью. Так, у деревьев айланты *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, бруссонетии *Broussonetia papyrifera* (L.) L'Hér. ex Vent. и робинии *Robinia pseudoacacia* L. снижение содержания общего хлорофилла на 25,8, 54,8 и 2,1% сопровождалось увеличением индекса толерантности на 24,5, 77,3 и 55,2% соответственно. В то же время *B. papyrifera* классифицирована как чувствительный вид в июле, но толерантный в остальные месяцы вегетации. Отмечается, что кустарники в целом более толерантны к загрязнению воздуха, чем деревья [72].

Экспериментальная имитация стрессовых условий

Проведена имитация стресса, вызываемого SO₂, с использованием камеры фумигации с SO₂ в концентрациях 0–25–50–100–200 мг/м³ среди трех видов кустарников. Через 72 часа воздействия уменьшилось содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов относительно контроля во всех вариантах опыта. На основании газообменных характеристик и реакции флуоресценции хлорофилла показан ряд снижения устойчивости растений к SO₂: бересклет *Euonymus kiautschovicus* Loes. > бирючина *Ligustrum vicaryi* L. > сирень *Syringa oblata* Lindl. [61].

Тропические деревья, фумигированные O₃ в концентрациях 40, 80 и 120 частей на миллион по объему, показали значительное снижение общего содержания

хлорофилла и чистого фотосинтеза, что говорит об их относительно высокой чувствительности к этому загрязнению. Сокращение содержания общего хлорофилла колебалось от 12 до 36% у баухинии *Bauhinia variegata* L., 11–35% у фикуса *Ficus religiosa* L. и 3–26% у понгамии *Pongamia pinnata* (L.) Pierre. Чистый фотосинтез был также уменьшен на 6–26% у *B. variegata*, 16–39% у *F. religiosa* и 7–31% у *P. pinnata* [58].

Исследования на четырех древесных видах, применяемых для озеленения в Китае (айлант *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, ясень *Fraxinus chinensis* Roxb., платан *Platanus orientalis* L., робиния *Robinia pseudoacacia* L.), путем фумигации O₃ в камерах показали, что у всех видов при появлении видимых повреждений, микроскопических изменений (коллапс палисадных паренхимных клеток, накопление каллозы, ускоренное старение хлоропластов и митохондрий) наблюдалось снижение ассимиляции CO₂, активности рибулозобисфосфаткарбоксилазы, скорости переноса электронов и флуоресценции (квантовый выход нециклического переноса электронов и гашение фотохимической эффективности ФСII), а также повышение общей антиоксидантной емкости, содержания фенолов и аскорбатов. Существенного взаимодействия между фотосинтезирующими и антиоксидантными системами при фумигации O₃ не обнаружено, что говорит об индивидуальной чувствительности данных параметров [63].

Заключение

Многие исследования указывают на проявление специфических адаптивных реакций как в отношении водного обмена ассимиляционного аппарата древесных растений в условиях техногенеза (табл. 1, строка 1), так и в отношении пигментного комплекса (табл. 1, строка 5), но в то же время независимо от древесного вида и типа промышленного загрязнения могут наблюдаться как неспецифические, так и нейтральные адаптивные реакции.

Особый интерес вызывают публикации, в которых показана относительная независимость физиологических адаптивных реакций в пределах одного органа, когда в листьях и хвое одновременно наблюдаются разнонаправленные специфические, неспецифические и нейтральные реакции, несмотря на единство и целостность этих органов (табл. 1, строки 2–4, 6, 8). Следует отметить, что, в отличие от исследований, проведенных в полевых условиях, опыты с искусственной имитацией стрессовых условий всегда дают «чистые» результаты, показывая либо специфические [58, 63, 71], либо неспецифические [57, 62, 89], либо нейтральные [78] адаптивные реакции физиологических параметров. Кроме того, как и в случае с морфологией ассимиляционных органов, обращает на себя внимание отсутствие одновременного проявления не-

Табл. 1

Распределение публикаций, использованных в обзоре, по встречаемости в результатах исследований специфических, неспецифических и нейтральных адаптивных реакций физиологических параметров ассимиляционных органов в ответ на техногенное загрязнение

№ строки	Неспецифические реакции	Специфические реакции	Нейтральные реакции
<i>Водный обмен</i>			
1	[8, 44, 57, 62, 89]	[45, 71, 74, 91]	[78]
2	[18, 46, 47, 68]		
3		[98–100]	
4	[2, 4, 6, 7, 32, 37, 92]		
<i>Пигментный комплекс</i>			
5	[8, 27, 41, 54–56, 76]	[5, 58, 63, 67, 75, 85, 101, 102]	
6	[3, 16, 42, 59, 61, 64–66, 70, 72, 79, 82, 86–88, 90, 93, 94, 96]		
7			
8	[43, 81, 97]		

специфических и нейтральных адаптивных реакций, одновременно проявляются только специфические и нейтральные реакции, что в свою очередь может характеризовать повышенный адаптивный потенциал древесных видов к техногенезу.

В основе такого многообразия адаптивных реакций лежит принцип множественного обеспечения биологически необходимых функций для сохранения гомеостаза, когда в зависимости от величины адаптивного потенциала растения в процессе приспособления включаются те механизмы, которые позволяют при наименьших энергетических затратах повысить его толерантность к стрессовому фактору.

Обзор показывает, что на сегодняшний день широкое распространение получила методика вычисления «индекса толерантности» видов к промышленному загрязнению. Однако анализ публикаций, использующих его для оценки устойчивости растений к загрязнению, показывает значительную противоречивость получаемых данных как при сравнении с результатами других авторов, так и в пределах собственных исследований. Например, индексы толерантности одного и того же растения в пределах одного региона с одним типом загрязнения у разных авторов могут меняться на противоположные, а в других случаях по отношению к одному и тому же источнику загрязнения показывать значительные перепады по мере приближения от контроля к источнику, что не дает возможности установить четкую тенденцию [54, 55, 59,

65–67, 70, 72, 76, 87, 94, 96]. Следовательно, несмотря на высокую чувствительность физиологических параметров к промышленному загрязнению, изменение их количественных характеристик в значительной степени зависит от адаптивного потенциала растения как к уровню, так и к типу загрязнения.

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 № 20-14-50281-Экспансия.

Funding. The reported study was funded by RFBR, project number 20-14-50281.

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 АМ. Водный режим растений и влияние на него засухи. Казань: Татгосиздат; 1948.
2. Аминова КЗ, Уразгильдин РВ, Кулагин АЮ, Денисова АВ. Вегетационная динамика водного обмена хвои ели сибирской, сосны обыкновенной, лиственницы Сукачева в условиях техногенного загрязнения Предуралья. Карельск науч журн. 2016;5(1):81-6.
3. Ахмадуллин РШ. Эколого-биологическая характеристика ивы белой (*Salix alba* L.) в условиях Уфимского промышленного центра (диссертация). Оренбург: ГОУ ВПО ОГПУ; 2014.
4. Ахмадуллин РШ, Зайцев ГА. Особенности транспирации листьев ивы белой в условиях нефтехимического загрязнения. Изв Саратов ун-та сер хим биол экол. 2013;13(2):53-6.
5. Баландайкин МЭ. Динамика и различия в концентрации основных фотосинтетических пигментов листьев березы, произрастающей в неоднородных условиях. Химия растительного сырья. 2014;(1):159-64.
6. Бухарина ИЛ, Двоглазова АА. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет»; 2010.
7. Бухарина ИЛ, Поварнищина ТМ, Ведерников КЕ. Экологобиологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА; 2007.
8. Васильева КА. Эколого-биологические особенности клена остролистного (*Acer platanoides* L.) в условиях техногенного загрязнения (диссертация). Уфа: ИБ УНЦ РАН; 2011.
9. Васфилов СП. Возможные пути негативного влияния кислых газов на растения. Журн общ биол. 2003;64(2):146-59.
10. Веретенников АВ. Фотосинтез древесных растений. Воронеж: Воронежский государственный университет; 1980.
11. Гамалей ЮВ, Куликов ГВ. Развитие хлоренхимы листа. Л.: Наука; 1978.
12. Гетко НВ. Растения в техногенной среде: Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника; 1989.
13. Горышина ТК, Заботина ТН, Пружина ЕГ. Пластидный аппарат травянистых растений лесостепной дубравы в разных условиях освещенности. Экология. 1975;(5):15-22.
14. Гусев НА. Взаимозависимость некоторых показателей водного режима растений и влияние на нее условий внешней среды. В кн.: Водный режим растений в связи с обменом веществ и продуктивностью: Сборник научных статей. М.: Изд-во АН СССР; 1963. с. 43-9.
15. Дашкевич АП. Водный режим [древесных] растений в условиях промышленного загрязнения рудного Алтая. В кн.: Тезисы докладов всесоюзного совещания «Актуальные задачи физиологии и биохимии растений в ботанических садах СССР». Пущино: ГБС АН СССР; 1984. с. 52.
16. Донцов АС, Сунцова ЛН, Иншаков ЕМ. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской. Хвойные бореальной зоны. 2016;37(5-6):246-50.
17. Закман ЛМ. Сезонные изменения содержания пигментов пластид в листьях местных и интродуцированных растений за Полярным кругом. Бот журн. 1969;54(8):1142-57.
18. Зиятдинова КЗ, Уразгильдин РВ, Денисова АВ. Водный обмен листьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения окружающей среды. Вестн Челябинск гос ун-та. 2013;(7) Выпуск 2:181-4.
19. Иванченко ВМ, Легенченко БИ, Кручинина СС. Водный режим и энергетический обмен растений в связи с их гомеостазом. В кн.: Водный режим растений в связи с различными экологическими условиями. Казань: Издательство Казанского университета; 1978. с. 236-44.
20. Илькун ГМ. Газоустойчивость растений. Киев: Наукова думка; 1971.
21. Илькун ГМ. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наукова думка; 1978.
22. Кайбияйнен ЛК. Макроскопические характеристики и статистические закономерности в водном обмене соснового ценоза. В кн.: Проблемы физиологии и биохимии древесных растений. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР; 1989. с. 50-1.
23. Костюченко РН. Особенности суточной и сезонной транспирации некоторых представителей рода *Salix*. В кн.: Материалы международной научно-практической конференции «Лесопользование, экология и охрана лесов: фундаментальные и прикладные аспекты». Томск: Издательство СТУ; 2005. с. 19.
24. Крамер ПД, Козловский ТТ. Физиология древесных растений. М.: Лесная промышленность; 1983.
25. Кулагин ЮЗ. Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука; 1974.
26. Лихолат ЮВ, Мыщик ЛП. Оценка жизнедеятельности растений древесных группировок

- в условиях Индустриального Приднепровья с помощью показателей водного режима. В кн.: Материалы международной научной конференции «Влияние атмосферного загрязнения и других антропогенных факторов на дестабилизацию состояния лесов Центральной и Восточной Европы», Т. 1. М.: МГУЛ; 1996. с. 70-1.
27. Майдебуря ИС. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомо-морфологические особенности и биохимические показатели древесных растений (диссертация). Калининград: РГУ им. И.Канта; 2006.
 28. Мацков ФФ. Распознавание живых, мертвых и поврежденных хлорофиллоносных тканей растений по реакции образования феофитина при оценке устойчивости к экстремальным воздействиям. В кн.: Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды. Л.: Колос; 1976. с. 54-60.
 29. Мокроносов АТ. Фотосинтетическая функция и целостность растительного организма. В кн.: 42-е Тимирязевские чтения. М.: Наука; 1983.
 30. Неверова ОА. Некоторые особенности физиолого-биохимического и анатомического строения ассимиляционного аппарата березы бородавчатой в условиях техногенного загрязнения г. Кемерово. В кн.: Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции «Экологические и метеорологические проблемы больших городов и промышленных зон». СПб.: Изд-во РГГМУ; 1999. с. 98-100.
 31. Николаевский ВС. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М.: МГУЛ; 1998.
 32. Сенькина СН. Показатели водообмена хвои *Picea obovata* (Pinaceae) в условиях аэротехногенного загрязнения (Республика Коми). Растительные ресурсы. 2017;53(2):255-64.
 33. Сергейчик СА. Устойчивость древесных растений в техногенной среде. Минск: Наука и техника; 1994.
 34. Сидорович ЕА, Гетко НВ. Устойчивость интродуцированных растений к газообразным соединениям серы в условиях Белоруссии. Минск: Наука и техника; 1979.
 35. Силаева АМ. Структура хлоропластов и факторы среды. Киев: Наукова думка; 1978.
 36. Ситникова АС. Влияние промышленных загрязнений на устойчивость растений. Алмата: Наука; 1990.
 37. Сунцова ЛН, Иншаков ЕМ, Козик ЕВ. Оценка состояния городской среды методом фитоиндикации (на примере г. Красноярска). Лесной журн. 2011;(4):29-32.
 38. Сулова ВВ, Николаевский ВС. Влияние кислых газов на пигментный состав листьев древесных и газонных растений. Уч записки Пермского ун-та. 1971;256:93-132.
 39. Тарабрин ВП. Водный режим и устойчивость древесных растений к промышленным загрязнениям. В кн.: Газоустойчивость растений: Сборник статей. Новосибирск: Наука; 1980. с. 18-29.
 40. Тарабрин ВП. Физиолого-биохимические механизмы взаимодействия загрязнений и растений. В кн.: Растения и промышленная среда. Днепропетровск: Днепропетровский гос ун-т; 1990. с. 64-71.
 41. Тужилкина ВВ. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение. Экология. 2009;(4):243-8.
 42. Тужилкина ВВ, Плюснина СН. Комплексная оценка состояния хвои *Piceae obovata* (Pinaceae) в условиях аэротехногенного загрязнения. Растительные ресурсы. 2014;50(4):579-86.
 43. Уразгильдин РВ, Аминова КЗ, Зайцев ГА, Кулагин АЮ, Яшин ДА. Сравнительная характеристика формирования пигментного комплекса дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения. Карельский науч журн. 2016;5(1):90-4.
 44. Уразгильдин РВ, Кужлева НГ. Водный режим листьев тополей в условиях промышленного загрязнения. В кн.: Сборник докладов научно-практической конференции «Лесное образование, наука и хозяйство», посвященной 125-летию Уфимского лесхозтехникума. Уфа: РИО РУНМЦ МО РБ; 2003. с. 174-88.
 45. Уразгильдин РВ, Сейдафаров РА. Водный режим листьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях промышленного загрязнения окружающей среды. Вестн Оренбургского гос ун-та. 2007;75:369-72.
 46. Хмелевская ИА. Эколого-физиологические исследования древесных пород в г. Пскове. Вестн Псковского гос педагогич ун-та Сер Естеств физ-мат науки. 2008;6:37-57.
 47. Цандекова ОЛ, Колмогорова ЕЮ. Особенности адаптационных перестроек хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях породного отвала угольного разреза «Кедровский». Вест Оренбургского гос ун-та. 2016;(6):81-5.
 48. Чернышенко ОВ. Древесные растения в экстремальных условиях города. В кн.: Экология, мониторинг и рациональное природопользование: научные труды. Вып. 307(1). М.: МГУЛ; 2001. с. 140-6.

49. Шлык АА. Развитие исследований метаболической гетерогенности фотосинтетических мембран. В кн.: Биосинтез и состояние хлорофиллов в растениях. Минск: Наука и техника; 1975. с. 104-60.
50. Шлык АА, Вальтер Г, Аверина НГ, Савченко ГЕ. Влияние кинетина на накопление и активность протохлорофиллида в зеленых и постэтиолированных листьях пшеницы. ДАН СССР. 1970;193(6):1429-32.
51. Шульгин ИА, Ходоренко ЛА. Формирование оптического аппарата зеленого листа в связи с энергетической адаптацией и солнечной радиацией. Науч докл высшей школы. 1969;(5):87-92.
52. Экологические проблемы урбанизированных территорий. Иркутск: Институт географии СО РАН; 1998.
53. Якушев БИ. Роль транспирации в газообмене листа. ДАН БССР. 1974;18(4):373-5.
8. Vasilyeva KA. [Ecological and biological features of maple (*Acer platanoides* L.) under conditions of technogenic contamination (dissertation)]. Ufa: IB UNTS RAN; 2011. (In Russ.)
9. Vasilov SP. [Possible ways of the negative influence of acid gases on plants]. Zhurnal Obshchey Biologii. 2003;64(2):146-59. (In Russ.)
10. Veretennikov AV. Fotosintez Drevesnykh Rasteniy. [Photosynthesis of Woody Plants]. Voronezh: Voronezhskiy Gosudarstvennyi Universitet; 1980. (In Russ.)
11. Gamaley YuV, Kulikov GV. Razvitiye Khlorenkhimiy Lista. [Development of Leaf Chlorenchyma]. Leningrad: Nauka; 1978. (In Russ.)
12. Getko NV. Rasteniya v Tekhnogennoy Srede: Struktura i Funktsiya Assimiliatsionnogo Apparata. [Plants in the Technogenic Environment: Structure and Function of the Assimilation Apparatus]. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1989. (In Russ.)

Общий список литературы/Reference List

1. Alekseyev AM. Vodnyi Rezhim Rasteniy i Vliyaniye Zasukhi na Nego. [The Water Regimen of Plants and the Effect of Drought on It]. Kazan: Tatgosizdat; 1948. (In Russ.)
2. Amineva KZ, Urazgildin RV, Kulagin AYU, Denisova AV. [Vegetation dynamics of water exchange of spruce, pine, and larch under anthropogenic pollution in cis-Urals]. Karelskiy Nauchnyy Zhurnal. 2016;5(1):81-6. (In Russ.)
3. Akhmadullin RSh. [Ecological and biological characteristics of willow (*Salix alba* L.) under conditions of Ufa Industrial Center (dissertation)]. Orenburg: GOU VPO OGPU; 2014. (In Russ.)
4. Akhmadullin RSh, Zaytsev GA. [Characteristics of white willow leaves transpiration under conditions of petrochemical contamination]. Izvestiya Saratovskogo Universiteta Seriya Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2013;13 Vypusk 2:53-6. (In Russ.)
5. Balandaykin ME. [Dynamics and differences in the concentration of basic photosynthetic pigments of birch leaves growing under heterogeneous conditions]. Khimiya Rastitelnoy Syrya. 2014;(1):159-64. (In Russ.)
6. Bukharina IL, Dvoyeglazova AA. Bioekologicheskiye Osobennosti Travianistykh i Drevesnykh Rasteniy v Gorodskikh Nsazhdeniyakh. [Bioecological Features of Herbaceous and Woody Plants in Urban Plantations]. Izhevsk: Udmurtskiy Universitet; 2010. (In Russ.)
7. Bukharina IL, Povarnitsina TM, Vedernikov KE. Ekologobiologichesskiye Osobennosti Drevesnykh Rasteniy v Urbanizirovannoy Srede. [Ecological and Biological Features of Woody Plants in an Urbanized Environment]. Izhevsk: FGOU VPO Izhevskaya GSKHA; 2007. (In Russ.)
13. Goryshina TK, Zabotina TN, Pruzhina YeG. [Plastid apparatus of herbaceous plants under different illumination conditions in forest-steppe oak grove]. Ekologiya. 1975;(5):15-22. (In Russ.)
14. Gusev NA. [The interdependence of some indicators of the water regime of plants and the influence of environmental conditions on it]. In: Vodnyy Rezhim Rasteniy v Svyazi s Obmenom Veshchestv i Produktivnostyu: Sbornik Nauchnykh Statey. Moscow: Izdatelstvo AN SSSR; 1963. P. 43-9. (In Russ.)
15. Dashkevich AP. [Water regime of [woody] plants under industrial pollution conditions in ore Altai]. In: Tezisy Dokladov Vsesoyuznogo Soveshchaniya «Aktualnye Zadachi Fiziologii i Biokhimii Rasteniy v Botanicheskikh Sadakh SSSR». Pushchino: GBS AN SSSR; 1984. P. 52. (In Russ.)
16. Dontsov AS, Suntsova LN, Inshakov YeM. [Assessment of the environmental conditions of Krasnoyarsk city by examining the state of the photosynthetic apparatus of Siberian spruce]. Khvoynye Borealnoy Zony. 2016;37(5-6):246-50. (In Russ.)
17. Zakman LM. [Seasonal changes in the content of plastid pigments in the leaves of local and introduced plants outside the Polar Circle]. Botanicheskii Xhurnal. 1969;54(8):1142-57. (In Russ.)
18. Ziyatdinova KZ, Urazgildin RV, Denisova AV. [Water exchange of oak leaves (*Quercus robur* L.) under conditions of anthropogenic environmental pollution]. Vestnik Chelyabinskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2013;7(2):181-4. (In Russ.)

19. Ivanchenko VM, Legenchenko BI, Kruchinina SS. [Water regimen and energy exchange of plants as related to their homeostasis]. In: Vodnyy Rezhim Rasteniy v Svyazi s Razlichnymi Ekologicheskimi Usloviyami. Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo Universiteta; 1978. P. 236-44. (In Russ.)
20. Ilkun GM. Gazoustoychivost Rasteriy. [Gas Resistance of Plants]. Kiev: Naukova Dumka; 1971. (In Russ.)
21. Ilkun GM. Zagriazniteli Atmosfery i Rasteniya. [Pollutants of Atmosphere and Plants]. Kiev: Naukova Dumka; 1978. (In Russ.)
22. Kaybiyaynen LK. [Macroscopic characteristics and statistical regularities of water exchange of pine census]. In: Problemy Fiziologii i Biokhimii Drevesnykh Rasteniy. Petrozavodsk: Karelskiy Filial AN SSSR; 1989. P. 50-1. (In Russ.)
23. Kostiuhenko RN. [Characteristics of the daily and seasonal transpiration of some representatives of the Salix genus]. In: Materialy Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Lesopolzovaniye, Ekologiya i Okhrana Lesov: Fundamentalnyye i Prikladnyye Aspekty». Tomsk: Izdatelstvo STT; 2005. P. 19. (In Russ.)
24. Kramer PD, Kozlovskiy TT. Fiziologiya Drevesnykh Rasteniy. [Physiology of Woody Plants]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1983. (In Russ.)
25. Kulagin YuZ. Drevesnye Rasteniya i Promyshlennaya Sreda. [Woody Plants and Industrial Environment]. Moscow: Nauka; 1974. (In Russ.)
26. Likholat YuV, Mytsik LP. [Assessment of the vital activity of plants of tree communities under the conditions of Industrial Cis-Dnieper using indicators of the water regimen]. In: Materialy Mezhdunarodnoy Nauchnoy Konferentsii «Vliyaniye Atmosfernogo Zagryazneniya i Drugikh Antropogennykh Faktorov na Destabilizatsiyu Sostoyaniya Lesov Tsentralnoy i Vostochnoy Yevropy». Moscow: MGUL; 1996. Vol. 1; P. 70-1. (In Russ.)
27. Maydebura IS. [The influence of pollution of the air basin of the Kaliningrad city on anatomical and morphological features and biochemical indicators of woody plants (dissertation)]. Kaliningrad: RGU Imeni I. Kanta; 2006. (In Russ.)
28. Matskov FF. [Recognition of living, dead and damaged chlorophyll-bearing tissues of plants using the reaction of pheophytin formation in assessing plant resistance to extreme impacts]. In: Metody Otsenki Ustoychivosti Rasteniy k Neblagopriyatnym Usloviyam Sredy. Leningrad: Kolos; 1976. P. 54-60. (In Russ.)
29. Mokronosov AT. [Photosynthetic function and integrity of plant organism]. In: 42-Ye Timiriyevskiy Chteniya. Moscow: Nauka; 1983. (In Russ.)
30. Neverova OA. [Some features of the physiological, biochemical and anatomical structure of the assimilation apparatus of birch under the conditions of anthropogenic pollution in Kemerovo city]. In: Tezisy Dokladov Vserossiyskoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Ekologicheskkiye i Meteorologicheskkiye Problemy Bolshikh Gorodov i Promyshlennykh Zon». Saint Petersburg: Izdatelstvo Rossiyskogo Gosudarstvennogo Gidrometeorologicheskogo Universiteta; 1999. P. 98-100. (In Russ.)
31. Nikolayevskiy VS. Ekologicheskaya Otsenka Zagriazneniya Sredy i Sostoyaniya Nazemnykh Ekosistem Metodami Fitoindikatsii. [Ecological Assessment of Environment Pollution and Terrestrial Ecosystems Condition using Phytoindication Methods]. Moscow: MGUL; 1998. (In Russ.)
32. Senkina SN. [Indicators of water exchange of *Picea obovata* (Pinaceae) needles under conditions of aerotechnogenic pollution (Komi Republic)]. Rastitelnyye Resursy. 2017;53(2):255-64. (In Russ.)
33. Sergeychik SA. Ustoychivost Drevesnykh Rasteniy v Tekhnogennoy Srede. [Resistance of Woody Plants in Technogenic Environment]. Minsk: Navuka i Tekhnika; 1994. (In Russ.)
34. Sidorovich YeA, Getko NV. Ustoychivost Introdutsirovannykh Rasteniy k Gazoobraznym Soyedineniyam Sery v Usloviyakh Belorussii. [Resistance of Introduced Plants to Gaseous Sulfur Compounds under Belarus Conditions]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1979. (In Russ.)
35. Silayeva AM. Struktura Khloroplastov I Faktory Sredy. [Chloroplasts Structure and Environmental Factors]. Kiev: Naukova Dumka; 1978. (In Russ.)
36. Sitnikova AS. Vliyaniye Promyshlennykh Zagriazneniy na Ustoychivost Rasteniy. [Effects of Industrial Contaminants on Plant Stability]. Alma-Ata: Nauka; 1990. (In Russ.)
37. Suntsova LN, Inshakov YeM, Kozik YeV. [Assessment of the state of the urban environment using phytoindication methodology (as exemplified with Krasnoyarsk city)]. Lesnoy Zhurnal. 2011;(4):29-32. (In Russ.)
38. Suslova VV, Nikolayevskiy BC. [Influence of acid gases on pigment composition of leaves of woody and lawn plants]. Uchenye Zapiski Permskogo Universiteta. 1971;256:93-132. (In Russ.)
39. Tarabrin VP. [Water regimen and resistance of woody plants to industrial pollution]. In: Gazoustoychivost Rasteniy: Sbornik Statey. Novosibirsk: Nauka; 1980. P. 18-29. (In Russ.)

40. Tarabrin VP. [Physiological and biochemical mechanisms of interaction of contaminants and plants]. In: Rasteniya i Promyshlennaya Sreda. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovskiy Gosudarstvennyy Universitet; 1990. P. 64-71. (In Russ.)
41. Tuzhilkina VV. [Responses of the pigment system of conifers to long-term aerotechnogenic contamination]. *Ekologiya*. 2009;(4):243-8. (In Russ.)
42. Tuzhilkina VV, Plusnina SN. [Comprehensive assessment of *Piceae obovata* (Pinaceae) needles under conditions of aerotechnogenic contamination]. *Rastitelnye Resursy*. 2014;50(4):579-86. (In Russ.)
43. Urazgildin RV, Amineva KZ, Zaytsev GA, Kulagin AYu, Yashin DA. [Comparative characteristics of oak (*Quercus robur* L.), lime (*Tilia cordata* Mill.) and birch (*Betula pendula* Roth) pigmentary complex formation under industrial pollution conditions]. *Karelskiy Nauchnyy Zhurnal*. 2016;5(1):90-4. (In Russ.)
44. Urazgildin RV, Kuzhleva NG. [Water regimen of poplar leaves under conditions of industrial pollution]. In: Sbornik Dokladov Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Lesnoye Obrazovaniye, Nauka i Khozyaystvo», Posvyashchennoy 125-letiyu Ufimskogo Leskhov-Tekhnikum. Ufa: RIO RUNMTS MO RB; 2003. P. 174-88. (In Russ.)
45. Urazgildin RV, Seydafariyov RA. [Water regimen of lime leaves (*Tilia cordata* Mill.) under conditions of industrial environmental pollution]. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2007;75:369-72. (In Russ.)
46. Khmelevskaya IA. [Ecological and physiological studies of tree species in Pskov city]. *Vestnik Pskovskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta Seriya Yestestvennyye i Fiziko-Matematicheskiye Nauki*. 2008;6:37-57. (In Russ.)
47. Tsandekova OL, Kolmogorova YeYu. [Characteristics of adaptation reformations of *Pinus sylvestris* L. needles under the conditions of the rock dump of the “Kedrovsky” coal mine]. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2016;(6):81-5. (In Russ.)
48. Chernyshenko OV. [Woody plants under extreme urban conditions]. In: *Ekologiya, Monitoring i Ratsionalnoye Prirodopolzovaniye: Nauchnye Trudy Vypusk 307(1)*. Moscow: MGUL; 2001. P. 140-6. (In Russ.)
49. Shlyk AA. [Development of studies of metabolic heterogeneity of photosynthetic membranes]. In: *Biosintez i Sostoyaniye Khlороfillov v Rastanii*. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1975. P. 104-60. (In Russ.)
50. Shlyk AA, Valter G, Averina NG, Savchenko GYe. [Effect of kinetin on the accumulation and activity of protochlorophyllide in green and post-etiolated wheat leaves]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1970;193(6):1429-32. (In Russ.)
51. Shulgin IA, Khodorenko LA. [Formation of the optical apparatus of green leaves in relation to energy adaptation and solar radiation]. *Nauchnye Doklady Vyshey Shkoly*. 1969;(5):87-92. (In Russ.)
52. *Ekologichskiy Problemy Usbanizirovannykh Territoriy*. [Ecological Problems of Urbanized Territories]. Irkutsk: Institut Geografii SO RAN; 1998. (In Russ.)
53. Yakushev BI. [Role of transpiration in leaf gas exchange]. *Doklady Akademii Nauk BSSR*. 1974;18(4):373-5. (In Russ.)
54. Agbaire PO. Air Pollution Tolerance Indices (APTI) of some plants around Erhoike-Kokori oil exploration site of Delta State, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences*. 2009;4:366-8.
55. Agbaire PO, Esiefarienrhe E. Air pollution tolerance indices (apti) of some plants around Otorogun Gas Plant in Delta State, Nigeria. *J Applied Sci Environ Management*. 2009;13(1):11-4.
56. Areington CA, Varghese B, Sershen N. The utility of biochemical, physiological and morphological biomarkers of leaf sulfate levels in establishing *Brachylaena discolor* leaves as a bioindicator of SO₂ pollution. *Plant Physiol Biochem*. 2017;118:295-305.
57. Burkhardt J, Kaiser H, Kappen L, Goldbach HE. The possible role of aerosols on stomatal conductivity for water vapour. *Basic Applied Ecology*. 2001;2:351-64.
58. Chapla J, Kamalakar JA. Metabolic responses of tropical trees to ozone pollution. *J Environ Biol*. 2004;(25):287-90.
59. 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.
60. Doudell RG, Dobge AD. The photosynthetic capacity of pea leaves with a controlled chlorophyll formation. *Planta*. 1970;94(4):282-90.
61. Duan J, Fu B, Kang H, Song Z, Wei A. Response of gas-exchange characteristics and chlorophyll fluorescence to acute sulfur dioxide exposure in landscape plants. *Ecotoxicol Environ Safety*. 2019;171(30):122-9.
62. Freer-Smith PH, Taylor G. Comparative evaluation of the effects of gaseous pollutants, acidic deposition and mineral deficiencies on gas exchange of trees. *Agricult Ecosyst Environ*. 1992;42(3-4):321-2.
63. Gao F, Calatayud V, Garcia-Breijo F, Reig-Armiñana J, Feng Z. Effects of elevated ozone on physio-

- logical, anatomical and ultrastructural characteristics of four common urban tree species in China. *Ecol Indicators*. 2016;67:367-79.
64. Gowin T, Goral I. Chlorophyll and pheophytin content in needles of different age of trees growing under conditions of chronic industrial pollution. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 1977;46(1):151-9.
 65. Joshi PC, Swami A. Air pollution induced changes in the photosynthetic pigments of selected plant species. *J Environ Biol*. 2009;(30):295-8.
 66. 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.
 67. 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.
 68. Klamerus-Iwan A, Błońska E, Lasota J, Waligórski P, Kalandyk A. Seasonal variability of leaf water capacity and wettability under the influence of pollution in different city zones. *Atmospheric Pollut Res*. 2018;9(3):455-63.
 69. Klotz IM. Protein hydration and behavior. *Science*. 1958;128:815-22.
 70. 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.
 71. Lamoreaux RJ, Chaney WR. Photosynthesis and transpiration of excised silver maple leaves exposed to cadmium and sulphur dioxide. *Environ Pollut*. 1978;17(4):259-68.
 72. 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 Transact Environ Develop*. 2008;4(1):24-32.
 73. Malhotra SS. Effects of sulfur dioxide on biochemical activity and ultrastructural organization of pine needles chloroplasts. *New Phytologist*. 1976;(2):239-45.
 74. Masuch G, Franz JT, Kettrup A. Histological and biochemical differences of slightly and severely injured spruce needles of two stands in northrhine Westphalia. *Environ Exper Botany*. 1992;32(2):163-82.
 75. Matysiak R. Content of carotenoids in needles of *Pinus sylvestris* L. growing in a polluted area. *Dendrobiology*. 2001;(46):39-42.
 76. 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.
 77. Meinzer FC, Clearwater MJ, Goldstein G. Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies. *Environ Exper Botany*. 2001;45:239-62.
 78. Mena-Petite A, Duñabeitia MK, Gonzalez-Moro B, Munoz-Rueda A, Lacuesta M. Sequential effects of acidic precipitation and drought on water relations of *Pinus radiata* seedlings. *J Plant Physiol*. 1999;155(1):93-100.
 79. Mikhailova TA, Afanasieva LV, Kalugina OV, Shergina OV, Taranenko EN. Changes in nutrition and pigment complex in pine (*Pinus sylvestris* L.) needles under technogenic pollution in Irkutsk region, Russian J Forest Res. 2017;22(6):386-92.
 80. Molnár VÉ, Tóthmérész B, Szabó S, Simon E. Pollution assessment in urban areas using air pollution tolerance index of tree species. *WIT Transact Ecol Environ*. 2018;230:367-74.
 81. More RS, Chaubal SS. Determination of stress and comparison by estimation of chlorophyll – a, b and carotenoid contents among plants growing along Mithi River, Mumbai. *Int J Sci Engineering Res*. 2017;8(1):1-8.
 82. Mukherjee A, Agrawal M. Use of GLM approach to assess the responses of tropical trees to urban air pollution in relation to leaf functional traits and tree characteristics. *Ecotoxicol Environl Safety*. 2018;152(15):42-54.
 83. Nosticzius A. Is it justified to relate the photosynthetic activity to the soluble protein? *Acta Agronom Acad Sci Hungaricae*. 1971;20(314):446-7.
 84. Paoletta E, Grulke NE. Does living in elevated CO₂ ameliorate tree response to ozone? A review on stomatal responses. *Environ Pollut*. 2005;137:483-93.
 85. Prajapati SK, Tripathi BD. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. *J Environ Quality*. 2008;37:865-70.
 86. Prusty BAK, Mishra PC, Azeez PA. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India. *Ecotoxicol Environ Safety*. 2005;60:228-35.
 87. Qadir SU, Raja V, Siddiqui WA. Morphological and biochemical changes in *Azadirachta indica* from coal combustion fly ash dumping site from a thermal power plant in Delhi, India. *Ecotoxicol Environ Safety*. 2016;129:320-8.
 88. Rostunov A, Konchina T, Zhestkova E, Gusev D, Kharitonov S. The Dependence of morphological and physiological indicators of the leaves of woody plants on the degree of technogenic pollution. In: *Environment. Technology. Resources. Proc 11th Internat Scientific and Practical Conference*. Vol. I. Latvia: Rezekne Academy of Technologies; 2017. P. 235-9.

ПЕРСПЕКТИВЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ

Р.М. Яковлев*, И.А. Обухова**

* Радиевый институт им. В.Г. Хлопина и ** Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: * Robertgood2019@gmail.com; ** IObukhova@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 30.11.2020; принята к печати 18.06.2021

Ядерная энергетика крупных масштабов может обеспечить почти все энергопотребление любых видов, то есть энергетическую безопасность не только России, но и всего человечества, но при этом создает целый ряд острых проблем. При этом такой путь для России является приоритетным. Росатом строит многие ядерные реакторы не только у себя, но и за рубежом при условии поставки для них ядерного топлива (ЯТ) с последующим возвратом в Россию отработанного ЯТ для переработки в уран-плутониевое МОКС-топливо. В г. Железногорске под Красноярском построена и действует первая очередь комбината по переработке 2000 тонн отработанного ЯТ в год. Главным стратегическим планом Росатома, который начал осуществляться, является развития атомной энергетики с замыканием ядерного топливного цикла при использовании реакторов на быстрых нейтронах для производства плутония, который может использоваться в ядерном оружии и наиболее опасен для биосферы. Аварии с выбросом высокой радиоактивности, которые нельзя исключить, становятся намного опаснее с плутониевым топливом. Высокозатратный атомный путь развития энергетики страны является опасным не только для России.

Ключевые слова: атомные электростанции, замыкание топливного цикла, отработанное ядерное топливо, реактор большой мощности канального типа, уран-плутониевый ядерный топливный цикл, торий-урановый ядерный топливный цикл, нераспространение ядерного оружия, уран-плутониевое смешанное оксидное топливо, реактор на быстрых нейтронах, жидкосольевой реактор.

PROSPECTS FOR NUCLEAR ENERGETICS IN SECURING THE ENERGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF RUSSIA

R.M. Yakovlev*, I.A. Obukhova**

*V.G. Khlopin Radium Institute and **Saint-Petersburg State Forest Technical University

Email: * Robertgood2019@gmail.com; ** IObukhova@inbox.ru

Large-scale nuclear energetics can satisfy demands for all kinds of energy, i.e. it can secure energy safety of Russia and the whole humankind; however, this is associated with a number of daunting problems. With that, this approach is a priority for Russia. The State Corporation RosAtom is involved in the development of nuclear reactors in Russia and abroad on the conditions that the reactors will be supplied with nuclear fuel from Russia and the spent fuel will be returned to Russia for conversion into mixed uranium and plutonium oxide (MOX) fuel. In the city Zheleznogorsk near Krasnoyarsk, the first production line of a plant for treating 2000 tons of spent nuclear fuel annually has been already launched. The principal strategic plan of RosAtom, which has been being realized currently, is to develop nuclear power production based on fuel recycling using fast neutron reactors for generation of plutonium, which may be used in nuclear weapons and is most hazardous for the biosphere. The possibility of accidents associated with radioactive discharges cannot be excluded, and the hazardousness of such accidents is increased by using plutonium-based fuels. The nuclear power-based approach to energy production is costly but also dangerous not only for Russia.

Keywords: nuclear power plants, nuclear fuel recycling, spent nuclear fuel, channel-type reactor, uranium-plutonium fuel cycle, thorium-uranium fuel cycle, nuclear weapons nonproliferation, MOX fuel, fast neutrons reactor, molten salt reactor.

Список сокращений:

АЭ	атомная энергетика
АЭС	атомные электростанции
ГХК	Горно-химический комбинат (г. Железногорск)
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент

ТЭС	тепловые электростанции
ВИЭ	возобновляемые источники энергии (без гидроэнергетики и биотоплива)
ВПК	военно-промышленный комплекс
КИУМ	коэффициент использования установленной мощности
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
МОКС	уран-плутониевое оксидное топливо, полученное из ОЯТ (от англ. Mixed Oxide, MOX)
ОЯТ	отработанное ядерное топливо
РАО	радиоактивные отходы
РБМК	реактор большой мощности канального типа (Чернобыльский)

Статья посвящается доброй памяти председателя петербургского отделения Пагуошского движения проф. М.Б. Игнатъева, ушедшего из жизни в 2019 году.

Введение

По словам академика А.П. Александрова, «ядерная энергетика крупных масштабов, обеспечивающая подавляющую часть энергопотребления всех видов, явится величайшим благом для человечества и разрешит целый ряд острых проблем» [1]. Эта цитата взята из изданного в 1977 году юбилейного сборника, авторский коллектив которого состоял из 90 ведущих представителей атомной науки и промышленности, включая 11 академиков РАН СССР и 6 главных организаторов промышленности. Но обернулась эта энергетика катастрофой. Через 9 лет на наиболее перспективном, по мнению авторов сборника, РБМК произошла крупнейшая в истории человечества техногенная авария с выбросом во внешнюю среду высокой радиоактивности и загрязнением ею значительной доли поверхности Земли. После этой катастрофы внимание общественности было привлечено ко многим другим авариям в атомной промышленности, и открылись серьезные проблемы атомной энергетики, которые делают ее распространение весьма опасным. Повторяемые руководителями атомного ведомства уверения в особой экологической чистоте и крайне низкой вероятности большой аварии звучат менее убедительно, чем заверения 44-летней давности. Ведь до аварий в Чернобыле и Фукусиме было далеко, а вера президенту АН СССР А.П. Александрову, трижды герою социалистического труда и члену ЦК КПСС, была велика. Атомная энергетика, производящая миллиарды кюри весьма опасных для биосферы и людей радиоактивных продуктов, в случае попадания части из них во внешнюю среду приводит к ее катастрофическому загрязнению и к сокращению площадей, пригодных для земледелия [9]. Напомним: при аварии на 4-м блоке Чернобыльской АЭС всего 5% выброса накопленной в активной зоне реактора активности оказалось достаточно, чтобы сделать непригодными для проживания 7 тысяч кв. км, и 350 тысяч людей были отселены. Значительно большие площади

с загрязнением более 15 Ки/км² признаны опасными для здоровья и для производства с/х продуктов [29, 30]. Последствия же фукусимской аварии для экологии и биосферы явно недооцениваются. В нашей предыдущей публикации [36] на основании данных из статьи [20] был сделан вывод, что общий выброс радиоактивности в Японии от четырех реакторов, где расплавилось топливо, на порядок ниже, чем в Чернобыле. Но это, как выяснилось позже, не совсем так. Общее загрязнение непосредственно территории Японии действительно на порядок ниже. Но были большие выбросы в атмосферу в восточном направлении, один из которых, повернув к югу, чуть не накрыл Токио, а также происходило и происходит просачивание в океан воды, которой охлаждали и продолжают охлаждать разрушенные и разогреваемые остаточным тепловыделением активные зоны реакторов, загрязняя Тихий океан. Академик Е.П. Велихов в интервью для программы «Проект 2035»¹ отмечал: «Авария на этой электростанции спровоцировала самое масштабное в истории радиоактивное загрязнение природы». Радиоактивность от Фукусимы, Чернобыля и захоронения ядерных отходов влияет на окружающую среду, воздействует на почву и может привести к самым неожиданным последствиям. Предложения отказаться от атомной энергии в современном виде и перейти к более безопасной ториевой энергетике неоднократно публиковались [24, 31–33] и высказывались в Петербургском отделении Пагуошского комитета по нераспространению ядерного оружия, председателем которого был проф. М.Б. Игнатъев. Особое внимание при этом уделялось возможности того, что в рамках существующей уран-плутониевой энергетике может распространяться основная составляющая ядерного оружия – плутоний. Наибольшую опасность представляет не крупная авария на реакторе, а война с применением ядерного оружия [35–37].

¹ <http://2035.media/2017/12/22/velikhov-interview/>

Ядерное оружие и его опасность для жизни на Земле

Режим нераспространения не будет устойчивым, пока растет число государств, обладающих требующими самого деликатного обращения технологиями ядерного топливного цикла и способных произвести ядерное оружие при первой необходимости.

В США в министерстве обороны была подготовлена и издана комиссией по атомной энергии в 1962 году книга «The effects of nuclear weapons», в которой приведены данные о действии атомного оружия, полученные в результате теоретических исследований и практических испытаний, а также на основании изучения последствий взрывов атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки. В 1965 году перевод с английского появился в СССР [6]. После ознакомления с этой книгой любой разумный человек поймет ужас ядерной войны. Напомним: при воздушном взрыве бомбы, эквивалентной 10 мегатоннам тринитротолуола, на расстоянии 9,4 км от эпицентра разрушаются здания с бетонными стенами и на расстоянии 13,9 км все многоквартирные кирпичные с несущими стенами ([6], табл. 12.21 на с. 621). Велика опасность от образующихся при взрыве радиоактивных продуктов. На с. 451–453 приведена уникальная информация о радиоактивном заражении на Маршалловых островах в результате испытательного взрыва «Браво», произведенного у атолла Бикини 1 марта 1954 года. Общая мощность взрыва соответствовала 15 мегатоннам. В результате взрыва возникло сильное заражение района вдоль направления ветра протяженностью более 530 км и шириной около 100 км. На полосе длиной 260 и шириной 50 км вдоль направления ветра измеренная за 96 часов доза превышала 700 рентген и была смертельно опасна. При другом взрыве неожиданно очень высокая доза была зарегистрирована на атолле Ронгелап. На северо-западной оконечности атолла в 160 км от эпицентра взрыва суммарная доза за 96 часов после начала выпадения радиоактивных продуктов составила 3300 рентген. Мы привели всего два эпизода из книги, в которой 680 страниц весьма интересного текста с многими фотоснимками (в том числе и многих японцев после Хиросимы), схемами и диаграммами, чтобы читатель проникся ужасом войны ядерной. Ведь не очень большой ядерный взрыв (1–2 мегатонны тротилового эквивалента) уничтожает большой город, например Нью-Йорк или Петербург, а хвост радиоактивный убивает окрестности. В ядерной войне подвергаются смертельной опасности не только объекты бомбардировок.

В 1970-х и 1980-х годах в США под руководством К. Сагана [38] и в СССР под руководством акад. Н.Н. Моисеева [2, 15] были выполнены расчеты, которые показали, что помимо локального разрушения и высокого уровня радиоактивного загрязнения ядерная война между США и СССР приведет к гибели жизни

на Земле. Мы приводим здесь довольно длинную цитату из работы [14], чтобы напомнить, насколько большую опасность заключает в себе ядерное оружие:

«Даже если в ядерной войне будет использовано всего лишь 100–150 мегатонн ядерного горючего, но оно будет распределено надлежащим образом по основным городам Европы, Азии и Америки, то эти города также сгорят в огненных вихрях. В результате образуются облака сажи такого размера, что “ядерная зима” все равно наступит. Только закончится она не через год, а через несколько месяцев. Но и это достаточный срок, чтобы покончить с жизнью Человека на Земле. А что такое 100–150 мегатонн? Это количество ядерного оружия немногим превышает то, которое носят на себе атомные подводные лодки. Такие числа дают представления о том, над краем какой бездны сейчас оказалось человечество. Результаты этих расчетов подтвердили гипотезу и дали первые количественные оценки эффекта ядерной зимы».

Атомные реакторы, устройства по обогащению урана его делящимся изотопом ураном-235, выделение плутония из облученного топлива напрямую перешли из ВПК и используются в мирной атомной энергетике. В любой стране, где появляется атомный реактор, а также специалисты, обученные ядерной физике и радиохимии в тех странах, которые для них реакторы построили, открывается возможность при использовании давно опубликованных технологий получить сначала ядерную взрывчатку и при ее наличии без особых проблем перейти к атомной бомбе. Это и произошло сначала в Израиле, а затем в ЮАР, Индии, Пакистане, а затем уже в КНДР при помощи специалистов из тех стран, которые создали ядерное оружие. И только лишь в ЮАР при смене политического режима отказались от атомного оружия и ликвидировали все военные ядерные разработки.

Прямое ядерное столкновение между Россией и США вместе со странами НАТО исключены ввиду неизбежного ответного удара, что означает применение большого количества ядерного оружия и гибель всего человечества. Но любой острый конфликт между государствами, создавшими у себя, несмотря на запреты, ядерное оружие, может явиться запуском большой ядерной войны с втягиванием в конфликт других государств, обладающих им. В этой войне не может быть не только победителей и побежденных, но даже нейтральных. Причем роковым может оказаться даже и сравнительно небольшой ядерный конфликт. Значит, приобщение каждой новой страны к ядерным арсеналам увеличивает угрозу не только для ее потенциальных противников, но и для всего мира. Сейчас значительно расширяется география размещения атомных станций по всему миру, и многие реакторы строит Россия. Расширение географии увеличивает опасность создания ядерного оружия и его примене-

ния со стороны тех стран, руководители которых могут попытаться использовать его для уничтожения ненавистного противника.

При поставке же МОКС-топлива в зарубежные реакторы извлечь из него несколько килограмм плутония для ядерного заряда не представит особых проблем. Взрывное устройство с высоким КПД создать сложно, но если из 10 кг во время взрыва разделится хотя бы 1 г, то это эквивалентно взрыву 18 тонн тринитротолуола, а расплывшийся остальной плутоний (9999 г) нанесет непоправимый урон стране, где произошел взрыв. Опасность, которую может принести простое распыление только одного топливного элемента МОКС-топлива, содержащего всего 200 г плутония, было исследовано в работе [11]. В статье [36] мы привели итоговую таблицу по данным из указанной работы, чтобы показать, какую высокую опасность здоровью тысяч жителей несет распыление в городе свежего МОКС-топлива от всего лишь одного ТВЭЛ: число избыточных смертей от рака превысит 300.

Атомная энергетика России: ее статус и перспективы

*«Светлое будущее наступит не от белых ночей,
а от атомных станций».*

Е.А. Решетников, вице-президент ЗАО «Атомстройпроект», 2008 год [19]

Из-за глобального кризиса и сокращения многих энергоемких отраслей промышленного производства нужда в росте внутреннего потребления энергии в Российской Федерации отсутствует [17, 39]. Почти половина добываемых ресурсов уходит на экспорт, и, согласно новой стратегии развития энергетики до 2035 года, потребление ресурсов в РФ к 2035 году уменьшится на 2,5%, а вот экспорт возрастет на 15,2%². Экономика страны остается сырьевой, и это понятно, поскольку, как отмечено в стратегии, **доля топливно-энергетического комплекса в структуре доходов федерального бюджета – около 40%, а в российском экспорте (в стоимостном выражении) – более половины, при том, что доля занятых в отраслях топливно-энергетического комплекса составляет менее 4% общей численности населения, занятого в экономике.** То есть продажа невозможного природного богатства России во много раз выгоднее любой другой деятельности. Дополнительные установленные мощности, в том числе и электрические, в такой экономике не требуются.

Посмотрим по отчетам Министерства энергетики³, в какой мере действующие электростанции обеспечива-

ют сейчас Россию электроэнергией. На конец 2020 года общая установленная мощность электростанций ЕЭС России составила 245313,25 МВт. Выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России в 2020 году составила 1047,03 млрд кВт·ч. Потребление электроэнергии в 2020 году составило 1033,72 млрд кВт·ч. Относительная выработка электроэнергии составила: ТЭС – 59,3%; АЭС – 20,6%; ГЭС – 20,1%⁴.

Видно, что основную роль в электроснабжении играют ТЭС. Эти же станции вносят весьма существенный вклад в теплоснабжение. По итогам 2016 года объем производства тепловой энергии в РФ составил 1284 млн Гкал, причем 46,5% этого объема было произведено котельными, и 45,9% произвели ТЭС. Таким образом на ТЭС произведено 589,36 млн Гкал или 683,6 млрд кВт·час (1 ккал = $1,163 \times 10^{-3}$ кВт·ч), что даже больше произведенной на этих станциях электрической энергии (621 млрд кВт·ч). В нашей северной стране было бы очень неосмотрительно заменять ТЭС атомными или ветровыми станциями из-за того, что, хотя тепловые производят парниковые газы, они производят тепло, в отличие от гидростанций и атомных и ветровых станций. В стратегии развития их доля (60%) в производстве электроэнергии сохраняется. Новый министр энергетики Н.Г. Шульгин в интервью журналу «Энергетическая политика» 14 мая 2021 года сказал, что не надо спешить расставаться с углеводородами, надо наравне с традиционными видами энергетики развивать ВИЭ, и что надо учесть опыт прошедшей зимы, когда на фоне сильных морозов возник всплеск спроса на традиционные виды топлива. Рассчитывать только на солнце и ветер без новых развитых систем накопления энергии не стоит, и поэтому необходимо постоянно содержать резерв традиционной генерации и запасы традиционных видов топлива⁵.

В отчете Министерства энергетики за 2020 год приведена следующая информация о загрузке электростанций разного типа. Число часов использования установленной мощности электростанций в целом по ЕЭС России в 2020 году составило 4238 часов, или 48,25% календарного времени (коэффициент использования установленной мощности – КИУМ). При этом число часов использования установленной мощности без учета электростанций промышленных предприятий составляет (в скобках – КИУМ): у тепловых электростанций – 3361 (41,34%); у атомных электростанций – 7156 (81,47%); у гидроэлектростанций – 4157 (47,33%); у ветровых электростанций – 2413 (27,47%); у солнечных электростанций – 1324 часов (15,08%). Видно, что ТЭС и ГЭС работали с большой недогрузкой. Резервы мощности электрических станций на час прохождения годового максимума потребления

² Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf>

³ <https://minenergo.gov.ru/node/7573>

⁴ <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic>

⁵ <https://minenergo.gov.ru/node/20686>

мощности ЭЭС России также велики и составили в 2020 году 45,7 ГВт.

При столь большом резерве неиспользованной традиционной энергии увеличивать число электростанций не имеет смысла, и в новой стратегии до 2035 года установленная мощность практически сохраняется. Решение задач электроэнергетики потребует поддержания установленной мощности электростанций в энергосистемах в период до 2024 года на уровне 254 ГВт, а в период до 2035 года – в диапазоне 251–264 ГВт.

В атомной энергетике установленная мощность всех АЭС в 2018 году составляла 30,3 ГВт. Выработка электрической энергии атомными электростанциями в период с 2008 по 2018 год увеличилась на 25%. Начиная с 2008 года введены в эксплуатацию энергоблоки № 2, 3 и 4 Ростовской атомной электростанции, энергоблок № 4 Калининской атомной электростанции, энергоблок № 4 Белоярской атомной электростанции, энергоблоки № 1 и 2 Нововоронежской атомной электростанции-2 и энергоблок № 1 Ленинградской атомной электростанции-2. Продолжалось строительство других энергоблоков атомных электростанций с реакторами большой мощности, в том числе энергоблока № 2 Ленинградской атомной электростанции-2 и энергоблоков № 1 и 2 Курской атомной электростанции-2.

Установленная мощность АЭС до 2035 года останется практически той же самой. Будут сооружены новые реакторы общей мощностью 13 ГВт, но за это же время будут выведены из эксплуатации энергоблоки общей мощностью 12,9 ГВт, и доля 20% в производстве электроэнергии сохранится⁶. В стратегии развития отмечено отдельно, что на АЭС России доля блоков 3-го поколения, которая в 2018 году составляла 13%, к 2024 году составит 26%; к 2035 году – 40%. Это, безусловно, сделает АЭ более безопасной, особенно при снятии с эксплуатации блоков РБМК Чернобыльского типа, проектный срок эксплуатации которых давно истек. Несомненно, важным и полезным для страны явится строительство нескольких больших атомных ледоколов.

Отметим также, что запасы (разведанные и извлекаемые) урана России, приведенные в таблице «В» на с. 19 Белой книги ядерной энергетики [3], составляют 9000 ГВт×год, и при установленной мощности 30 ГВт этих запасов хватит при спокойном дожигании в достаточно безопасных тепловых легководных реакторах третьего и затем еще более безопасных реакторах следующих поколений на 300 лет, а если установленная мощность возрастет до 45 ГВт, то разведанных на 2001 год запасов урана хватит на 200 лет. Если учесть, что после 2001 года в самой России (в Забайкалье) и

⁶ <http://www.innov-rosatom.ru/upload/medialibrary/90a/2.%20%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%20%D0%93%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD.pdf>

Казахстане разведаны новые месторождения урана, то число лет можно удвоить или утроить.

Необходимость в значительном увеличении парка реакторов не предвидится в нашей стране и в последующие годы. К 2050 году Росатом планирует повысить установленную мощность всего на 8 ГВт, что увеличит долю в генерации электроэнергии от 20 до 22%. В России не требуется в ближайшие два десятилетия увеличение установленной мощности атомных станций из-за отсутствия потребности и большой недозагруженности гидро- и теплоэлектростанций.

Но зато Росатом строит много реакторов в других государствах. С 2008 года Росатом принимает активное участие в строительстве атомных электростанций за рубежом (энергоблоки № 1 и 2 атомной электростанции Куданкулам в Республике Индии, энергоблоки № 3 и 4 атомной электростанции Тяньвань в Китайской Народной Республике), а сейчас еще и подписаны соглашения о строительстве большого числа иностранных реакторов. **Россия сейчас заключила контракты на сооружение 36 атомных реакторов за рубежом** и сооружает реакторы в Турции, Иране, Китае, Египте, Индии, Вьетнаме, Бангладеш, Финляндии, Венгрии, Беларуси, Узбекистане. В 2018 году АО «Концерн Росэнергоатом» выполнил работы по контракту на оказание услуг по оценке и развитию ядерной инфраструктуры Республики Замбии; подписан трехлетний контракт на оказание услуг по развитию ядерной инфраструктуры Боливии.

Как отмечено в предыдущем разделе, в любой стране, где появляются атомные реакторы, появляется и плутоний. Технологии выделения плутония из ОЯТ давно опубликованы, и извлечь его в нужном количестве для взрывного устройства всегда возможно. То есть, когда появляется в стране ядерный реактор, открывается возможность получить основную составляющую атомной бомбы – плутоний. Мы не будем далее обсуждать эту вполне очевидную опасность. Пускай этим занимаются эксперты из МАГАТЭ, находящиеся в Вене, столице государства, где нет ни одного реактора, но считающие большим благом для человечества распространение, при содействии МАГАТЭ, мирной атомной энергии по всей планете.

Наши атомщики при зарубежном строительстве оказываются занятыми. Все было бы хорошо, если бы только не собирались они по договорам привозить назад в Россию, как и во времена СССР из стран СЭВ, радиоактивное отработанное ядерное топливо. Для жителей страны и ее биосферы сооружение зарубежных реакторов и снабжение их ядерным топливом не принесет вреда без возврата ОЯТ, правда, запасы урана для нас становятся меньше, но это как с газом-нефтью.

Строительство АЭС за рубежом не является чем-то исключительным. При согласовании с МАГАТЭ строили за рубежом реакторы компании разных стран (из

США, Англии, Франции, Германии, Японии, Южной Кореи и Китая). В странах Восточной Европы с 1960 по 1986 год при помощи СССР были построены АЭС в основном с реакторами типа ВВЭР-440 для многих стран СЭВ. Ядерное топливо для них поставлялось из СССР, и затем ОЯТ после нескольких лет выдержки возвращалось снова в СССР для переработки на предприятии «Маяк», где оно частично использовалось для изготовления ядерного топлива реакторов РБМК. В Англию и Францию также привозилось на комбинаты для переработки ОЯТ от реакторов, которые были построены английскими и французскими компаниями.

В те времена атомная энергетика была на подъеме, и предполагалось, что к началу нашего века будет построено несколько тысяч атомных реакторов, для которых резервы делящегося изотопа урана-235 (относительная доля его в уране 0,7) очень быстро будут исчерпаны. Выход из этой ситуации казался очевидным и простым, поскольку уже в 1960-х годах были сделаны теоретические и экспериментальные разработки, из которых следовало, что можно поделить весь уран, если превратить неделиющийся изотоп уран-238 в плутоний-239. При сжигании всего урана ресурсы возрастают в 150 раз. Тогда в России при установленной мощности не 45 ГВт, а 1200 ГВт это означает замену не только других источников электрической энергии, но и всех источников потребляемой энергии на атомные. Действительно, общая энергия, полученная от АЭС при установленной мощности 1200 ГВт (КИУМ = 0,7), за год составит 7358 млрд кВт·ч. Это величина всей употребленной в РФ энергии в 2001 году. То есть остальные источники энергии не нужны, и можно продавать на экспорт не половину добытых в стране газа, нефти и угля, а все. Эта весьма завлекательная для руководства страны информация приведена в той же таблице из Белой книги [3], на которую мы ссылались выше. Там же отмечено, что запасов урана хватит при увеличенной мощности на 1300 лет. Но для этого нужно замыкать ядерный топливный цикл, перерабатывать все ядерное топливо после облучения и строить реакторы на быстрых нейтронах, в которых рождается больше нейтронов и коэффициент воспроизводства топлива для которых значительно выше, чем для легководных реакторов.

Для обеспечения автономной работы только одного реактора на быстрых нейтронах электрической мощности 1 ГВт требуется не менее **20 тонн плутония** с учетом, кроме необходимого количества для загрузки активной зоны реактора (выгорает не более 10%), еще и последующей выдержки, переработки и изготовления новых топливных элементов. Автономный режим с переработкой топлива с плутонием необходим, чтобы избежать перевозки высокоактивного топлива на большие расстояния. При запуске одного нового

реактора на быстрых нейтронах необходимый плутоний предполагалось получать из отработанного топлива реакторов на тепловых нейтронах. В 1 тонне облученного урана в топливе содержится 10 кг плутония, в нем делящихся изотопов плутония-239 – 5,53 кг и плутония-241 – 1,47 кг. Чтобы получить 20 тонн плутония, потребуется переработать более 2800 тонн ОЯТ, которые образуются в 28,5 активных зонах реактора ВВЭР после трех лет облучения в них топлива (в 79,6 тоннах ОЯТ реактора ВВЭР-1000 после трех лет облучения содержится 700 кг плутония, в котором 500 кг делящихся изотопов плутония). До 2800 тонн ОЯТ содержится в 40 активных зонах реактора после облучения каждой по три года. ОЯТ становится ценным сырьем для получения плутония быстрых реакторов, которых предполагали поставить по свету несколько тысяч, причем первые несколько сотен загрузить плутонием из ОЯТ тепловых реакторов. **Если строить и запускать в автономном режиме быстрые реакторы, тогда и только тогда ОЯТ легководных реакторов становится не опасными отходами, а ценным сырьем, которое надо перерабатывать.**

Но интенсивного развития атомной энергетики, как предполагалось в прежнем стратегическом плане 2008 года и отмечено в начале этого раздела, не произошло. Построен только один реактор БН-800 на быстрых нейтронах, в новой стратегии развития энергетике не намечено появление большого числа их в ближайшие десятилетия. Извлеченный плутоний становится **очень опасным продуктом, требующим особых условий хранения и охраны.** Использовать его в тепловых реакторах довольно сложно, поскольку они не рассчитаны на загрузку плутонием. Только в небольшой части тепловых реакторов его можно применить, да и то только при загрузке не более чем третьей части ТВЭЛов. Нарботка его без реальных быстрых реакторов является не просто бесполезной, но и очень опасной затеей, однако не для Росатома. И вот почему. Только необходимостью наработки плутония из ОЯТ для большого числа быстрых реакторов, в которые его должны загрузить, можно обосновать запланированное во многих договорах Росатома возвращение в Россию очень радиоактивного материала, каковым является ОЯТ, и, тем более, его переработку с целью замыкания непонятно чего и в чем.

Опасность для России и других стран возникает безо всяких злоумышленников, причем весьма большая, из-за огромного количества радиоактивности, которое содержится в ОЯТ от реакторов, возводимых Росатомом на территории иностранных государств, и будет перевозиться в хранилище в Железногорск в количестве 80 тонн от каждого реактора после трех лет облучения в реакторе. Дальнейшая информация взята из справочника [7] для реактора ВВЭР-1000 при загрузке в него 79,6 тонны оксида урана с 4,4% урана-235. Ра-

диоактивность одной тонны топлива после облучения составляет сразу после его останова $9,61 \times 10^{18}$ Бк, это 260 млн Ки в одной тонне, и после трех лет хранения в приреакторной зоне радиоактивность снижается в 230 раз и составляет $4,14 \times 10^{16}$ Бк = 1,12 млн Ки. Далее снижение активности происходит медленно, только через 10 лет ее становится в два раза меньше. После трех лет ОЯТ можно перевозить в специальных контейнерах. Это обычно так и делают. Поскольку при задержке распадается делящийся изотоп плутоний-241. В 79,6 тонны активность топлива составляет 80 млн Ки. Это трехлетняя наработка, и в год от 36 реакторов будет нарабатываться в среднем 960 тонн высокоактивных радиоактивных продуктов с общей активностью 960 млн Ки. Если бы эти тонны и Кюри оставались в странах, где будут установлены реакторы, то все было бы нормально. Но, насколько нам известно, во многих договорах поставлено условие как поставки ядерного топлива для сооружаемых Росатомом реакторов, так и возвращения ОЯТ после некоторой выдержки. Печально, если это произойдет, и лучше бы отказаться от этого условия. Но в нашей стране очень давно прорабатывается и уже начал осуществляться опасный вариант с замыканием ядерного топливного цикла. Именно этим и оправдывают руководители Росатома возвращение в страну ОЯТ зарубежных реакторов, называя его ценным сырьем для большой ядерной энергетики с замыканием ядерного топливного цикла, с многими быстрыми реакторами и переработкой всего ядерного топлива. Представители Росатома пытаются убедить руководителей страны и общественность в благотворности и полной безопасности перехода всей страны на очень безопасную и чистую при малом количестве отходов ядерную энергетику, не производящую парниковых газов, причем при замене атомной энергией других энергетических мощностей можно сократить потребление углеводородов и угля в России и увеличить их экспорт. На колоссальное количество необходимой переработки очень радиоактивных продуктов, которые при этом возникают, и на опасность плутония, являющегося основным сырьевым продуктом в замыкании ядерного топливного цикла, внимание не заостряется.

Поскольку в запуске новых энергетических мощностей, в том числе и атомных, в РФ нет потребности, и атомная энергетика вполне обеспечена сырьем на столетия при существующем числе атомных реакторов, и рост их числа после 2050 года может быть незначительны, нет никаких объективных оснований увеличивать многократно ресурсы урана и для этого запускать программу замыкания ядерного топливного цикла для сжигания всего урана через плутоний.

Тем не менее, программа запущена, и для ее осуществления выделено значительное финансирование. Недалеко от Красноярска на ГХК уже осуществляется

переработка очень радиоактивного ядерного топлива с высоким содержанием плутония реактора БН-800 и изготовление из него МОКС-топлива, которое перевозится обратно в г. Заречный для повторного использования в том же реакторе. На ГХК создано грандиозное сухое хранилище для приемки отработанного ядерного топлива своих реакторов и иностранных, которые Росатом построил и собирается строить за рубежом с целью последующей переработки ОЯТ от своих и зарубежных легководных реакторов для получения уран-плутониевого оксидного МОКС-топлива.

Атомная энергетика с замыканием уран-плутониевого цикла считается приоритетной. На Белоярской АЭС кроме действующего реактора БН-800 предполагается установить еще два реактора на быстрых нейтронах БН-1200 с натриевым охлаждением.

Также предполагается разработать и изготовить опытные образцы реакторов на быстрых нейтронах с охлаждением расплавом свинца (БРЕСТ-300) и свинца-висмута (СВБР). Научным руководителем этого направления, названного «Прорывом»⁷, является бывший глава атомного ведомства Е.О. Адамов. Работы в этом направлении вряд ли приведут к успеху, поскольку свинец растворяет любой металл (именно поэтому он и используется при сварке), а висмут и основной изотоп свинца Pb-208, при захвате нейтрона становясь Bi-209, являются источником, проникающим через любые щели радиоактивного полония-210. Поэтому казавшиеся сначала весьма перспективными свинцово-висмутовые реакторы, разработанные для подводных лодок, после нескольких аварий были отменены.

Тем не менее, на территории Сибирского химического комбината при осуществлении программы «Прорыв» возводится опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК), состоящий из энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и замыкающего ядерный топливный цикл пристанционного завода, который включает в себя модуль переработки облученного смешанного уран-плутониевого нитридного топлива и модуль фабрикации/рефабрикации для изготовления стартовых ТВЭЛов из привозных материалов, а впоследствии ТВЭЛов из переработанного облученного ядерного топлива.

На проект «Прорыв» выделены весьма значительные средства. Проект открывается такими словами: «Реализуемый Госкорпорацией Росатом проект «Прорыв» нацелен на достижение нового качества ядерной энергетики, разработку, создание и промышленную реализацию замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) на базе реакторов на быстрых нейтронах, развивающих крупномасштабную ядерную энергетику. В реализации проекта участвуют более 30 организаций».

⁷ Проект «Прорыв» <http://proryv2020.ru/o-proekte/>

Как и 44 года назад, декларируется и утверждает-ся руководителями атомного ведомства, а за ними руководством государства, что к жителям России и тех стран, где Росатом сооружает реакторы за счет России, на долгий срок (при замыкании затем уран-плутониевого ядерного цикла – на многие тысячелетия) придет **самая безопасная, чистая и дешевая энергия.**

До обсуждения особой опасности, которую несет в себе плутоний, отметим весьма важную и необходимую особенность процесса замыкания ядерного топливного цикла: это необходимость перевода ОЯТ в жидкое состояние и последующей переработки с целью извлечения нужных продуктов. При этом миллион Кюри оставшихся радиоактивных продуктов деления в 1 тонне ОЯТ после трех лет хранения расщепляются от первичного объема 0,1 м³ к следующим объемам: высокоактивные – 45 м³, среднеактивные – 200 м³, низкоактивные – 2000 м³, с общей активностью 1 миллион Ки. С учетом первоначального объема отработавшего топлива в 0,1 м³ на тонну процесс «переработки» увеличивает объем только высокоактивных отходов в 450 раз. Понятно, что при таком увеличении объемов изолировать их значительно сложнее, чем ОЯТ в контейнере. Средне- и низкоактивные радиоактивные отходы в процессе переработки топлива сбрасывались в США, Англии и Франции в море-океан, загрязняя биосферу Земли, а в России сбрасывались и до сих пор сбрасываются в оз. Карачай и в систему р. Теча.

А теперь перейдем к элементу, ради которого и осуществляется переработка топлива, – к плутонию, наиболее опасному для биосферы, в первую очередь для людей. Попадая в организм человека, плутоний становится постоянным источником альфа-излучения и вызывает костные опухоли, рак печени и лейкемию и таким образом является опасным канцерогеном [22]. Как отмечено [4, 5], плутоний, попав в организм, накапливается в костях и печени. Особенно хорошо он удерживается в костях и практически не удаляется и поэтому принадлежит к разряду наиболее токсичных веществ. Попадание 100 мкг в легкие гарантирует развитие рака легких, а размещение всего 1,4 мкг в костях может привести к раку костной ткани. Плутоний опасен при попадании во внешнюю среду и для других организмов, накапливаясь в них. Так, для водорослей коэффициент накопления составляет от 1000 до 9000, для планктона – 2300, для желудка рыб – 5900. Наземные растения усваивают плутоний через корневую систему и накапливают до 0,01% к своей массе. Это означает, что в 1 кг картофеля или моркови может оказаться 10 мг плутония.

Атомная энергетика с уран-плутониевым твердым топливом, в котором накапливается колоссальная радиоактивность и которое предполагается все пере-

рабатывать, производя затем МОКС-топливо, является весьма опасной для экологии даже без крупных аварий, которые никак нельзя исключить и которые все-таки происходят, вопреки уверениям в их невозможности, поступающих от руководителей атомного ведомства и от части ученых-атомщиков. Вероятность таких аварий значительно увеличивается при росте в мире террористической активности и возникающей возможности удара неядерным оружием по АЭС или хранилищу с ОЯТ. Последствия катастрофичны. Особенно высокая опасность развития атомной энергетики для человечества возникает при замыкании ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах и с необходимой переработкой ядерного топлива, содержащего высокую концентрацию плутония, часть которого неизбежно попадет в биосферу. В недавней публикации группы ученых во главе с акад. Е.П. Велиховым⁸ отмечено, что даже при весьма низком (и вряд ли достижимом) уровне потерь при переработке ОЯТ 0,1% произойдет следующее: *«В безвозвратные отходы будут поступать не только нестабильные продукты деления, но и тяжелые изотопы топливного цикла – уран, плутоний и др. За 100 лет работы предприятий по переработке ОЯТ ВВЭР в безвозвратных потерях будет накоплено около 10% плутония, выделяемого при годовой переработке. В ОЯТ ВВЭР содержится всего около 1,2% плутония. В том случае, когда переработке будет подвергнуто ОЯТ из активной зоны быстрых реакторов, в котором содержание плутония около 15%, количество плутония в безвозвратных потерях за время работы реактора будет составлять более 150% от его количества, выделенного при годовой переработке. По мере работы ядерной энергетической системы только за счет безвозвратных потерь будут вне контроля накоплены тонны плутония и большое количество радиоактивных изотопов».* Как отмечают авторы, уже при переработке топлива существующих легководных реакторов возникает тревожная для экологии ситуация: только два изотопа – Cs-137 и Sr-90 – обеспечивают возрастание радиационного фона, по сравнению с создаваемым природным ураном, почти в 300 раз. А в случае плутония при многократной переработке топлива быстрых реакторов опасность для экологии и людей многократно возрастает.

Нужно учесть еще и следующее. Состав плутония в активной зоне реактора после нескольких загрузок уже не годен, поскольку в нем возникают неделящиеся четные изотопы плутония. Его надо обогащать или оружейным плутонием из запасов, или плутонием из зоны воспроизводства, где имеется обедненный уран-238, в котором будет образовываться плутоний-239, который отдельно из нескольких тонн урана-238 следует извлечь, добавляя в топливо активной зоны. Для замыкания ядерного ци-

⁸ http://vant.iterru.ru/vant_2021_1/1.pdf

кла с вовлечением всего урана зона воспроизводства совершенно необходима. Поэтому **в зоне воспроизводства «мирных» быстрых реакторов будет происходить весьма эффективная наработка плутония оружейного качества (обогащение по изотопу ^{239}Pu до 93,5%) с его раздельным выделением.** Чтобы такой плутоний не уходил на изготовление оружия, за всеми реакторами на быстрых нейтронах необходимо установить строгий международный контроль, который не всегда эффективен.

Ставка на атомную энергетику как на основной источник энергии, особенно в варианте замыкания энергетического цикла с быстрыми реакторами и необходимой переработкой топлива с высоким содержанием плутония при каждом из них, является опасной для всей биосферы, а особенно для той страны, где эта переработка будет осуществляться, поскольку неизбежны потери при переработке, а исключить возможность как аварий, как и терактов можно только на бумаге.

Вариант значительно более безопасного развития атомной энергетики с использованием уран-ториевого топливного цикла с жидкосолевыми реакторами, который рассмотрен в ряде публикаций [10, 31–33], не удалось осуществить, поскольку средств на него творческий коллектив получить не смог. Безопасность такого типа реактора для внешней среды обусловлена тем, что в случае жидкого топлива при медленной циркуляции топлива в пределах активной зоны самого реактора из него будут удаляться все летучие продукты. Поэтому, даже если в реактор попадет бомба или снаряд, из топлива во внешнюю среду почти ничего не уйдет. Это во-первых. А во-вторых, в любых менее критичных ситуациях топливо может быть слито частично или полностью и рассредоточено по емкостям, содержащим поглощающие нейтроны вещества, например бор или кадмий, что полностью исключит возможность ядерного взрыва. В-третьих, отсутствие в топливе плутония и трансураниевых элементов делает реактор такого типа более безопасным для экологии и создает меньше проблем для окончательного захоронения топлива. Более подробную информацию о уран-ториевых ЖСР и схему реактора небольшой мощности можно найти в статье [31].

От неосуществленных возможностей возвращаемся к действительности.

В России атомная энергетика остается ведущей отраслью при высоком бюджетном финансировании, в том числе и строительства реакторов за рубежом, несмотря на:

- 1) проблему нераспространения ядерного оружия;
- 2) исключительно высокий уровень опасности для биосферы при крупных авариях с разрушением ак-

тивной зоны реактора или хранилища ОЯТ, особенно с МОКС-топливом;

3) проблему с накоплением огромного количества очень радиоактивных продуктов, которые хранить надо, охлаждая многие сотни лет, а переработка опасна для биосферы в связи с неминуемыми потерями многократно увеличенных объемов радиоактивных продуктов⁹;

4) дороговизну (больше 7 млрд долларов за ГВт установленной мощности АЭС) и высокие расходы на хранение ОЯТ и РАО, что приводит к высокой себестоимости получаемой электроэнергии по сравнению с другими источниками (мы покажем это в следующем разделе), а также

5) нерешенные проблемы при снятии с эксплуатации, реабилитации территории и захоронения радиоактивных отходов.

Сейчас необходимость интенсивного развития атомной энергетики руководители атомного ведомства и заинтересованные в продолжении финансирования сотрудники обосновывают следующими аргументами. Во-первых (как 50 лет назад), это ограниченность и сравнительно быстрое исчерпание запасов нефти и газа в мире и высокое загрязнение биосферы при сжигании угля. Но сейчас этот аргумент звучит странно. Исчерпание природных ресурсов и дефицит энергии не угрожает человечеству. Запасы нефти и газа с учетом колоссальных резервов, находящихся в шельфовой зоне и особенно в сланцевых породах, весьма велики. Этих запасов хватит более чем на 2000 лет. Интересно, что и самих запасов природной нефти может быть значительно больше, если справедлива гипотеза о том, что значительная часть нефти (если не основная) имеет неорганическую природу и непрерывно возникает от выходящего из центра земли водорода при прохождении его через углеродсодержащие породы. Да и сам водород при его улавливании может использоваться как самое экологичное топливо. Это что касается топливной составляющей мировой энергетики. Если же добавить к топливной составляющей уже освоенную во многих странах энергию возобновляемых источников, то энергетическая безопасность человечества с лихвой обеспечена без уран-плутониевой атомной энергетики, весьма опасной для людей и биосферы. Поэтому многократно повторяемые руководителями Росатома заявления о безальтернативности атомной энергетики для обеспечения энергетической безопасности страны и человечества звучат все менее убедительно, особенно при учете альтернативных источников энергии.

Главную опасность для человечества представляет не недостаток энергообеспечения, а **катастрофическое загрязнение внешней среды и сокращение**

⁹ <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7480>

площадей, пригодных для земледелия, в результате интенсивной индустриализации, в которой активную роль играет и атомная энергетика. Этот фактор может привести к сокращению численности населения до 500 млн к 2075 году и последующему медленному восстановлению погубленной цивилизацией природы и увеличением населения Земли до той оптимальной величины 1,4–1,7 млрд, которую может выдержать природа Земли, не разрушаясь в случае бережного к ней отношения [8, 13, 21, 23, 25, 26].

Поэтому первый аргумент, обосновывающий необходимость развития опасной атомной энергетике из-за истощения природных ресурсов и якобы из-за отсутствия других безопасных, надежных источников энергии, а также из-за предсказываемого сокращения численности населения, оказывается несостоятельным.

Спасительная ситуация для обоснования развития атомной энергетике возникла при развернувшейся борьбе с потеплением. Вторым и главным сейчас аргументом, обосновывающим необходимость строить много АЭС и развивать атомную энергетике, стало утверждение, что только эта энергетика спасет человечество от катастрофического потепления, обусловленного сжиганием слишком большого количества органического топлива. Да, действительно, атомная энергетика не производит парниковых газов. Заменить энергетике, основанную на сжигании органического топлива, атомной энергией предлагается не только в производстве электроэнергии, но и для транспорта, делая его электрическим, а также производя на АЭС водород в замену органики. Этот аргумент находит поддержку у растущего числа борцов с потеплением. Ввиду его важности для обоснования необходимости и широкого внедрения атомной энергетике оценим степень его обоснованности.

Академик Р.И. Нигматуллин, научный руководитель Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова, на основании исследования предыдущих эпох изменения уровня океана показал, что основной причиной этого изменения уровня океана является Солнце, количество тепла от которого периодически меняется, приводя к изменению температуры на поверхности Земли, меняя соотношение воды в ледниках и в океане, и соответственно к изменению его уровня [18]. Содержание же CO_2 в атмосфере напрямую связано с температурой воды в мировом океане, поскольку его находится в 100 раз больше, чем в воздухе, а половина растворена в воде в количестве, определяемом температурой воды. Сейчас уровень мирового океана незначительно увеличивается в связи с большей активностью Солнца и общим потеплением, приводящим к выделению углекислого газа из морской воды. Деятельность же человека по сравнению с этим процессом мало изменяет равновесное содержание этого газа

в атмосфере. Сейчас активность процессов на Солнце начинает уменьшаться и, если будет сжигаться даже значительно больше органического топлива, то это не приведет к компенсации наметившегося похолодания, близкого к ледниковому периоду.

Такой же точки зрения придерживался и один из ведущих специалистов в области геофизики А.П. Капица. В интервью Дж. Молдованову¹⁰ он заявлял: «Уже много лет бывший президент Академии наук США Фредерик Зейтц (Seitz) обращал внимание на то, что все теории глобального потепления и озоновых дыр притянуты за уши и не отвечают действительности, что это – антинаучные теории. 17 тысяч американских ученых подписали петицию. Они согласны с Зейтцем и считают, что соглашение и стоящие за ним тенденции – подлинная угроза человечеству и тяжелый удар по его будущему».

Проф. А. Городницкий в статье «Конец мифа о глобальном потеплении» пишет: «Британские специалисты пришли к выводу, что уже через 10–15 лет на нашей планете наступит новое глобальное похолодание. Свои выводы ученые сделали на основе математической модели процессов, которые сегодня происходят на Солнце»¹¹.

Анализ ситуации с потеплением был проведен в ряде работ [27, 28] сотрудников Арктического и Антарктического НИИ Росгидромета под руководством член-корр. РАН И.Е. Фролова. В этих работах были рассмотрены характерные особенности изменений климата Арктики и некоторых других регионов Земли с масштабами от десятилетий до столетий. Данные наблюдений позволили выявить полициклический характер климатических изменений, произошедших с конца XIX до начала XXI века. В Арктике наибольшую амплитуду имели 60-летние циклы, с которыми связано чередование теплых и холодных эпох. Аналогичные циклы обнаружены и в других регионах планеты. Возможной их причиной являются изменения полной энергии, поступающей к Земле от Солнца, включая энергию солнечной активности. На основе выполненной учеными реконструкции изменений этой энергии, а также фактических и восстановленных данных о температуре воздуха в Арктике и в Северном полушарии показано, что климатические изменения рассмотренных масштабов вызываются естественными причинами. **Основными причинами климатических изменений являются естественные внешние факторы – колебания общего количества энергии Солнца вследствие изменений расстояния до него от Земли, а также солнечной активности.** Повышение концентрации в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения в изменениях

¹⁰ <http://www.vestnik.com/issues/98/1013/win/moldav.htm>.

¹¹ <https://newizv.ru/comment/aleksandr-gorodnitskiy/10-02-2017/251901-konec-mifa-o-globalnom-poteplenii>

климата Земли играет дополнительную роль. Интересно, что на основании параллельных измерений в Антарктиде было установлено, что при сокращении ледового покрова в Гренландии в противофазе увеличивается ледяной покров Антарктиды, так что ожидать всемирного потопа не надо. Антарктида не тает, а в ней 90% льда.

За последние годы число ученых, отвергающих решающее значение «парниковой теории» в объяснении климатических изменений, заметно увеличилось.

Мы посчитали необходимым изложить альтернативное мнение **специалистов по климату** относительно «теории глобального катастрофического потепления, обусловленного парниковыми газами», поскольку именно эта теория, популяризованная нобелевским лауреатом А. Гором, поддерживается многими получившими крупные гранты влиятельными учеными, а также активистами, включая такого нобелевского лауреата, как Грета Тунберг. В нашей стране она поддерживается руководителями Росатома [19] и солидарными с ними учеными в обоснование замены вредной тепловой энергетики.

Если бы все-таки потепление и происходило именно из-за накопления техногенного CO_2 в атмосфере, Россия все равно не спасет человечество от тепловой катастрофы даже при максимальном сокращении традиционных источников тепловой энергии, замененных атомной энергией. Добываемые газ и нефть при этом в огромных количествах продаются для сжигания тем странам, которые считают после Чернобыльской и Японской атомных катастроф уровень опасности от АЭС для населения своих стран слишком высоким. Россия ту же Германию обеспечивает газом и нефтью, спасая от возможных последствий атомной катастрофы. Отметим также, что во всем мире, особенно в США и Китае, продолжают сжигать огромные объемы угля в электротепловых станциях, в котельных и в металлургии, а число автомашин во всем мире растет, и нефть сжигается в возрастающих количествах.

Мы подробно обсудили выше опасность для биосферы от производства плутония на АЭС. Эта опасность для России становится особенно высокой в связи с доставкой в хранилище под Красноярском ОЯТ не только от своих реакторов, но и от построенных и строящихся Росатомом за рубежом с целью последующей переработки ОЯТ для получения МОКС-топлива для тепловых и быстрых реакторов с высоким содержанием в топливе плутония, переработка которого уже начала производиться на ГХК для реактора БН-800 Белоярской АЭС.

Однако атомная энергетика в простом варианте сохранения установленной мощности с заменой реакторов первых поколений более надежными и при строительстве атомных ледоколов и танкеров без замыкания ядерного топливного цикла с переработкой большого

количества ядерного топлива, без возвращения ОЯТ зарубежных реакторов, безопасна для всей биосферы и особенно для жителей нашей страны [34], ее и надо продолжать.

Отметим в конце этого раздела, что помимо риска для экологии существует риск для экономики: при строительстве иностранных АЭС в кредит от России с надеждой возместить расходы через 15–20 лет после строительства АЭС за счет продажи электроэнергии возможность потерять все велика, поскольку, случись **в любом месте мира атомная катастрофа с выбросом радиоактивности во внешнюю среду**, мировое сообщество призовет закрыть всю атомную энергетику. И придется либо ее закрыть, либо стать изгоем, умножив санкции, и при этом наверняка потерять все построенное за рубежом.

Энергетика мира и доля в ней атомной энергии и ВИЭ

В мировой энергетике атомная начала интенсивно развиваться с 1970-х годов. Комиссия по экономии энергии и энергоресурсов (Conservation Commission) мировой энергетической конференции (МИРЭЖ) в 1978 году подготовила доклад, основанный на результатах совместных исследований ряда национальных компаний и организаций Запада с привлечением ведущих экспертов разных стран из обобщенных этой Комиссией. Перевод и издание этого обширного доклада (256 с.) на русском языке с предисловием Почетного вице-председателя исполкома МИРЕК академика М.А. Стыриковича был осуществлен в СССР в 1980 году [16]. Развитие атомной энергетики было объявлено приоритетным. Доля атомной энергетики в производстве электроэнергии в 1975 году была около 4%. Большинство прогнозов электропотребления исходило из того, что основная доля в обеспечении электроэнергией будет покрываться за счет атомной энергии. Доля электроэнергии, вырабатываемой в мире на базе атомной энергии, могло составить 45% к 2000 году и 60–65% – к 2020 году, а значения установленной мощности АЭС в мире составят к 2020 году 5000 ГВт, из этого количества 2225 ГВт будет установлено в странах-членах ОЭСР, 1850 ГВт – в странах с плановой системой экономики (СССР и Восточная Европа), 925 ГВт – в развивающихся странах. Авторами доклада были изучены пять сценариев развития атомной энергетики. В докладе основным является вариант, в котором первоначально используются легководные реакторы с постепенным вводом в эксплуатацию реакторов-размножителей на быстрых нейтронах с временем удвоения топлива, равным 24 годам. Начало широкой эксплуатации реакторов-размножителей предполагалось в США в 1993 году, в Западной Европе – в 1987, в Японии – в 2000 и в СССР – в 1995 году. В этом сценарии атомная энергетика обес-

печена ядерным топливом на долгие времена. По этому сценарию и двинулось развитие атомной энергетики. Такие грандиозные планы предусматривали к 2020 году 5000 ГВт ядерной энергии, объявленной самой безопасной и чистой. Но сейчас, в 2020 году, установленная мощность всех АЭС меньше 400 ГВт. А энергетический реактор-размножитель на быстрых нейтронах только один промышленный, на Белоярской АЭС мощностью 800 МВт (реактор БН-600 на Белоярской АЭС переведен в статус опытного, а в Китае с помощью России работает еще один – опытный на 600 МВт, все остальные в мире небольшие экспериментальные). Не была развита атомная энергетика в предполагаемых масштабах, поскольку не оказалась безопасной и чистой.

В США в 1979 году произошла ничтожная по своим последствиям, при сравнении с Чернобыльской, авария на Трехмильном острове с частичным расплавлением ядерного топлива и попаданием во внешнюю среду сравнительно небольшого количества радиоактивных продуктов. Большую аварию удалось предотвратить. **Но сама возможность такой аварии, которая чуть не произошла, обозначила огромную опасность атомных реакторов.** Решением президента Картера было прекращено уже начатое строительство 28 атомных реакторов того типа, на котором произошла авария. Начатое строительство другой части реакторов было завершено, но после 1979 года и до 2012 года ни одной лицензии на строительство АЭС в США не было выдано. Намеченное интенсивное развитие атомной энергетики в США было остановлено. Сейчас в США 94 реактора и строится всего 2. Средний возраст реакторов уже превысил 40 лет. Держится сейчас вся атомная энергетика США только благодаря продлению срока эксплуатации сверх заложенных в конструкторских проектах 30 лет, сначала до 45, затем до 60, а сейчас до 80 лет, что не делает атомную энергетику более безопасной, особенно с учетом все возрастающего количества весьма опасных радиоактивных отходов в переполненных хранилищах при АЭС. Построенное весьма дорогое централизованное хранилище радиоактивных отходов Yucca Mountain в США не удалось задействовать из-за невозможности гарантировать его безопасность в течение долгих столетий. В сентябре 2017 года Минэнерго США оценивало будущие затраты на реализацию проекта «Yucca Mountain» как 27,2 миллиарда долларов. Однако политическая поддержка возобновления финансирования «Yucca Mountain» отсутствует. Практически на каждой площадке АЭС в США организовано промежуточное сухое хранилище ОЯТ, в которых находится огромное количество весьма опасных радиоактивных продуктов¹². Мы отметили ситуацию с облученным ядерным топливом в США, стране с наибольшим

¹² <https://www.atomic-energy.ru/SMI/2019/04/25/94321>.

количеством атомных реакторов и наибольшим количеством ОЯТ, судьбу которого не удастся решить несмотря на высокое финансирование. От переработки ядерного топлива в США отказались в связи с дорогостоящей получаемого из него топлива и большим количеством радиоактивных отходов, часть которых неизбежно попадает во внешнюю среду.

Огромную опасность переработки большого количества ядерного топлива для всей биосферы, особенно при переработке ОЯТ с высоким содержанием плутония для реакторов на быстрых нейтронах, мы отметили выше при обсуждении ситуации в России.

После Чернобыльской катастрофы решение прекратить использование АЭС принято в Германии, Италии, Швейцарии, Португалии, хотя у них нет природных запасов нефти и газа. Этим они исключают атомные аварии для народов своих стран. Проблемой для этих стран остается ликвидация ядерного наследия и необходимость финансирования этих работ. После Фукусимской катастрофы **были остановлены все реакторы в Японии**, и из 54 сейчас перезапущены только 10. В то же время после Чернобыля все реакторы, в том числе и Чернобыльского типа, продолжали работать, включая три оставшихся РБМК в Чернобыле.

С быстрыми реакторами для сжигания всего урана при замыкании ядерного топливного цикла дела в мире обстояли так. После ряда аварий при эксплуатации первых реакторов на быстрых нейтронах в Германии, Франции, США и Японии строительство промышленных реакторов-размножителей во всех странах, кроме России, было прекращено. В 2020 году работают только два реактора на быстрых нейтронах, это БН-800 на Белоярской АЭС и опытный БН-600, построенный Россией в Китае. Кроме того, предполагается установить на Белоярской АЭС еще два реактора на быстрых нейтронах. Для реакторов на быстрых нейтронах требуется топливо с более высоким содержанием в нем плутония (15–20%), и для его получения были созданы комбинаты по выделению плутония из ОЯТ тепловых реакторов, самые большие в Англии и Франции. В мире на них было наработано 250 тонн реакторного плутония. Но из-за отсутствия реакторов на быстрых нейтронах все это топливо лежит мертвым грузом на комбинатах, поскольку использование этого плутония в реакторах на медленных нейтронах не только экономически неэффективно, но и опасно. Весьма незначительное количество его применяли некоторое время во Франции (на трети реакторах при третьей части загрузки в активную зону). Сейчас с этим плутонием неизвестно что делать. Попытка использовать этот плутоний в реакторах Японии оказалась неудачной и закончилась выплатой высокого штрафа компанией БНФЛ.

В мировом производстве электроэнергии доля атомной составляет 11%, а в общем производстве энер-

гии доля в два раза меньше. Как следует из многочисленных прогнозов (итоговый анализ этих прогнозов проведен А.М. Мастепановым [12]), в 2050 году доля атомной в мировом производстве энергии останется такой же: 5–7%, а если исключить интенсивно развивающийся Китай, то эта доля уменьшится на треть.

Проф. Б.И. Нигматуллин, один из ведущих независимых аналитиков, долгое время проработавший в руководстве атомной промышленностью, провел обстоятельный анализ перспектив развития различных источников электроэнергии до 2050 года. Приведенная им оценка прогноза развития атомной энергетики практически совпадает с оценкой из Китая, которую он приводит. В базисном варианте, как следует из его анализа, мощность всех АЭС во всем мире увеличится от 383 в 2015 году до 456 ГВт в 2050 году и составит 6,6% всей энергетики в 2050 году; при этом, как это следует из прогноза китайских ученых, число станций Китая увеличится от 41 до 243. Отсюда следует, что если исключить Китай, во всем остальном мире мощность АЭС в 2015 году была $383 - 41 = 342$ ГВт, а в 2050-м она будет всего $456 - 246 = 210$ ГВт, то есть **мощность всех АЭС без Китая уменьшится на 38% (это с учетом закрытия АЭС, выработавших свой 60-летний срок)** [17].

В 2020 году приоритетным является развитие другой, экологически чистой возобновляемой энергии Солнца и ветра, и в нее инвестируется на порядок больше средств. Атомная энергетика во всех странах держится только на значительном продлении времени работы реакторов сверх запроектированного, что безусловно увеличивает опасность их эксплуатации. Без этого продления атомная энергетика прекратила бы свое существование через 10 лет (средний возраст всех реакторов в мире превысил 30 проектных лет). Атомные реакторы не строят сейчас не только из-за их высокой потенциальной опасности, но и потому, что себестоимость производимой на них энергии уже несколько лет назад значительно выше, чем от других источников, что видно из приводимых ниже табл. 1 и 2.

Табл. 1

Средняя себестоимость производства электроэнергии в долларах за 1 МВт·ч для различных строящихся источников*

Ресурс	2009 год	2014 год	2017 год
Ядерная энергетика	110	115	135 (+22%)
Газ, комбинированный цикл	75	65	60 (-20%)
Ветровая энергетика	130	50	40 (-69%)
Солнечная энергетика	350	80	50 (-86%)

* По данным регулярно публикуемых отчетов аналитика М. Шнайдера (Mycle Schneider)¹³.

¹³ <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2018-v2-lr.pdf>

Стоимость единичной мощности на больших промышленных ВИЭ уже давно значительно меньше, чем ядерная, даже с учетом непостоянства их работы. Приведенные в таблице цифры являются усредненными, и, поскольку основной вклад в производство энергии обеспечивают большие ВИЭ, включенные в единую сеть, то в тех странах, где ВИЭ получили развитие, средняя себестоимость определяется ими.

Без учета капитальных затрат себестоимость становится существенно меньше, но тем самым продлеваются сроки эксплуатации, что является очень опасным.

Кроме того, и время строительства АЭС намного больше (атомная – 8–10 лет; газовая комбинированного цикла – 0,5–1 год, солнечные и ветровые – 1–2 месяца), особенно при учете времени согласования сооружения атомных реакторов с администрацией и общественностью. Приводимые сейчас в отечественной научной литературе для оправдания необходимости развития атомной высокие оценки себестоимости ветровой и солнечной энергетики имеют десятилетнюю давность. Кроме того, высокую себестоимость имеют источники небольшой мощности, которые сейчас, наконец, все-таки начали производиться в России. Интересно, что и Росатом в этом участвует.

Табл. 2

Средняя стоимость энергетических ресурсов (\$ США/МВт)¹⁴

Ресурс	Стоимость	
	Полная	Без учета капитальных затрат
Солнечные кристаллические фотоэлектрические системы	31–42	
Солнечные фотоэлектрические панели	28–38	
Ветровая энергия	26–54	
Ядерная энергия	129–198	29
Уголь	65–159	41
Комбинированный газовый цикл	44–73	28

Кроме Китая, Индии и России атомная энергетика с учетом указанных выше проблем постепенно свертывается. Во всем мире инвестиции в нее уже давно значительно ниже, чем в экологически чистые возобновляемые источники энергии, что видно в табл. 3

¹⁴ LCOE-2021. <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2020/>

Табл. 3

Инвестиции в мире в различные отрасли энергетики (источник: см. табл. 1)

Отрасль энергетики	Млрд \$ в год		
	2009 год	2014 год	2017 год
Ядерная	40	25	20
Ветровая	80	110	110
Солнечная	60	150	160

Поскольку инвесторы склонны делать вложения по тем направлениям, которые могут обеспечить отдачу от вложений при наименьших затратах через короткий промежуток времени, то естественно, желание вкладываться в атомную энергетику с ее высокой себестоимостью отсутствует. Здесь существенным является длительное время строительства, которое для АЭС значительно больше (8–10 лет), чем для сооружения электростанции на газе, которое составляет полгода-год, и еще скорее при сооружении энергоблоков, использующих энергию Солнца. Время строительства атомных станций может еще затянуться после возможных крупных аварий на любой из них, последствия которых приостанавливают или отменяют вообще уже начатое строительство. Поэтому риск потерять деньги, вложенные в строительство АЭС, весьма велик. Как отмечено выше, после сравнительно небольшой аварии на АЭС в США было прекращено уже начатое строительство 28 реакторов. После Чернобыльской катастрофы во многих странах мира было прекращено строительство многих АЭС. В результате развернутого антиядерного движения и в России было остановлено строительство АЭС в Горьком и Ростове, в Крыму, Башкирии, Татарстане.

Атомные электростанции сейчас наиболее интенсивно строят Китай и Россия, причем не только в своих странах. Китай не обладает большими запасами нефти и газа, уголь слишком загрязняет биосферу, а гидроэнергия не только на больших реках, но и на малых почти исчерпана. Поэтому при осуществлении программы интенсивного экономического роста с обеспечением в максимально короткие сроки более высокого уровня жизни для своих граждан, Китай вынужден использовать опасную атомную энергию. Интересно, что стоимость строительства китайских АЭС и сроки строительства в два раза меньше российских. Но приоритетом и для Китая является строительство электростанций с использованием энергии Солнца и ветра, инвестиции в них значительно выше, чем в атомную энергетику, производство электроэнергии на ветре превышает с 2011 года производства на АЭС, что видно из табл. 4.

Табл. 4

Произведенная за год энергия (ТВт·ч) на АЭС и ВИЭ в Китае

Отрасль энергетики	2009 год	2014 год	2017 год
Ядерная	66	124	233
Ветровая	28	156	286
Солнечная	4	30	108

Строительство возобновляемых источников энергии является приоритетным сейчас во всем мире по самым разным прогнозам. Итоговые результаты этих прогнозов проанализированы и приведены в работе [12].

Заключение

Россия обладает самыми большими запасами органического топлива. Особенно велики запасы природного газа. Для нашей северной страны весьма важным является то, что только на ТЭС при сжигании газа и угля получается, причем в количестве не меньшем, чем полезная электрическая энергия, дополнительная тепловая энергия. Поэтому заменить их на атомные, не производящие парниковых газов, но производящие в огромном количестве радиоактивные продукты, более опасные для биосферы и здоровья людей, означает еще и сократить в стране потребление парового отопления и горячей воды.

Неиспользованные гидроресурсы в России одни из самых больших. Во всем мире в последнее десятилетие получили исключительно высокое развитие нетрадиционные экологически чистые возобновляемые источники энергии, которые практически совсем не используются в России, хотя энергетические резервы энергии ветра, геотермальной энергии и приливной энергии моря самые большие. Но благодаря мощному лоббированию представителями всего атомного сектора, частью которого является мирная атомная энергетика, именно эта энергетика избрана для обеспечения энергетической безопасности России на долгие времена. Россия строит многие атомные реакторы не только у себя, но и за рубежом при условии поставки для них ЯТ с последующим возвратом в Россию ОЯТ для переработки в опасное МОКС-топливо. Стратегия Росатома развития АЭ с замыканием ядерного топливного цикла при использовании реакторов на быстрых нейтронах увеличивает опасность для биосферы многократно из-за более высокого содержания в ЯТ плутония и необходимости частой переработки ОЯТ, которую предполагают проводить рядом с реактором. Высокозатратный атомный путь развития энергетики страны является опасным, и не только для России, а ее лишает возможности финансировать и потому со-

вершенствовать и развивать все другие области энергетики, которые сейчас осваиваются во всем мире, и это при том, что запасы традиционных источников самые большие, а резервы альтернативных возобновляемых экологически чистых источников энергии неисчерпаемы.

Аргументы, которыми пытаются обосновать необходимость инвестиций в развитие весьма опасной и дорогой атомной энергетики, являются при анализе недостаточными.

Безусловно, и при создании ториевых реакторов атомная энергетика становится значительно более безопасной при текущем использовании. Но при широкомасштабном ее развитии в варианте основного производителя энергии создает в итоге такое же количество радиоактивных продуктов при делении, как и существующая энергетика. Да и, по правде говоря, уран-233 и особенно уран-232 не такие безопасные, как уран-238. Поэтому большая ядерная энергетика и в уран-ториевом варианте тоже не является безопасной для человечества и биосферы.

А вот использование жидкосолевых уран-ториевых реакторов для ледоколов, больших контейнерных и подводных судов, а также создание небольших мегаваттных автономных на 30 лет источников энергии для труднодоступных мест по побережью Северного Ледовитого океана, в Восточной Сибири или в Антарктиде было бы вполне уместно, с окончательной консервацией радиоактивных продуктов в застывшей и рассредоточенной солевой композиции [10]. Для освоения космоса такие источники были бы тоже полезны. 1000 таких мегаваттных источников создадут в итоге такое же количество радиоактивных продуктов, как и одна АЭС мощностью 1 ГВт, причем на порядки более безопасных для длительного хранения из-за отсутствия плутония и актинидов.

Может быть, в России, как уже почти во всех странах, возьмется всерьез использовать самые большие на Земле ресурсы ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ? Резервы России самые большие и по энергии ветра, и по приливной энергии океана, и по геотермальной энергии.

Благоприятные перспективы использования солнечной энергии есть на Северном Кавказе, в Нижнем Поволжье и в Забайкалье, то есть в районах, где в году много ясных солнечных дней. Самые ветряные районы расположены вдоль береговой линии Северного Ледовитого океана и в Калининградской области. На Кольском полуострове, в Кислой губе, есть небольшая электростанция, работающая на энергии морских приливов и отливов, начатое же давно строительство большой Мезенской приливной станции из-за от-

сутствия финансирования практически прекращено. Большие возможности для строительства такого рода электрических станций имеются на побережье Охотского моря, где приливы достигают 18 метров.

Источники геотермальной энергии есть в сейсмически активных зонах Земли. В России это Камчатка (в долине гейзеров работает только одна небольшая электростанция) и одна на Курильских островах.

Но основное внимание и средства направлены на атомную энергетiku, альтернативы которой, как заявляют руководители атомного ведомства, – НЕТ.

И это заявляется, когда в 2017 году 157 ГВт возобновляемых источников энергии, добавленных к мировым электрическим сетям, по сравнению с 143 ГВт, добавленными в предыдущем году, представляют собой самый большой рост в истории. Увеличение составило более 61% чистого прироста мировых генерирующих мощностей. Ветровая энергетика добавила 52 ГВт и солнечная – рекордные 97 ГВт. Эти цифры можно сравнить с увеличением на 3,3 ГВт для ядерной энергетики в том же году¹⁴.

Уровень ВИЭ в России в 2016 году по сравнению со среднемировым (13,6%) – только 1%, в том числе 0,6% – биомасса, 0,3% – малые ГЭС, и всего **0,1% – ветряная и солнечная электроэнергетика и геотермальные источники**. И это при том, что страна обладает крупнейшими запасами чистой для биосферы и людей энергии.

Правда, энергия, получаемая от Солнца и ветра, непостоянна и мелкомасштабна по сравнению с атомной. Но этот недостаток во многом нивелируется при включении их в единую электрическую сеть, что осуществляется, например, в США, Германии и Китае. Большие надежды при развитии энергетики с использованием ветра и Солнца возлагаются на создание дешевых аккумуляторов большой емкости, тогда и отдельные источники этой энергетики могли бы работать непрерывно.

Резервы ВИЭ России настолько велики, что ими без ущерба для себя можно и поделиться. Вдобавок к отмеченным выше источникам огромны запасы приливной энергетики у океанских берегов России. Так, более 30 лет назад в Ленинградском политехническом институте (ныне Политехнический университет им. Петра Великого) был создан эскизный проект Пенжинской **приливной** электростанции на Охотском море мощностью 90 млрд Ватт (среднесуточная 40 ГВт). Сейчас этот проект реанимирован¹⁵. Напомним, что 40 ГВт – это мощность, превышающая мощность всех атомных электростанций России, которая сейчас равна 30 ГВт.

¹⁵ <https://www.rbc.ru/business/12/07/2021/60ec4ab99a7947fca921f1eb>

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Александров АП и соавт. Атомная наука и техника в СССР. М.: Атомиздат; 1977.
2. Александров ВВ, Стенчиков ГИ. Об одном вычислительном эксперименте, моделирующем климатические последствия ядерной войны. Журн вычисл мат физ. 1984;24(1):140-4.
3. Адамов ЕО, Большов ЛА, Ганев ИХ и соавт. Белая книга ядерной энергетики. М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ; 2001.
4. Булдаков ЛА. Радиоактивные вещества и человек. М.: Энергоатомиздат; 1990.
5. Василенко ИЯ. Токсикология продуктов ядерного деления. М.: Медицина; 1999.
6. Действие ядерного оружия. М.: Воениздат; 1965. http://elib.biblioatom.ru/text/deystviyadernogo-oruzhiya_1965/go,0/
7. Колобашкин ВМ и соавт. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. М.: Энергоатомиздат; 1983.
8. Кондратьев КЯ, Крапивин ВФ, Савиных ВП. Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. М.: Логос; 2003.
9. Кривоулицкий ДА и соавт. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Гидрометеоздат; 1967.
10. Кузякин ЮИ, Яковлев РМ. Транспортная жидкосолевая реакторная установка. В кн.: Сборник докладов научно-технической конференции «Корабельная ядерная энергетика – взгляд в XXI век». Нижний Новгород: ОКБМ; 2001.
11. Магилл И, Хэмилтон Д, Лютценкирхен К, Туфан М, Тамборини Г, Вагнер В, Берту В, фон Цвайдорф А. Последствия события радиологического рассеивания с ядерными и радиоактивными источниками. Наука и всеобщая безопасность. 2007;15(2):12-21. <https://scienceandglobalsecurity.org/ru/archive/sgsr15magill.pdf>.
12. Мастепанов АМ. Энергетический переход как генеральное направление энергетики будущего. Экол вестн России; 2020;(1)10-5;(2):12-9.
13. Медоуз Д, Рандерс Й, Медоуз Д. Пределы роста. 30 лет спустя. М.: Академкнига; 2008.
14. Моисеев НН. Экология человечества глазами математика. М.: Молодая гвардия; 1988.
15. Моисеев НН, Александров ВВ, Тарко АМ. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука; 1985.
16. Старшинов ЮИ, ред. Мировая энергетика. Прогноз развития до 2020 года. М.: Энергия; 1980.
17. Нигматуллин БИ. Прогноз мирового электропроизводства на АЭС на период до 2050 г. Атомная стратегия. 2017;(3). <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7390>.
18. Нигматуллин РИ. Во власти океана. Наука в России. 2010;(4):54-62.
19. Решетников ЕА. Светлое будущее наступит не от белых ночей, а от атомных станций. Атомная стратегия. 2004;8(13):4-6.
20. Римский-Корсаков АА. Две аварии. Атомная стратегия. 2011;(53):20-5.
21. Розенберг ГС. Глобальные модели динамики биосферы. Биосфера. 2017;9(2):107-22.
22. Рылов МИ, Тихонов МИ. В мире дозообразующих нуклидов. СПб.: Межотраслевой экспертно-сертификационный центр ядерной и радиационной безопасности; 2011.
23. Сергеев ЮН, Кулеш ВП. Проблемы циклического и стационарного развития цивилизации в глобальных моделях. Биосфера. 2017;9:13-47.
24. Суглобов ДН, Яковлев РМ, Мясоедов БФ. Торий-урановый топливный цикл для тепло- и электроэнергетики. Радиохимия, 2007;49(5):385-92.
25. Тихонов МИ, Муратов ОЭ. Катастрофы как источник потери устойчивости национальных государств. В кн. Проблемы риска в техногенной и социальной сферах. СПб.: Изд-во СПбГПУ; 2007. С. 119-30.
26. Форрестер Д. Мировая динамика. М.: Наука; 1978.
27. Фролов ИЕ, Гудкович ЗМ, Карклин ВП, Ковалев ЕГ, Смоляницкий ВМ. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука; 2007.
28. Фролов ИЕ, Гудкович ЗМ, Карклин ВП, Ковалев ЕГ, Смоляницкий ВМ. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа. Проблемы Арктики и Антарктики. 2007;75:149-60.
29. Яблоков АВ, Нестеренко ВБ, Нестеренко АВ. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы. СПб.: Наука; 2011.
30. Яблоков АВ. Миф о незначительности последствий Чернобыльской катастрофы. М.: Центр экологической политики России; 2001.
31. Яковлев РМ. О реакторах нового поколения. Атомная стратегия. 2005;(4):20-1.

32. Яковлев РМ, Данилевич ЯБ, Игнатъев МБ, Суглобов ДН. Атомная энергетика без плутония и Чернобыля. Мир и согласие. 2008;2:58-64.
33. Яковлев РМ, Петров ЭЛ, Тихонов МН, Муратов ОЭ. Решение проблем ядерной энергетике в стратегии уран-ториевого топливного цикла. Атомная стратегия. 2007;(5). <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=970>
34. Яковлев РМ, Обухова ИА. Оценка перспектив применения альтернативных моделей реакторов в ядерной энергетике. Информационные системы и технологии. 2018;10:3-13.
35. Яковлев РМ, Обухова ИА. Ситуация с нераспространением ядерного оружия и проблемы развития атомной энергетике. Информационные системы и технологии. 2019;11:153-69.
36. Яковлев РМ, Обухова ИА. На пути к безопасной атомной энергетике. Биосфера. 2017;9(2):123-35.
37. Яковлев РМ, Обухова ИА. О нераспространении ядерного оружия и проблемах развития атомной энергетике России. Экологический вестник России, 2020;(1):32-6.
11. Magill J, Hamilton D, Lutzenkirchen K, Tufan M, Tamborini G, Wagner W, Berthou V, von Zweidorf A. Consequences of a radiological dispersal event with nuclear and radioactive sources. Sci Glob Secur. 2007;15:107-32.
12. Mastepanov AM. [Energy transition as the principal trend of the future energetics]. Ekologicheskii Vestnik RossiiRossii; 2020; (1):10-5; (2):12-9. (In Russ.)
13. Meadows DH, Meadows DL, Randers J. The Limits of Growth. Washington DC: Potomac Assoc.; 1972.
14. Moiseev NN. Ekologiya Chelovechestva Glazami Matematika. Moscow: Molodaya Gvardiya; 1988. (In Russ.)
15. Moiseev NN, Aleksandrov VV, Tarko AM. Chelovek i Biosfera. Opyt Sistemnogo Analiza i Eksperimenty s Modeliami. Moscow: Nauka; 1985. (In Russ.)
16. World Energy Demand: Full Report to the Conservation Commission of the World Energy Conference. IPC Sci. & Technol. Publ.; 1978.
17. Nigmatullin BI. [Forecast for world production of electric power by nuclear plants up to 2050]. Atomnaya Strategiya. 2017;(3). (In Russ.) <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7390>.
18. Nigmatullin RI. [At Ocean's mercy]. Nauka v Rossii. 2010;4:54-62. (In Russ.)
19. Reshetnikov YeA. [The bold future will come not out of the white nights but due to nuclear power]. Atomnaya Strategiya. 2004;8(13):4-6. (In Russ.)
20. Rimskiy-Korsakov AA. [Two accidents]. Atomnaya Strategiya. 2011;(53):20-5. (In Russ.)
21. Rozenberg GS. [Global models of the dynamics of the biosphere]. Biosfera. 2017;9(2):107-22. (In Russ.)
22. Rylov MI, Tikhonov MI. V Mire Dozobrazuyuschikh Nuklidov. Saint Petersburg. Mezhotraslevoe Eekspertno-Sertifikatsionnyi Tsentri Yadernoy i Radiatsionnoy Bezopasnosti; 2011. (In Russ.)
23. Sergeev JuN, Kulesh VP. [Cyclic and stationary modes of the development of civilization in global models]. Biosfera. 2017;9:13-47. (In Russ.)
24. Suglobov DN, Yakovlev RM, Miasoyedov BF. [Thorium-uranium fuel cycle for thermo- and electro-energetics]. Radiokhimiya, 2007;49(5):385-92. (In Russ.)
25. Tikhonov MI, Muratov OE. [Catastrophes as a cause of the loss of stability of nations]. In: Problemy Riska v Tekhnogennoy i Sotsialnoy Sferakh. Saint Petersburg, Izdatelstvo SPbGPU; 2007. P. 119-30. (In Russ.)

Общий список литературы/Reference List

1. Aleksandrov AP et al. Atomnaya Nauka i Tehnika v SSSR. Moscow: Atomzdat; 1977. (In Russ.)
2. Aleksandrov VV, Stenchikov GI. [On a computational experiment imitating the climatic consequences of a nuclear war]. Zhurnal Vychislitel'noy Matematiki i Matematicheskoy Fiziki. 1984;24(1):140-4. (In Russ.)
3. Adamov YeO. et al. Belaya Kniga Yadernoy Energetiki. Moscow: GUP NIKIET; 2001. (In Russ.)
4. Buldakov LA. Radioaktivnye Veschestva i Chelovek. Moscow: Energoatomizdat; 1990. (In Russ.)
5. Vasilenko IJa. Toksikologiya Produktov Yadernogo Deleniya. Moscow: Meditsyna; 1999. (In Russ.)
6. Galsstone S. The Effects of Nuclear Weapons. Washington: United States Atomic Energy Commission; 1962.
7. Kolobashkin VM et al. Radiatsionnye Kharakteristiki Obluchionnogo Yadernogo Topliva. Moscow: Energoatomizdat; 1983. (In Russ.)
8. Kondratyev KJa, Krapivin VF, Savinykh VP. Perspektivy Razvitiya Tsivilizatsii: Mnogomerniy Analiz. Moscow: Logos, 2003. (In Russ.)
9. Krivolutskiy DA et al. Deystviye Ioniziruyushchey Radiatsii na Biogeotsenoz. Moscow: Gidrometeoizdat; 1967. (In Russ.)
10. Kuziakn JuI, Yakovlev RM. [Vehicular molten salt reactor unit]. In: Korabelnaya Yadernaya En-

К СТОДЕСЯТИЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА В.И. РОЗЕНГАРТА – РОДОНАЧАЛЬНИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ БИОХИМИИ ФОСФОРОРГАНИЧЕСКИХ ИНГИБИТОРОВ ХОЛИНЭСТЕРАЗ

Н.Е. Басова*, Г.А. Оганесян, Е.В. Розенгарт

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт эволюционной физиологии
и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: basovnat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2021; принята к печати 21.09.2021

Изложены основные этапы жизни и научной биографии профессора Виктора Иосифовича Розенгарта – одного из основоположников отечественной нейрохимии и сравнительной биохимии токсических фосфорорганических соединений.

Ключевые слова: нейрохимия, сравнительная биохимия, энзимология, холинэстеразы.

TO THE CENTENARY OF PROFESSOR V.I. ROZENGART – ONE OF THE FOUNDERS OF THE COMPARATIVE BIOCHEMISTRY OF ORGANOPHOSPHORUS INHIBITORS OF CHOLINESTERASES

N.Ye. Basova, G.A. Oganesyanyan, Ye.V. Rozengart

I.M. Sechenov Institute of Evolutionary Biochemistry and Physiology, Saint Petersburg, Russia

e-mail: basovnat@mail.ru

The main stages of the life and scientific biography of Professor Viktor Iosifovich Rozengart, one of the founders of Russian neurochemistry and comparative biochemistry of toxic organophosphorus compounds, are presented.

Keywords: neurochemistry, comparative biochemistry, enzymology, cholinesterase.

В наше время наука тяготеет к узкой специализации. Все меньше и меньше остается «специалистов широкого профиля». К числу таких «последних из могикан» можно отнести доктора медицинских наук профессора Виктора Иосифовича Розенгарта (1912–1994). Это был разносторонне образованный биохимик, известный специалист в области медицинской энзимологии, один из основоположников отечественной нейрохимии и сравнительной биохимии токсических фосфорорганических соединений (ФОС). В феврале 2022 года исполнится 110 лет со дня его рождения [1–5].

Виктор Иосифович родился в 1912 году в городе Екатеринославле (впоследствии Днепропетровск, ныне Днепр, Украина) в семье врача-педиатра Иосифа Марковича Розенгарта и стенографистки Валерии Евсеевны Хенкиной.



Виктор Иосифович Розенгарт



Иосиф Маркович и Валерия Евсеевна Розенгарты



Виктор Иосифович (справа), Юрий Иосифович и Валерия Евсеевна Розенгарт. Ленинград, 1955 год



Виктор Розенгарт. 1930 год

Семья была очень образованная и по дореволюционным временам вполне состоятельная. Поэтому обоим своим сыновьям – старшему Виктору и младшему Юрию – родители дали превосходное домашнее образование.

Домой приходил учитель, обучавший мальчиков точным наукам (математике, азам физики и химии) и базовым знаниям по биологии. Великолепное знание математического аппарата всю последующую жизнь позволяло легко анализировать научные данные, выводить новые удобные формулы для вычислений и описаний любых процессов. Немецкая бонна научила мальчиков свободно говорить и мыслить на немецком языке, прекрасно владеть французским и сносно английским. Кстати, немецкий стал для Виктора Иосифовича настолько родным языком, что, когда он приехал уже в 1950-е годы на конференцию в Германию, его приняли за немца, даже называли его «родную»

провинцию по некоторым особенностям диалекта (конечно, присущим когда-то его воспитательнице). Уровень полученного образования оказался неизмеримо выше уровня тогдашней послереволюционной школы, поэтому в 12 лет в школу пришлось пойти только для получения формального аттестата. Школу Виктор Розенгарт окончил почти экстерном, и в 14 лет, после получения Иосифом Марковичем специального разрешения из Наркомпроса (Народного комиссариата просвещения) по поводу столь юного возраста абитуриента, был принят в Металлургический институт.

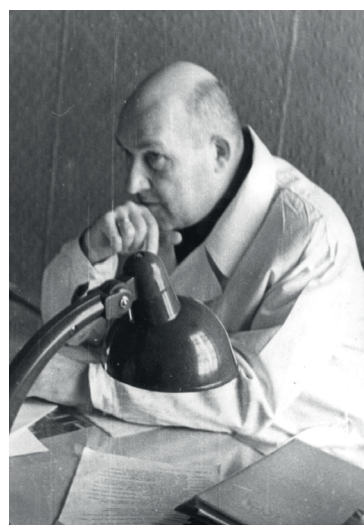
Проучившись там три года, Виктор Розенгарт в свои 17 лет все-таки решил сменить специальность – медицинская семья давала о себе знать. Он подготовился и блестяще сдал экзамены для поступления в Днепропетровский медицинский институт. И почти сразу его увлекла наука.



Студенты Днепропетровского медицинского института

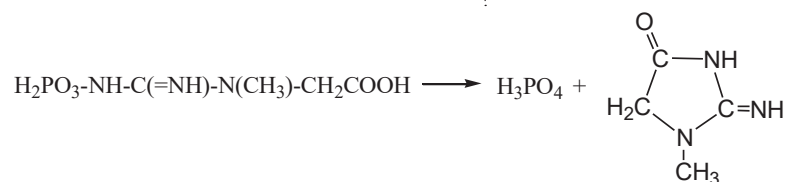
Капитан медицинской службы
Виктор Розенгарт

Военно-санитарный поезд (ВСП 319)

Виктор Иосифович Розенгарт –
заведующий лабораторией биохимии ИЭФБ

В научной биографии все начиналось блестяще: в 20 лет диплом врача после окончания в 1932 году Днепропетровского медицинского института, в 24 года В.И. Розенгарт – кандидат медицинских наук и один из пионеров сравнительного исследования биоэнергетики мышечного сокращения у птиц и млекопитающих [6]. Эти работы получили положительную оценку основателей европейской и отечественной школ биоэнергетики академиков Я.О. Парнаса и В.А. Энгельгардта. Вслед за этими исследованиями было сделано важное

открытие нового метаболического пути образования в организме креатинина, вошедшее в современные учебники биохимии [7]. Так было впервые показано, что при автолизе мышечной ткани в присутствии гликолитических ядов (фтористый натрий, моноиодуксусная кислота) ускоряется распад фосфокреатина и происходит накопление креатинина, который синтезируется не за счет отщепления воды от молекулы креатина, как считалось ранее, а из фосфокреатина путем неферментативного дефосфорилирования [8, 20]:



Этот вывод был подтвержден результатами более позднего зарубежного исследования [11], но без ссылки на работы В.И. Розенгарта [8], видимо, из-за их недоступности. По рекомендации Я.О. Парнаса, написавшего письмо в редакцию Nature, приоритет был закреплен специальной публикацией [20].

Но в научные планы XX века внесли свои жестокие коррективы: зимняя война с Финляндией, куда уже дипломированный врач В.И. Розенгарт попал рядовым медсанбата и на сконструированных им «волокушах» транспортировал раненных под огнем финских снайперов-«кукушек», а ведь до этого раненных вытаскивали на своих плечах девушки-санитарки, погибая вместе с бойцами. Затем Отечественная война и все 900 дней блокады на Ленинградском фронте, где капитан медслужбы В.И. Розенгарт создал фронтовые курсы санинструкторов, подготовив в тяжелейших блокадных условиях сотни профессионалов медицинского дела.

Затем как начальник военно-санитарного поезда майор медицинской службы он неоднократно преодолевал насквозь простреливаемый «смертельный перешеек» под Шлиссельбургом. Кстати, в 1944 году по заданию редакции пермской газеты к ним прибыла Вера Федоровна Панова. Среди врачей, медсестер, раненых она провела около двух месяцев и впоследствии написала повесть «Спутники» (1946) – лучшее свое произведение, описывающее жизнь военно-санитарного состава.

После демобилизации В.И. Розенгарт организовал и 18 лет руководил биохимической лабораторией в Институте токсикологии, потом возглавил кафедру биохимии 1-го Ленинградского мединститута, а затем в течение 20 лет заведовал лабораторией биохимии Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова (ИЭФБ). Пополнилась и научная биография В.И. Розенгарта: он создал и стал общепризнанным лидером новой области биохимии – сравнительной биохимии токсических ФОС [1–3, 20].

И снова удивительные изгибы научной судьбы: В.И. Розенгарт и ИЭФБ. Тут необходим небольшой экскурс в историю. В 1942 году А.Г. Гинецинский первым в отечественной науке установил, что токсическое действие фосфорорганических ядов на организм связано с ингибированием ключевого фермента холинэстеразы (ХЭ) [20]. Открытие А.Г. Гинецинского оставило глубокий след в работах отечественных ученых. Так В.И. Розенгарт в конце 1940-х годов впервые в нашей стране проводил биохимические исследования непосредственного действия ФОС на ХЭ. В.А. Яковлев сделал чрезвычайно важное открытие, показав, что в основе

антихолинэстеразного действия ФОС лежит фосфорилирование активного центра ХЭ. М.Я. Михельсон был одним из зачинателей фармакологии токсического действия ФОС. А.П. Бресткин создал кинетические основы холинэстеразного катализа и взаимодействия ХЭ с ФОС. Под руководством А.К. Воскресенской проводились пионерские исследования механизма действия ФОС на насекомых. Все они в разные годы были сотрудниками ИЭФБ и поддерживали с А.Г. Гинецинским не только научные, но и дружеские контакты. Так ИЭФБ стал центром отечественных холинэстеразных и антихолинэстеразных исследований [21].

Важнейшим научным достижением В.И. Розенгарта было создание общей концепции метаболизма фосфорорганических ксенобиотиков в организме позвоночных и беспозвоночных. Им было теоретически предсказано, что принцип преобразования этих соединений для ускорения их последующего выведения заключается в повышении их полярности, а следовательно и растворимости [3]. Такая концепция логично согласуется с общими метаболическими представлениями крупного американского фармаколога и биохимика Бернарда Броди [22]. Эта идея нашла экспериментальное подтверждение как в работах школы В.И. Розенгарта, так и за рубежом, и сейчас является общепринятой. В.И. Розенгартом впервые была представлена четкая биохимическая классификация метаболических превращений ФОС в организме с указанием основных ферментов, ответственных за эти превращения [3].

1. Гидролитическое расщепление под действием гидролаз: (i) связей при атоме фосфора (фосфатазы), (ii) карбоксиэфирной связи (карбоксиэстеразы), (iv) N-алкильной связи и карбоксиамидной связи (карбоксиамидазы).
2. Перенос отдельных групп под действием трансфераз: глутатион-S-трансферазные реакции, реакции конъюгации с образованием глюкуронидов, глюкозидов, сульфатов.
3. Окислительно-восстановительные реакции под действием оксидоредуктаз: окислительная десульфурация, O-деарилирование, O-деалкилирование и N-деалкилирование, окисление алкильных групп, тиоэфирной серы и ароматического кольца, а также восстановительные реакции.
4. Неферментативные превращения.

Каждая из групп реакций соответствует процессам повышения полярности продуктов, то есть находится в полном соответствии с общей концепцией В.И. Розенгарта по метаболизму ФОС в живом организме [3].

Для общей оценки биологического действия токсических ФОС на различные живые организмы во всей

остроте и актуальности встает проблема избирательной токсичности. Результаты собственных исследований и литературные данные В.И. Розенгарт совместно с О.Е. Шерстобитовым обобщил в монографии по избирательной токсичности ФОС [3]. Очень важным компонентом избирательной токсичности является распределение ФОС в организме. Работы В.И. Розенгарта и его сотрудников в этой области не только пионерские, но и одни из немногих [3]. И здесь в полной мере проявился характерный экспериментальный почерк В.И. Розенгарта – адекватность методических приемов поставленной цели исследования. Он не признавал понятия «общепринятый метод»: лишь после тщательного анализа методических возможностей, точности, чувствительности и вероятных артефактов определялась схема опыта. Оказалось, что наиболее важные различия кроются в характере распределения ФОС у млекопитающих и у насекомых, что позволило выявить у ряда ФОС определенные элементы избирательности действия [3].

Широкой известностью пользуются нейрхимические исследования В.И. Розенгарта по влиянию различных судорожных воздействий на обмен белков и содержание ряда азотистых соединений в мозгу. Эти работы отличало то, что биохимические определения всегда сочетались с характеристикой функционального состояния организма животного [2].

Магистральным направлением на протяжении всей послевоенной научной деятельности В.И. Розенгарта были широкие сравнительно-энзимологические исследования в области эстеразного катализа, обобщенные в 3 монографиях [1–3] и в многочисленных обзорах [10, 11, 23]. Поражает широта научных интересов: от физиолого-биохимических аспектов роли ХЭ в функционировании отдельных органов [11] до высокоэффективных препаративных способов очистки ферментов [12], от физико-химических исследований по моделированию эстеразного катализа [13] до разработок методов определения ферментативной активности [14], от пионерских (1949 год) работ по действию токсических ФОС на ферменты энергетического обмена [15] до использования специально синтезированных ФОС для выявления различий в свойствах ХЭ млекопитающих и членистоногих [16]. Последняя тематика длительные годы была генеральной линией исследований. В.И. Розенгарт был одним из организаторов «Кабачниковского фосфорорганического колхоза» – неформального объединения химиков, биохимиков, фармакологов, физиологов, токсикологов, которое в 1960–1980-е годы было генератором идей, где в равной мере обсуждались и сравнительно-энзимологические аспекты, и проблемы, связанные с теоретическими и прикладными вопросами избирательной токсичности. Чрезвычайно важен вклад

В.И. Розенгарта и его сотрудников в так называемый «гидрофобный проект» – исследование с помощью гидрофобных ФОС, синтезированных московскими химиками школы академика М.И. Кабачника специализированных мест сорбции на активной поверхности ХЭ различного происхождения [23]. Изученные впервые под руководством В.И. Розенгарта ацетиленовые ФОС [11] оказались высокоспецифическими ингибиторами ХЭ членистоногих, причем в случае этих ферментов величина так называемого «ацетиленового эффекта» (отношение эффективности ацетиленовых ФОС к их насыщенным аналогам) была на несколько порядков выше, чем в случае ХЭ млекопитающих [11, 16]. Особую научную ценность представили работы школы В.И. Розенгарта по сравнительному изучению различных аспектов субстратной и ингибиторной специфичности ХЭ млекопитающих и фермента зрительных ганглиев тихоокеанского кальмара *Todarodes pacificus* [24]. Здесь было выявлено своеобразие свойств ХЭ кальмара при взаимодействии со специально синтезированным рядом ациллолиновых субстратов [17, 24].

В.И. Розенгарт был настоящим Учителем. Преподавательскую деятельность он начал еще в тридцатые годы в Днепропетровском мединституте. После войны он читал курсы биохимии студентам биологического, химического и физкультурного факультетов Ленинградского педагогического института имени А.И. Герцена. В полной мере его педагогический талант раскрылся на кафедре биохимии 1-го Ленинградского мединститута, которую он возглавлял в 1964–1972 годах.

Его блестящие лекции слушали вместе со студентами и аспиранты, и преподаватели многих лечебных кафедр, и окончившие институт врачи. Удивительной была способность Виктора Иосифовича доходчиво, но без тени вульгаризации объяснять самые сложные и запутанные научные проблемы. Он был замечательным популяризатором науки. Его перу принадлежат 2 научно-популярные книги: «Химия жизни» и «Ферменты – двигатели жизни» [4, 5], причем одна из них [4] была переведена во Вьетнамской народной республике и служила учебником биохимии. Он был подлинным наставником и воспитателем молодежи. Где бы ни работал В.И. Розенгарт, он всегда был окружен дружным сплоченным молодежным коллективом. Он создал большую биохимическую школу: среди его учеников 5 докторов наук и 33 кандидата наук.

И он был Мудрым Человеком. Жизненный путь В.И. Розенгарта отразил жестокость XX века. Он воевал рядовым медсанбата в финскую кампанию 1939–1940 годов. Военным медиком он прошел Отечественную войну. Все 900 дней блокады был на Ленин-

градском фронте. И потом ему не раз приходилось воевать с несправедливостью, косностью и подлостью. А он всегда сохранял веру в честность, порядочность и добро. Это было его жизненным кредо. Он это проповедовал, и он это отстаивал. Человек огромного жизненного опыта, он щедро делился своей мудростью с окружающими. Люди к нему шли за советом.

Он был Смелым Человеком. В.И. Розенгарт в полной мере обладал этой нечасто встречающейся чертой характера. Вот два эпизода из его биографии – из фронтовой и из научной. Во время финской войны в медсанбат, куда красноармеец-санитар В.И. Розенгарт доставил с передовой группу раненых, нагрянул с проверкой сталинский сатрап комиссар первого ранга начальник Политуправления Красной Армии Л.З. Мехлис. Кто-то из его многочисленной свиты доложил, что среди еще не захороненных трупов большинство составляли не рядовые, а командиры. Мехлис набросился на смертельно напуганного командира медсанбата, угрожая ему расстрелом. И тут Виктор Иосифович выступил вперед и объяснил начальнику ПУРа, что командирская форма одежды (белый полушубок с черной крест-накрест портупеей) является идеальной мишенью для финских снайперов, и поэтому большинство ранений комсостава смертельные. Мехлис, видимо, от неожиданности, перестал размахивать пистолетом, но сумел уловить здравый смысл его ре-

плики и со словами «А санитар-то прав» приказал запретить ношение портупей. Не знаем, спасло ли это кого-то из наших командиров, но наверняка в тот момент сохранило жизнь несчастному военврачу третьего ранга, не говоря о смертельной опасности, которой подверг себя Виктор Иосифович. Второй эпизод документирован [18] и связан с написанием В.И. Розенгартом в 1954 году (то есть до научной реабилитации Л.А. Орбели) разгромной рецензии на книгу «физиолога № 1» академика К.М. Быкова (К.М. Быков, В.М. Васюточкин. «О биохимическом субстрате нервной трофики»). Больше года рецензию не решались печатать, и она пролежала в редакции журнала «Биохимия». Не будем пересказывать ее содержание, но заключительная фраза достаточно красноречива: «Приходится констатировать, что К.М. Быков и В.М. Васюточкин, затронув одну из сложнейших проблем современной физиологии, к сожалению, не продвинулись по пути к ее разрешению, а своими необоснованными выводами лишь дезориентировали читателя». Этот отзыв [18] не прошел незамеченным, и у В.И. Розенгарта были неприятности.

Это был Высокообразованный Человек. В.И. Розенгарт знал многие разделы химии, физики, математики, биологии, физиологии, медицины. Он владел четырьмя языками, а главное, великолепно чувствовал родной русский язык. Он очень много читал, блестяще



На кафедре биохимии 1-го Ленинградского медицинского института



В.И. Розенгарт. 1986 год

анализировал и великолепно помнил прочитанное. Он хорошо знал, слушал и слышал как классическую, так и современную музыку. Он любил живопись и искусство. Он удивительно логично мыслил, логично строил свои умозаключения, четко и логично их излагал. Он был не только теоретик, но и практик: у него были «золотые руки». Он с легкостью мог освоить, а при необходимости даже починить любую сложную технику как в лаборатории, так и дома. Он был оптимистом и обладал великолепным чувством юмора и высшим его проявлением – самоиронией. Он был очень доброжелателен к людям, и его всегда окружали любовь и уважение окружающих. Это был Интеллигент.

Закончить хочется словами Даниила Гранина из повести «Зубр» о Николае Владимировиче Тимофеев-Ресовском (1900–1981), замечательном советском генетике, человеке с удивительной судьбой [19]: такие люди, «люди размышления, совести и самостоянья оставляют нам главный урок на будущее – урок недопустимости пассивного ожидания чего-то в жизни».

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ФАНО России (№ АААА-А18-118012290427-7).

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Голиков СН, Розенгарт ВИ. Фармакология и токсикология фосфорорганических соединений. Л.: Медгиз; 1960.
2. Голиков СН, Розенгарт ВИ. Холинэстеразы и антихолинэстеразные вещества. Л.: Медицина; 1964.
3. Розенгарт ВИ, Шерстобитов ОЕ. Избирательная токсичность фосфорорганических инсектоакарицидов. Л.: Наука; 1978.
4. Розенгарт ВИ. Химия жизни. Л.: Медгиз; 1960.
5. Розенгарт ВИ. Ферменты – двигатели жизни. Л.: Наука; 1983.
6. Розенгарт ВИ. Влияние тренировки на содержание аденозинтрифосфорной кислоты в мышцах кроликов, голубей и кур. Биохимия. 1937;11:657-64.
7. Збарский БИ, Иванов ИИ, Мардашёв СР. Биологическая химия. Л.: Медицина; 1972.
8. Розенгарт ВИ. К вопросу об образовании креатинина. Бюлл. Днепропетровского мед. ин-та. 1940;(2):87-9.
9. Розенгарт ЕВ. Открытие А.Г. Гинецинским антихолинэстеразного механизма действия фосфорорганических ядов. Журн эвол биохим физиол. 1996;32(6):707-9.
10. Розенгарт ВИ. Некоторые биологические особенности ацетилхолинэстеразы. В кн.: Успехи нейрхимии. Л.; 1974. С. 196-209.
11. Бресткин АП, Вихрева ЛА, Годовиков НН, Жуковский ЮГ, Кабачник МИ, Моралёв СН, Розенгарт ВИ, Шерстобитов ОЕ. S-Алкиниловые эфиры тиокислот фосфора как ингибиторы холинэстераз и перспективные физиологически активные вещества. Усп хим. 1991;60:1744-76.
12. Розенгарт ВИ, Кибардин СА, Бернарделли ЕИ, Финогенов ПА. Получение высокоочищенной печеночной эстеразы. ДАН СССР. 1952. Т. 82. С. 293-6.
13. Розенгарт ВИ, Шепшелевич ЛВ. Механизм действия пирокатехина как модели эстеразы. Биохимия. 1962;27:689-97.

14. Розенгарт ВИ, Розенгарт ЕВ. Химические методы определения содержания ацетилхолина. Лаб дело. 1972;(2):81-4.
15. Захарова АВ, Розенгарт ВИ. Влияние диизопропилфторфосфата на гликолиз в мышечной ткани. Биохимия. 1949;14:67-9.
16. Балашова ЕК, Кугушева ЛИ, Розенгарт ВИ, Шерстобитов ОЕ, Васильева ТИ, Савченко КН, Абдувахабов АА, Далимов ДН. Исследование избирательной токсичности некоторых новых ФОИ, содержащих гетероциклы. В кн.: Химия физиологически активных веществ. Нальчик; 1980. С. 193-204.
17. Боголюбова ГМ, Карпинская ЕВ, Кулиева АИ, Розенгарт ВИ. Субстратная специфичность холинэстеразы зрительного ганглия кальмара и ацетилхолинэстеразы эритроцитов быка. Биохимия. 1972;37:826-33.
18. Розенгарт ВИ, Быков КМ, Васюточкин ВМ. О биохимическом субстрате нервной трофики. Биохимия. 1955;20:398-400.
19. Гранин ДА. Зубр. Л.: Советский писатель; 1987.
11. Brestkin AP, Vikhreva LA, Godovikov NN, Zhukovskiy JuG, Kabachnik MI, Moraliyov SN, Rozengart VI, Sherstobitov OYe. [S-alkinyl esters of phosphothioacids as cholinesterase inhibitors and promising physiologically active substances]. Uspekhi Khimii. 1991;60:1744-76. (In Russ.)
12. Rozengart VI, Kibardin SA, Bernardelli YeI, Finogenov PA. [Preparation of a highly purified esterase from the liver]. DAN SSSR. 1952. V. 82. P. 293-6. (In Russ.)
13. Rozengart VI, Shepshelevich LV. [The mechanism of action of pyrocatechine as an esterase model]. Biokhimiya. 1962;27:689-97. (In Russ.)
14. Rozengart VI, Rozengart YeV. [Chemical methods of determination of acetylcholine content]. Laboratornoye Delo 1972;(2):81-4. (In Russ.)
15. Zakharova AV, Rozengart VI. [Diisopropyl phosphate effect on glycolysis in muscular tissue]. Biokhimiya. 1949;14:67-9. (In Russ.)
16. Balashova YeK, Kugusheva LI, Rozengart VI, Sherstobitov OYe, Vasilyeva TI, Savchenko KN, Abduvakhabov AA, Dalimov DN. [A study of the selective toxicity of some novel phosphor organic inhibitors comprising heterocyclic moieties]. In: Khimiya Fiziologicheskii Aktivnykh Veschestv. Nalchik; 1980. P. 193-204. (In Russ.)
17. Bogoliubova GM, Karpinskaya YeV, Kuliyeva AI, Rozengart VI. [The substrate specificity of cholinesterase from quid optic ganglion and acetylcholinesterase from bovine erythrocytes]. Biokhimiya. 1972;37:826-33. (In Russ.)
18. Rozengart VI. [Bykov KM, Vasiutochkin VM. O Biokhimicheskom Substrate Nervnoy Trofiki]. Biokhimiya. 1955;20:398-400. (In Russ.)
19. Granin DA. Zubr. Leningrad: Sovetskiy Pisatel; 1987. (In Russ.)
20. Rosengart V. Formation of creatinine in the animal body. Nature. 1944;154(3922):829.
21. Moralev SN, Rozengart EV. Comparative Enzymology of Cholinesterases. La Jolla, Ca. (USA); 2007.
22. Costa E, Karczmar AG, Vesell ES, Bernard B, Brodie and the rise of chemical pharmacology. Annu Rev Pharmacol Toxicol. 1989;29:1-22.
23. Kabachnik MI, Brestkin AP, Godovikov NN, Michelson MJ, Rozengart EV, Rozengart VI. The hydrophobic areas on the active surface of cholinesterases. Pharmacol Rev. 1970;22:355-88.
24. Turpaev TM, Abashkina LI, Brestkin AP, Brick IL, Grigorjeva GM, Pevzner DL, Rozengart VI, Rozengart EV, Sakharov DA. Cholinesterase of squid optical ganglia. Eur J Biochem. 1968;6:55-9.

Общий список литературы/References

1. Golikov SN, Rozengart VI. Farmakologiya i Toksikologiya Fosfororganicheskikh Soyedineniy. Leningrad: Medgiz; 1960. (In Russ.)
2. Golikov SN, Rozengart VI. Kholinjesterazy i Antikholinjesteraznye Veschestva. Leningrad: Medicina; 1964. (In Russ.)
3. Rozengart VI, Sherstobitov OYe. Izbiratel'naya Toksichnost Fosfororganicheskikh Insektoakaritsidov. Leningrad: Nauka; 1978. (In Russ.)
4. Rozengart VI. Khimiya Zhizni. Leningrad: Medgiz; 1960. (In Russ.)
5. Rozengart VI. Fermenty – Dvigateli Zhizni. Leningrad: Nauka; 1983. (In Russ.)
6. Rozengart VI. [The effect of training on the content of adenosine triphosphoric acid in muscles of rabbits, doves, and chickens]. Biokhimiya. 1937;11:657-64. (In Russ.)
7. Zbarskij BI, Ivanov II, Mardashov SR. Biologicheskaya Khimiya. Leningrad: Medicina; 1972. (In Russ.)
8. Rozengart VI. [On creatinine formation]. Biulleten Dnepropetrovskogo Meditsinskogo Instituta. 1940;(2):87-9. (In Russ.)
9. Rozengart YeV. [The discovery by A.G. Ginetsinskiy of the mechanism of the anticholinesterase activity of phosphoorganic poisons]. Zhurnal Evolutsionnoy Biokhimii i Fiziologii. 1996;32(6):707-9. (In Russ.)
10. Rozengart VI. [Some biological characteristics of acetylcholine esterase]. In: Uspekhi Neyrokhimii. Leningrad; 1974. P.196-209. (In Russ.)

УДК 93/94 (314.12 + 574.34)

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.

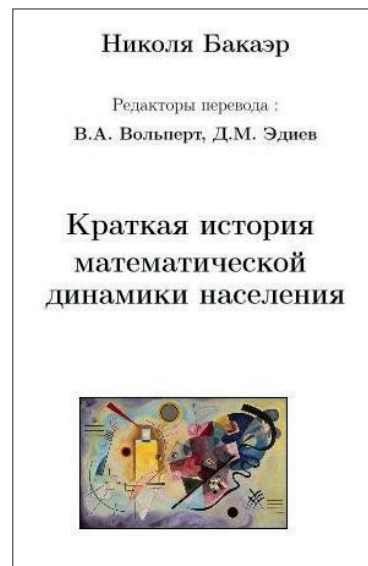
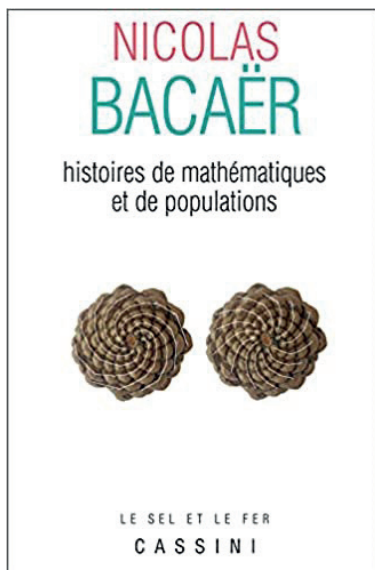
По Интернету распространяется русский перевод книги Николя Бакаэра (Nicolas Bacaër. *Histoires de mathématiques et de populations*. 2008. [4]). Сообщается, что его можно бесплатно скачать по следующему адресу: <http://www.ummisco.ird.fr/perso/bacaer/ru.pdf>. Как указано во введении, перевод выполнен с помощью компьютерной программы DeepL и откорректирован В.А. Вольпертом и Д.М. Эдиевым¹. Фактически, мы участвуем в интересном эксперименте быстрого распространения книги по многочисленным заинтересованным читателям с представлением ее на их родном языке благодаря автоматизированному переводу и последующей коррекции.

¹ Вольперт Виталий Айзикович (г. р. 1958) – российский (советский), французский математик, профессор Университета Клода Бернара (Claude Bernard Lyon I; Лион, Франция).
Эдиев Далхат Мурадинович (г. р. 1972) – математик, демограф; профессор, проректор по научной работе, информатизации и международному сотрудничеству Северо-Кавказской государственной академии (Черкесск, Россия).

В книге бережно и хорошо отражена история применения математических подходов и методов для решения популяционных задач, связанных с динамикой величины и структуры (возрастной и генетической) биологических популяций. Большая часть задач связана с динамикой народонаселения и демографией людей, но реально тематика книги значительно шире. Автор адресует свою книгу «старшеклассникам и студентам вузов..., преподавателям математики, пытающимся сделать свой курс более привлекательным..., специалистам, уже знакомым с демографией, эпидемиологией, генетикой или экологией и желающим сравнить свою область науки с другими, которые могут использовать аналогичные математические модели». Это, конечно, так, но наиболее интересна и полезна эта книга неожиданно (или закономерно?) оказывается именно специалистам по математическому моделированию популяционной динамики (в самом широком понимании этой тематики), поскольку в весьма изящной и компактной форме побуждает их



Николя Бакаэр, 1975 г. рожд., сотрудник Французского института развития (Institut de Recherche pour le Développement)



«вспомнить все» и еще раз посмотреть через историческую перспективу на текущие актуальные задачи и соотнести сегодняшние подходы с тем, что было уже сделано упорными и яркими исследователями прошлых веков.

В книге подкупает легкость, четкость и ясность изложения, достигаемые без искажения смысла и глубины проблем при описании содержательных популяционных задач и их математических формализаций. Трудно вспомнить еще книги, где так полно были представлены основополагающие результаты математической популяционной экологии, математической демографии, математической популяционной генетики, причем полученные как при детерминистическом, так и при стохастическом рассмотрении соответствующих популяционных процессов. Очень ярко высвечены роли выдающихся ученых, например, подробно освещена малоизвестная, но очень важная работа Л. Эйлера (Leonhard Euler, 1707–1783), в которой фактически анонсировались положения целого ряда последующих исследований, таких как Мальтуса (Thomas Robert Malthus, 1766–1834), Лесли (Patrick H. Leslie, 1890–1974) и других.

Восхищает осознание того объема вычислений и оценок, которые были выполнены гигантами прошлых веков на базе одной только таблицы десятичных логарифмов для целых чисел. Незабываемое впечатление производят тактичные, компактные и вместе с тем важные, информативные и интересные краткие биографические сведения о каждом из исследователей, чьи результаты приводятся и обсуждаются в монографии.

Вообще, чтение книги оставляет очень приятное впечатление, хотя каждый исследователь, безусловно, мог бы дополнить ее своими мыслями и замечаниями касательно истории математического моделирования популяционной динамики.

В книге отмечается, что популяционные математические исследования, как правило, изначально были направлены на решение проблем, которые волновали биологов, демографов, эпидемиологов, экономистов. Вместе с тем, следовало бы добавить, что результаты этих исследований в свою очередь оказали очень большое влияние на формулировки биологических представлений и концепций. Первая половина прошлого века оказалась «золотым» временем математической популяционной биологии с его мощным притоком математических сил и подходов, всплеском новых идей [13], формированием новых теорий, таких как синтетическая теория эволюции, и новых отраслей наук, таких как математическая популяционная генетика и математическая популяционная экология.

В интересной написанной главе о Менделе (Gregor Johann Mendel, 1822–1884) и наследственности все же как-то слабо прозвучало, что важнейшей составля-

ющей открытия Менделя являлось понимание (догадка!) о диплоидности зигот и гаплоидности гамет. Именно это удалось ему почувствовать и уловить задолго до того, как связь диплоидности с наследственностью будет понята и «открыта» в цитологии. Можно всяко рассуждать о том, как это ему удалось, но эта догадка вместе с представлением о дискретных единицах наследственности – безусловное свидетельство о глубине и величии Менделя!

Интересная глава посвящена важному популяционно-генетическому закону Харди–Вайнберга (Godfrey Harold Hardy, 1877–1947; Wilhelm Weinberg, 1862–1937). Однако очень хочется дополнить эту главу следующим весьма существенным, на наш взгляд, пояснением.

В законе Харди–Вайнберга есть две составляющие. Первая – это сохранение частоты аллеля, если нет отбора, мутаций, миграций и прочих нарушителей «равнозначности». Да и популяция должна быть достаточно большой без всякого генетического дрейфа. Как справедливо (но без прямого указания) намекает автор книги, этот факт решает проблему Дарвина (Charles Robert Darwin, 1809–1882), связанную с неизбежным «растворением» редкого признака в череде поколений в результате скрещиваний. Здесь можно вспомнить, что проблема эта, известная как «кошмар Дженкина» (Henry Charles Fleeming Jenkin, 1833–1885), соответствовала представлениям Дарвина о наследственности как пангенезисе и была очень тяжелой для него [5; 3, с. 492]. Однако «кошмар Дженкина» развеивается уже сразу после осознания работ Менделя.

Вторая составляющая закона Харди–Вайнберга – это соотношения, связывающие частоты генотипов и частоты генов, которые являются, прежде всего, следствием панмиксии – полной случайности и равной вероятности встречи партнеров при образовании брачных пар (или случайности и равновероятности скрещиваний, вне зависимости от генотипов размножающихся особей). В последующих работах основателей и последователей синтетической теории эволюции, начиная с Р. Фишера и С. Райта (Ronald Aylmer Fisher, 1890–1962; Sewall Green Wright, 1889–1988), благодаря этим соотношениям удалось принципиально понизить размерность моделей, описывающих эволюцию популяций, – перейти от анализа динамики частот генотипов к анализу частот генов. Заметим, что ограничение панмиксии в отсутствии отбора, мутаций, миграций, дрейфа генов даже в таком крайнем случае, как самоопыление, не приводит к изменению частот аллелей, но принципиально меняет соотношения генотипов: популяция стремится к совокупности гомозиготных групп и полной элиминации гетерозигот. В свою очередь, наличие естественного отбора не меняет Харди–Вайнберговские соотношения между частотами генотипов и частотами генов, если популя-

ции панмиктичны, а частоты генотипов сопоставляются с частотами аллелей, присутствующих в сформировавшихся их гаметах.

В компактной, цельной и естественно ограниченной по размеру книге трудно ожидать упоминания всех ярких авторов и концепций. У каждого исследователя здесь свой набор предпочтений и свои приоритеты. После описания модели хищник–жертва Лотки и Вольтерра (Alfred James Lotka, 1880–1949; Vito Volterra, 1860–1940) нам естественно вспоминается Г.Ф. Гаузе (1910–1986), сотрудничавший с В. Вольтерра и выполнивший уникальные эксперименты для проверки адекватности предлагаемых моделей. Для современного исследователя очень важно развитие моделей хищник–жертва, начатых К. Холлингом (модель Холлинга–Тэннера; Crawford Stanley (Buzz) Holling, 1930–2019; James T. Tanner, 1914–1991), Р. Макартуром (Robert Helmer MacArthur, 1930–1972) и параллельно в СССР А.Д. Базыкиным (1940–1994).

Из книги фактически выпало описание направления исследований, посвященных попыткам объединения идей популяционной генетики и популяционной экологии. Пионером в этом направлении (а также первых опытов математического моделирования глобальных квазипериодических биогеохимических и климатических процессов) был В.А. Костицин (1883–1963), который на французском языке в 1934 году выпустил книгу «Симбиоз, паразитизм и эволюция (математическое исследование)» [7], в 1935-м – книгу «Эволюция атмосферы: круговорот органики, ледниковый период» [8] (переведена на русский язык в 1984 году [2]), и в 1937-м – книгу «Математическая биология» [9] (переведена на английский в 1939 году [10]; на русский так и не переведена...). В последней книге, в частности, приводится ряд математических моделей, предназначенных для анализа результатов действия естественного отбора в экологически лимитированных популяциях и сообществах биологических видов, связанных трофическими и конкурентными взаимоотношениями. Большое внимание исследователей привлекла весьма популярная у популяционных биологов (и часто критикуемая) концепция r - и K -отбора, предложенная Макартуром и активно развиваемая его последователями – Э. Пианка, С. Стирнс и др. (Eric Rodger Pianka, 1939 –...; Stephen C. Stearns, 1946 –... [11, 12]).

Очень интересна глава, посвященная проблеме вымирания. Вместе с тем при обсуждении полученных здесь результатов автор ограничивается рассмотрением ситуации стохастического развития нелимитированных экспоненциально растущих популяций. Основной результат – здесь есть ненулевая вероятность невырождения – вырождение не всегда неизбежно (!). Однако при вероятностном (стохастическом) описании процесса динамики экологически лимитирован-

ных однородных популяций обнаруживается, что эти популяции обречены на вымирание. Это было показано чл.-корр. АН СССР А.А. Ляпуновым (1911–1973) и его учениками [1]. Заметим, что большинство существовавших в природе популяций вымерло, и многие существующие обречены на вымирание. Далее, в весьма изящном исследовании, выполненном проф. В.А. Ратнером (1932–2002) и его учениками [6], было показано, что необходимыми условиями, требуемыми для «невымирания» популяции, являются, в частности, условия, обеспечивающие выполнение триады Ч. Дарвина – изменчивости, наследственности и естественного отбора. Вообще, это очень важное теоретическое направление математической популяционной биологии, которому в последнее время почти не уделяется должного внимания.

Интересное введение в пространственные модели ограничивается обсуждением основополагающих работ, посвященных детерминированному распространению генов по однородному ареалу, и при этом за кадром остались как мощное, переживающее своеобразный ренессанс современное развитие этого направления, так и масса других подходов, типа клеточных автоматов, появившихся и господствующих в настоящее время.

В книге Николая Бакаэра очень достойно представлены разделы, посвященные математической теории эпидемий. Но это были первые попытки – первые подходы математически популяционной биологии к анализу процессов распространения инфекций и оценки эффективности прививок, ориентированные в основном на описание бактериальных инфекций. Сейчас делаются активные попытки адаптации предложенных раньше методов и моделей к актуальным вирусным инфекциям, и идет поиск оптимальных эпидемиологических стратегий борьбы и сдерживания быстро и остро эволюционирующего агента. Эти проблемы очень животрепещущи, ждут своих смелых исследователей, которые, возможно, откроют новые интригующие количественные закономерности и зависимости.

Раздел о хаотических популяциях хотелось бы дополнить одной репликой. Параллельно с Р. Мэем (Robert McCredie May, 1936–2020), чуть раньше и совершенно независимо к этим же результатам пришел советский дальневосточный математик А.П. Шапиро (1932–1988). К сожалению, этот факт остался почти незамеченным и теперь уже практически забыт в научной среде.

Итак, перед нами интересная и действительно полезная книга. В этом плане проделанный эксперимент оказался вполне успешным – мы получили хорошую книгу на родном языке. Однако машинный перевод – это все же автоматизированный перевод со всеми неизбежными изъянами даже в великолепной компьютерной программе. Книга пестрит неудачными синонимами, особенно среди профессиональных

понятий и терминов. Это начинается с режущего слух названия (французский оригинал выглядит мягче и естественнее), продолжается в невинных оговорках (типа слова «пересечение» в месте, где по тексту явно должно быть «скрещивание») и особенно выпирает в нетрадиционных написаниях устоявшихся транскрипций фамилий известных иностранных исследователей. Например, изучавшим генетику в России известно, что результаты Менделя были переоткрыты Хуго де Фризом (Hugo de Vries, 1848–1935) и Эрихом Чермаком (Erich Tschermak-Seysenegg; 1871–1962), а не «Врисом» и «Тшермаком». Есть фамилии, которые в разных местах книги приводятся по-разному, но не так, как это сейчас общепринято в русскоязычной научной литературе. Все это, конечно, является зоной ответственности редакторов перевода. Однако у них

была сложная дилемма между скоростью выхода книги (и дешевизной, в результате которой нам она досталась бесплатно), обеспечиваемой автоматизацией перевода, и качеством, погоня за которым могла просто загубить идею быстрого распространения.

Все же вполне осязаемая проблема качества «пост-автоматизированного» перевода – это больше дискуссия для будущих экспериментов. А сейчас мы получили интересную книгу, которую с удовольствием прочли; читая, о многом вспомнили и полезно поразмышляли о том великом наследии, которое нам оставлено титанами и тружениками прошлых лет. С этим напутствием мы и рекомендуем книгу всем, кому интересно прикладное математическое моделирование и особенно моделирование применительно к популяционным проблемам в самом широком их понимании.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Карев ГП, Ляпунов АА, Терсков СА. О детерминированном и вероятностном подходах к эволюционным задачам в теории популяций. В кн.: Проблемы эволюции. Новосибирск: Наука; 1975. (4):5-10.
2. Костицын ВА. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. М.: Наука; 1984.
3. Тахтadžян АЛ. Дарвин и современная теория эволюции. В кн.: Дарвин. Происхождение видов. СПб.: Наука; 2001. С. 490-519.

Общий список литературы/Reference List

1. Karev GP, Lyapunov AA, Terskov SA. On deterministic and probabilistic approaches to evolutionary problems in population theory. In: Problemy Evolutsii. Novosibirsk: Nauka; 1975. (4):5-10. (In Russ.)
2. Kostitsyn VA. Evoliutsiya Atmosfery, Biosfery i Klimata. [Evolution of the Atmosphere, Biosphere and Climate]. Moscow: Nauka; 1984. (In Russ.)
3. Takhtadzhyan AL. Darwin and the modern theory of evolution. In: Darwin. Proiskhozdeniye Vidov. Saint Petersburg: Nauka; 2001. P. 490-519. (In Russ.)
4. Bacaër N. Histoires de mathématiques et de populations. Paris: Cassini; 2008.
5. Jenkin F. Review of 'The origin of species'. North British Review. 1867;46:277-318.
6. Korostishevsky MA, Shtabnoy VR, Ratner VA. On some principles of evolution viewed as a stochastic process. J. Theor. Biol. 1974;48:85-103.
7. Kostitzin VA. Symbiose, parasitisme et évolution: (Etude mathématique). Paris: Hermann; 1934.
8. Kostitzin VA. Evolution de l'atmosphère: Circulation organique, époques glaciaires. Paris: Hermann; 1935.
9. Kostitzin VA. Biologie mathématique. Préface de Vito Volterra. Paris: Libr. Armand; 1937.
10. Kostitzin VA. Mathematical Biology. George G. Harrap Co. Ltd; 1939.
11. Pianka ER. On r- and K-selection. American Naturalist. 1970;104(940):592-7.
12. Stearns SC. The Evolution of Life Histories. Oxford Univ. Press; 1992.
13. Scudo FM, Ziegler JR, eds. The Golden Age of Theoretical Ecology: 1923-1940. A Collection of Works by Volterra, Kostitzin, Lotka and Kolmogoroff. Berlin; N.Y.: Springer Verlag; 1978.

Е.Я. Фрисман, чл.-корр. РАН, докт. биол. наук, науч. руководитель Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН (г. Биробиджан),

Г. С. Розенберг, чл.-корр. РАН, докт. биол. наук, гл. науч. сотр. Института экологии Волжского бассейна РАН (г. Тольятти)



Подписано в печать **30.10.2021.**
Отпечатано в типографии «Лпринт»:
197374, Санкт-Петербург, ул. Сабировская, 37.
Тел.: **+7(812) 430-91-55.**
Тираж **700 экз.**
Цена свободная