2026
Т. 18, № 2

Междисциплинарный научный
и прикладной журнал

БИОСФЕРА

ISSN 2077-1371 / www.21bs.ru

ПОЛИТИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕНОЦИДА МИРНОГО НАСЕЛЕНИЯ СССР В ПЕРИОД ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ
А.А. Тишков
THE GEOGRAPHICAL AND POLITICAL ASPECTS OF THE GENOCIDE OF THE CIVILIAN POPULATION OF THE USSR DURING THE GREAT PATRIOTIC WAR
A.A. Tishkov

ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ И ИХ УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА (ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)
В.А. Усольцев, В.П. Часовских
FOREST FIRES AND THEIR CARBON FOOTPRINT DUE TO CLIMATE CHANGE (A REVIEW OF FOREIGN LITERATURE)
V.A. Usoltsev, V.P. Chasovskikh

РЕВМАТИЧЕСКИЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ В ВЫСОКОГОРЬЕ: РИСК И ОСОБЕННОСТИ
Ж.Ф. де Карвалью, Л.П. Чурилов, З.К. Кадыралиева, М.Г.Норматов, Б.Т. Орозбекова, Б.Д. Рязанцев
RHEUMATIC DISEASES AT HIGH ALTITUDE AREAS: RISK AND FEATURES
J.F. de Carvalho, L.P. Churilov, Z.K. Kadyralieva, M.G. Normatov, B.T. Orozbekova, B.D. Ryazantsev



ФОТО: TERRANAUT, PIXABAY.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 18, № 2
Санкт-Петербург
2026



BIOSPHERE

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

Vol. 18, No. 2
Saint Petersburg
2026

© «XXI CENTURY» RESEARCH FOUNDATION
RUSSIAN ECOLOGICAL ACADEMY

A2

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Editorial Board

Главный редактор *Editor-in-Chief*
Г.С. РОЗЕНБЕРГ (ТОЛЬЯТТИ) *G.S. Rozenberg (Togliatti)*

Заместитель главного редактора *Deputy Editor-in-Chief*
А.Г. ГОЛУБЕВ (С.-Петербург) *A.G. Golubev (Saint Petersburg)*

СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:
И.М. ТАТАРНИКОВА
EDITORIAL SECRETARY:
I.M. TATARNIKOVA

ДИЗАЙН: Е.А. КОРЧАГИНА
DESIGN: YE.A. KORCHAGINA

ВЕРСТКА: Т.А. СЛАЩЕВА
LAYOUT: T.A. SLASCHEVA

Е.В. Абакумов (С.-Петербург) *E.V. Abakumov (Saint Petersburg)*
Э.В. Баркова (Москва) *E.V. Barkova (Moscow)*
В.Н. Большаков (Екатеринбург) *V.N. Bolshakov (Ekaterinburg)*
Л.Я. Боркин (С.-Петербург) *L.Ja. Borkin (Saint Petersburg)*
Р.М. Вильфанд (Москва) *R.M. Vilfand (Moscow)*
В.В. Глупов (Новосибирск) *V.V. Glupov (Novosibirsk)*
М.Д. Голубовский (Окленд, США) *M.D. Golubovsky (Oakland, CA, USA)*
В.А. Драгавцев (С.-Петербург) *V.A. Dragavtsev (Saint Petersburg)*
Г.В. Жижин (С.-Петербург) *G.V. Zhizhin (Saint Petersburg)*
Т.Д. Зинченко (Тольятти) *T.D. Zinchenko (Togliatti)*
Г.А. Ивахненко (С.-Петербург) *G.A. Ivakhnenko (Saint Petersburg)*
Г.А. Исаченко (С.-Петербург) *G.A. Isachenko (Saint Petersburg)*
Л.М. Кавеленова (Самара) *L.M. Kavelenova (Samara)*
Н.А. Кашулин (Апатиты) *N.A. Kashulin (Apatity)*
М. Клявинш (Рига, Латвия) *M. Klavins (Riga, Latvia)*
С.В. Кривовичев (С.-Петербург) *S.V. Krivovichev (Saint Petersburg)*
Г.Р. Кудоярова (Уфа) *G.R. Kudoyarova (Ufa)*
А.Ю. Кулагин (Уфа) *A.Yu. Kulagin (Ufa)*
М.Д. Магомедов (Махачкала) *M.D. Magomedov (Makhachkala)*
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)*
В. Реген (Берлин, Германия) *W. Regen (Berlin, Germany)*
А.А. Редько (С.-Петербург) *A.A. Redko (Saint Petersburg)*
А.Л. Рижинашвили (С.-Петербург) *A.L. Rizhinashvili*
Г.А. Софронов (С.-Петербург) *G.A. Sofronov (Saint Petersburg)*
В.М. Тарбаева (С.-Петербург) *V.M. Tarbayeva (Saint Petersburg)*
Ф.А. Темботова (Нальчик) *F.A. Tembotova (Nalchik)*
И.А. Тихонович (С.-Петербург) *I.A. Tikhonovich (Saint Petersburg)*
М.Д. Уфимцева (С.-Петербург) *M.D. Ufimtseva (Saint Petersburg)*
М.А. Филатов (Сургут) *M.A. Filatov (Surgut)*
Е.Я. Фрисман (Биробиджан) *Ye.Ya. Frisman (Birobijan)*
О. Чертов (Бинген-на-Рейне, Германия) *O. Chertov(Bingen am Rhein, Germany)*
Л.П. Чурилов (С.-Петербург) *L.P. Churilov (Saint Petersburg)*

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
197110, Санкт-Петербург,
Большая Разночинная ул., д. 28;
Эл. почта: biosphaera@21mm.ru

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

POSTAL ADDRESS:
28 Bolshaya Raznochinnaya,
197110,
Saint Petersburg, Russia;
E-mail: biosphaera@21mm.ru

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

А3 **СОДЕРЖАНИЕ**
CONTENTS

Редакционная статья / Editorial

86 **АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ЛАНДШАФТНО-БИОНОМИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ И ШЕЛЬФА МИРОВОГО ОКЕАНА С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ, ОСВОЕНИЯ И ОХРАНЫ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ**
Кирилл Михайлович Петров
CURRENT OBJECTIVES IN TRAINING SPECIALISTS FOR COMPREHENSIVE BIONOMIC LANDSCAPE RESEARCH OF THE COASTAL ZONE AND SHELF OF THE WORLD OCEAN FOR STUDYING, EXPLOITATION AND CONSERVATION OF BIOLOGICAL RESOURCES
Kirill M. Petrov

ОБЩЕСТВО / SOCIETY

91 **ПОЛИТИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕНОЦИДА МИРНОГО НАСЕЛЕНИЯ СССР В ПЕРИОД ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ**
А.А. Тишков
THE GEOGRAPHICAL AND POLITICAL ASPECTS OF THE GENOCIDE OF THE CIVILIAN POPULATION OF THE USSR DURING THE GREAT PATRIOTIC WAR
A.A. Tishkov

ПРИРОДА / NATURE

103 **ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ И ИХ УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА (ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)**
В.А. Усольцев, В.П. Часовских
FOREST FIRES AND THEIR CARBON FOOTPRINT DUE TO CLIMATE CHANGE (A REVIEW OF FOREIGN LITERATURE)
V.A. Usoltsev, V.P. Chasovskikh

129 **ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЖЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ГИДРОХИМИЧЕСКИМ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ**
Н.В. Холмогорова, Л.В. Головатюк, О.А. Пушина
ASSESSMENT OF THE CURRENT CONDITION OF IZHEVSK RESERVOIR USING HYDROCHEMICAL AND HYDROBIOLOGICAL INDICATORS
N.V. Kholmogorova, L.V Golovatiuk, O.A. Pushina

ТЕОРИЯ / THEORY

142 **К ПЕРЕНОСУ ВИРУСОВ АЭРОЗОЛЯМИ**
А.Р. Каримов, М.А. Соломатин, А.Н. Бочаров
ON TRANSFER OF VIRUSES BY AEROSOLS
A.R. Karimov, M.A. Solomatin, A.N. Bocharov

ПРАКТИКА / PRACTICE

152 **ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ПОДХОДОВ К НОВОМУ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВУ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ**
А.А. Чибилев, С.В. Левыкин, Ю.А. Гулянов и соавт.
PRINCIPLES OF APPROACHES TO DEVELOPING NEW LAND MANAGEMENT AND PROJECTS FOR ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION OF STEPPE LANDSCAPES
A.A. Chibilev, S.V. Levykin, Yu.A. Gulyanov et al

164 **НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА СУБЪЕКТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В СФЕРЕ БОРЬБЫ С ИНВАЗИВНЫМИ ВИДАМИ РАСТЕНИЙ**
А.С. Карпов, С.А. Сенатор, Ю.К. Виноградова, Д.О. Воронцов
NEW OPPORTUNITIES FOR THE DEVELOPMENT OF LEGISLATION OF THE CONSTITUENT ENTITIES OF THE RUSSIAN FEDERATION IN THE FIELD OF COMBATING INVASIVE PLANT SPECIES
A.S. Karpov, S.A. Senator, Yu.K. Vinogradova, D.O. Vorontsov

172 **ВЛИЯНИЕ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В ПОСТАГРОГЕННЫХ БЕРЕЗОВЫХ ЛЕСАХ**
П.С. Широких, С.Н. Жигунова, В.Д. Гимазетдинов и соавт.
INFLUENCE OF SILVICULTURAL PRACTICES ON THE CARBON BALANCE OF THE FOREST FLOOR IN POST AGRICULTURAL BIRCH FORESTS
P.S. Shirokikh, S.N. Zhigunova, V.D. Gimazetdinov et al.

184 **ПРОБЛЕМЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ В НИГЕРИИ**
А.М. Жамбиков
PROBLEMS OF WATER TREATMENT IN NIGERIA
А.М. Жамбиков

ЗДРАВООХРАНЕНИЕ / PUBLIC HEALTH

193 **РЕВМАТИЧЕСКИЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ В ВЫСОКОГОРЬЕ: РИСК И ОСОБЕННОСТИ**
Ж.Ф. де Карвалью, Л.П. Чурилов, З.К. Кадыралиева и соавт.
RHEUMATIC DISEASES AT HIGH ALTITUDE AREAS: RISK AND FEATURES
J.F. de Carvalho, L.P. Churilov et al.,

УДК 574.9(895:922)/268.9 || EDN: АКНОРН
CC BY-NC 4.0
© К.М. Петров; ФНИ «XXI век»

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ЛАНДШАФТНО-БИОНОМИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ И ШЕЛЬФА МИРОВОГО ОКЕАНА С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ, ОСВОЕНИЯ И ОХРАНЫ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Кирилл Михайлович Петров
Почетный профессор Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

CURRENT OBJECTIVES IN TRAINING SPECIALISTS FOR COMPREHENSIVE BIONOMIC LANDSCAPE RESEARCH OF THE COASTAL ZONE AND SHELF OF THE WORLD OCEAN FOR STUDYING, EXPLOITATION AND CONSERVATION OF BIOLOGICAL RESOURCES

Kirill M. Petrov
Professor Emeritus, Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Введение

Задача исследования и освоения ресурсов Мирового океана и его шельфа была впервые поставлена в директивах XXIV съезда КПСС в 1971 году. Научная общественность быстро откликнулась на этот вызов: во Владивостоке академик А.П. Капица основал Институт географии Мирового океана с лабораторией морских ландшафтов; в стенах Дальневосточного университета начала работу лаборатория шельфа, оснащенная водолазным ботом и группой подготовленных водолазов. В 1972 году в Калининградском университете им. Э. Канта профессор М.М. Ермолаев создал факультет географии Мирового океана. Фундаментальные труды того времени, такие как монография Л.А. Зенкевича «Биология морей СССР» (1960) [1] и книга В.П. Зенковича «Основы учения о развитии морских берегов» (1962) [2], были удостоены Ленинской премии. Выход фильма Ж.-И. Кусто «В мире безмолвия» (1956) и появление первых отечественных аквалангов пробудили огромный интерес к подводным исследованиям.

В 1976 году вышла в свет книга З.И. Гурьевой, К.М. Петрова и В.В. Шаркова «Аэрофотометоды геолого-геоморфологического исследования внутреннего шельфа и берегов морей» [3]. Опираясь на дешифрирование аэрофотоснимков морских мелководий и данные легководолазных наблюдений, К.М. Петровым была опубликована монография «Подводные ландшафты: теория, методы исследования» (1989) [4].

В 1997 году Президентом России Б.Н. Ельциным была утверждена долгосрочная Федеральная целевая программа «Мировой океан». К сожалению, в последующие годы интерес к морским подводным исследованиям резко угас. Лаборатория морских ландшафтов во Владивостоке и лаборатория шельфа при университете были ликвидированы. В Калининградском университете прекратил существование факультет географии Мирового океана.

Новые учебные издания — пособие К.М. Петрова «Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты» (2023) [5] и учебник «Биогеография океана: теория и практика региональных исследований» (2024) [6] — могут послужить надежной основой для создания программ лекционных курсов, нацеленных на подготовку специалистов, способных к комплексному ландшафтно-биономическому изучению береговой зоны и шельфа.

Курс лекций «Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты»

Вводная лекция посвящена основным понятиям ландшафтно-биономических исследований. Экология — наука о взаимодействии организмов и образуе-

мых ими сообществ с окружающей средой. В качестве синонима термину «экология» Э. Геккель использовал понятие «биономия». В предлагаемом курсе лекций используются оба термина, например, «морская экология» и «ландшафтно-биономические исследования».

Комплексное изучение природы Мирового океана, особенно береговой зоны и шельфа, — веление времени. Начало XXI века характеризуется всё возрастающей эксплуатацией природных ресурсов и возведением грандиозных гидротехнических сооружений. Биологические ресурсы шельфа, кормившие человечество с доисторических времен, стали быстро истощаться в результате интенсивного антропогенного воздействия. Россия — великая морская держава, шельфы которой содержат богатые запасы минеральных и биологических ресурсов. Научной основой изучения и охраны жизни в океане должна стать морская экология. В XIX и первой половине XX века морские исследования решали в основном аутэкологические задачи — изучение экологии отдельных организмов. Со второй половины XX века исследования стали комплексными (экосистемными), ландшафтно-биономическими. Благодаря современным техническим средствам — аэрокосмическому мониторингу, морским и подводным исследованиям — непосредственным объектом изучения стали компоненты ландшафтов, выступающие в роли экологических факторов. Донные природные комплексы описываются одновременно как объекты ландшафтных и экосистемных исследований. Характеристика бентоса через познание ландшафтной структуры позволяет наиболее глубоко уяснить связь донных биоценозов с условиями местообитания, определить закономерности их распределения и выявить участки с типичными чертами биономической структуры. Настоящий курс лекций предназначен для формирования знаний о структуре и функционировании морских экосистем и подводных ландшафтов, обучения корректному использованию теоретической базы современной экологии в морских исследованиях, а также для целей правильной и обоснованной постановки и решения экологических задач, касающихся проблем воздействия человека на морские экосистемы.

Раскроем главные темы, которые будут раскрыты в курсе лекций «Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты»

ТЕМА I. Эволюция жизни и экология гидробионтов
ЛЕКЦИЯ 1. Появление и эволюция жизни на земле
* Эволюция жизни в криптозое
* Эволюция жизни в фанерозое
ЛЕКЦИЯ 2. Биота береговой зоны и шельфа мирового океана
ЛЕКЦИЯ 3. Экология гидробионтов
* Абиотические факторы
* Биотические факторы
* Трофические связи, определяющие целостность океанической экосистемы
ЛЕКЦИЯ 4. Арена жизни в океане
ТЕМА II. Морские экосистемы и подводные ландшафты
ЛЕКЦИЯ 5. Океаносфера: континуальность и дискретность
* Физико-географический процесс в океане
* Функции живого вещества
* Закон постоянства вещества и энергии
* Морской биогеоценоз
ЛЕКЦИЯ 6. Тектоника и рельеф как фактор ландшафтной дифференциации
береговой зоны и шельфа
* Тектоника и рельеф морских окраин России
* Региональные и локальные особенности строения береговой зоны моря
ЛЕКЦИЯ 7. Ведущие факторы формирования рельефа морских берегов
* Влияние колебаний уровня Мирового океана и внутренних морей России в четвертичный период
* Тектоника как ведущий фактор формирования рельефа береговой зоны моря
ЛЕКЦИЯ 8. Концепция подводного ландшафта береговой зоны моря
* Подводный ландшафт, его природные особенности и структура
* Аэрокосмические методы изучения и картографирования дна морских мелководий
* Подводный ландшафт береговой зоны Таманского полуострова (Черное море)
ЛЕКЦИЯ 9. Принципы детального районирования морских экорегионов
*Система единиц биономического районирования морских экорегионов
* Черное и Каспийское моря — экорегионы Понто-Каспийской провинции
* Биономическое районирование экорегиона (на примере Черного моря)
* Ландшафты-аналоги
ТЕМА III. Географическая зональность, человек и океан
ЛЕКЦИЯ 10. Зональные типы ландшафтов мирового океана
* Ландшафты холодного пояса
* Ландшафты умеренного пояса
* Ландшафты теплого пояса
ЛЕКЦИЯ 11. Уязвимые звенья экологической системы мирового океана
* Контакт «океан — атмосфера»
* Контакт «океан — суша»
* Контакт «океан — дно»

Курс лекций «Биогеография океана: теория и практика региональных исследований»

Биогеографическое районирование океана традиционно является биотическим, опирающимся на выявление неповторимых флористических и фаунистических комплексов путем анализа распространения таксонов. Такой подход сужает задачи биогеографии до описания формы ареалов и изучения истории формирования «композиций таксонов». Однако познание биологической структуры океана требует не только биотических, но и более широких ландшафтно-биономических исследований.

В изучении биологии океана отмечаются центробежные и центростремительные тенденции. Первые означают углубленный интерес к таксономии, аутэкологии и жизненным функциям гидробионтов, вторые — к биогидроценозам (экосистемам), их составу, структуре, функционированию и распространению. Основоположник экологии Э. Геккель предложил термин «бионomия» в 1868 году как синоним термина «экология». В 1887 году К. Мёбиус на примере устричной банки в Северном море показал, как в результате взаимодействия биотических и абиотических факторов на морском дне формируется целостная природная система, для обозначения которой он впервые ввел термин «биоценоз».

Понятие «биоценоз» быстро вошло в научный обиход, так как отражало стремление гидробиологов к синэкологическому восприятию биологической структуры океана. Особый интерес представляют бионomические исследования, в которых биоценозы рассматриваются как единое целое с вмещающими их ландшафтами. Важный шаг на пути сближения бионomии с ландшафтоведением (наукой о природных комплексах — геосистемах) сделал С.А. Зернов в 1913 году в классическом труде «К вопросу об изучении жизни Черного моря». Для обозначения участков дна, однородных по природным условиям и занятых характерными сообществами морских организмов, С.А. Зернов впервые употребил термин «фация». Л.А. Зенкевич (1970) отметил родство общих идей В.И. Вернадского о биосфере, В.В. Докучаева о природном комплексе, В.Н. Сукачева о биогеоценозе и подчеркнул их значение для изучения биологической структуры океана. Учитывая зависимость донного населения от природных условий, Е.Ф. Гурьянова (1959) с успехом применила метод составления карт подводных ландшафтов к изучению закономерностей распределения донных биоценозов. В 1989 году К.М. Петров опубликовал книгу «Подводные ландшафты: теория и методы исследования».

Особое место в изучении биологической структуры океана принадлежит географическому подходу. Его значение определяется присущей современной географии интегрирующей способностью объединять частные океанологические исследования (физические, химические, геологические, биологические) на базе представлений о природных комплексах — водных и подводных. Критерий географичности состоит в изучении объекта на двух уровнях организации одновременно — компонентном и комплексном. В океанологии исследования ведутся преимущественно на компонентном уровне. Однако, как подчеркивал один из первых энтузиастов применения географического подхода в океанологии академик В.Г. Богоров (1960), логика исследования океана на компонентном уровне неизбежно ведет к синтезированию разнородного материала, выяснению причинности явлений и их взаимных связей. Разрабатывая учение о биологической структуре океана, Л.А. Зенкевич и В.Г. Богоров использовали концепцию докучаевской географии. Структура и функции биологической системы океана определяются характером свойственного ему физико-географического процесса, который рассматривается как комплекс разнообразных ландшафтно-бионomических факторов. Основным результатом действия последних является регионализация океана на широтные (зональные), глубинные (поясные) и морфоструктурные (ландшафтные) природные комплексы.

Особую категорию представляют единицы внутриландшафтного подразделения. Природные комплексы любой размерности обладают своими биогеографическими особенностями. В последние десятилетия наблюдается плодотворное и взаимообогащающее развитие новых идей на стыке географии, биогеографии и экологии. По справедливому замечанию В.Б. Сочавы (1970), биогеограф-эколог, как и ландшафтовед, ведет исследования в трех измерениях: планетарном, региональном, топологическом. Планетарный экологический фон представлен региональными вариациями, а последние, в свою очередь, включают многочисленные топологические подразделения, вплоть до элементарных экосистем. Биосфера адекватна географической оболочке, биоценозы — внутриландшафтным природным комплексам.

В биогеографии океана определился ландшафтно-бионomический подход. С позиций гидробиолога ландшафты, например, подводные, сформировавшиеся на мелководье, являются определенными бионomическими типами морского дна, характеризующимися своими биоценотическими особенностями. Связь бионomии океана с биогеографией особенно ярко проявляется в общности подходов к изучению как глобальных закономерностей, так и особенностей структуры и функционирования природных систем на региональном и топологическом уровнях. Характеристика бентоса через познание ландшафтной структуры позволяет наиболее глубоко уяснитьсвязь донных биоценозов с условиями местообитания, определить за-

кономерности их распределения и выявить участки с типичными чертами биологической структуры.

Раскроем главные темы курса лекций «Биогеография океана: теория и практика региональных исследований»

ТЕМА 1. Биоразнообразие океанической биоты
ЛЕКЦИЯ 1. Мезо-кайнозойская история биосферы
* Триас
* Юра — мел
* Кайнозой
* Палеоген
* Неоген
* Четвертичный период (ледниковая эпоха)
* Голоцен
ЛЕКЦИЯ 2. Разнообразие биоты береговой зоны и шельфа Мирового океана
ЛЕКЦИЯ 3. Теория ареалогии
* Формирование ареала
* Континуальность и дискретность
* Роль естественных барьеров
* Эндемики и эндемизм
* Викариат и конвергенция
* Географические и генетические элементы биоты
* Типы ареалов
* Ареалогический принцип биогеографического районирования
ТЕМА 2. Физико-географический процесс как экологический фактор
ЛЕКЦИЯ 4. Тектоника как ведущий экологический фактор
* Тектоника плит
* Тектоника и рельеф как фактор ландшафтной дифференциации береговой зоны и шельфа
* Влияние региональных морфоструктур на обособление ландшафтов
в береговой зоне моря
* Тектоника как ведущий фактор формирования рельефа береговой зоны
ЛЕКЦИЯ 5. Гидрологические условия
* Солнечная радиация и температура
* Система господствующих ветров и течений
* Приливы
* Подводная освещённость
* Соленость
* Слой скачка
* Контактные зоны в океане
ЛЕКЦИЯ 6. Подразделение арены жизни в океане
ЛЕКЦИЯ 7. Экология гидробионтов
* Абиотические факторы
* Биотические факторы
* Морская биосистема (биогеоценоз)
ТЕМА 3. Принципы биогеографического районирования океана
ЛЕКЦИЯ 8. Главный биогеографический закон
* Зонобиомы Мирового океана
* Холодный пояс
* Умеренный пояс
* Теплый пояс
ЛЕКЦИЯ 9. Детальное ландшафтно-биономическое районирование экорегионов
* Ландшафтно-биономическое районирование экорегиона (на примере Чёрного моря)
* Концепция подводного ландшафта
ЛЕКЦИЯ 10. Подводный ландшафт и его морфологическая структура
* Морфологические единицы горизонтального подразделения
* Единицы вертикального подразделения
* Идея природного комплекса в смежных науках
ТЕМА 4. Региональные ландшафтно-биономические исследования
ЛЕКЦИЯ 11. Дистанционное изучение и картирование дна морских мелководий
* Природные условия дистанционного мониторинга дна морских мелководий
* Технические средства дистанционного мониторинга
* Дешифрирование дистанционных изображений
* Программа комплексных ландшафтно-биономических исследований
дна морских мелководий
ЛЕКЦИЯ 12. Баренцево море
* Ландшафтообразующая роль основных звеньев физико-географического процесса
в Баренцевом море
* Тектоника и рельеф
* Биономия моря
* Ландшафтно-биономическое районирование Баренцева моря
ЛЕКЦИЯ 13. Карское море
ЛЕКЦИЯ 14. Японское море
* Районирование береговой зоны Южного Сахалина
ЛЕКЦИЯ 15. Черное море
* Доминирующие типы подводных угодий
ЛЕКЦИЯ 16. Каспийское море
* Природные условия и ландшафты береговой зоны
* Подводный ландшафт и его морфологическая структура
* Доминирующие типы подводных угодий
* Ландшафт Бакинского архипелага
ТЕМА 5. Программа камеральных и экспедиционных исследований береговой зоны и шельфа

Заключение

Подводя итог рассмотрению актуальных задач подготовки специалистов для комплексного изучения береговой зоны и шельфа, нельзя не отметить, что сама постановка этого вопроса возвращает нас к фундаментальным основам отечественной морской науки.

Представленные программы курсов «Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты» и «Биогеография океана: теория и практика региональных исследований» не являются простым перечнем тем для лекций. В них, по существу, заложена целостная мировоззренческая платформа, опирающаяся на лучшие традиции русской географической школы — традиции, идущие от В.В. Докучаева, В.И. Вернадского, Л.А. Зенкевича и многих других корифеев, заложивших основы учения о природных комплексах.

Как справедливо отмечал В.Г. Богоров, логика исследования океана неизбежно ведет от покомпонентного анализа к комплексному синтезу. Именно этот синтез — соединение данных геологии, гидрологии, биологии и экологии в единую ландшафтно- биономическую картину — и составляет ядро предлагаемых курсов. Мы учим видеть за отдельными организмами и грунтами живую ткань подводного ландшафта, понимать законы её пространственной организации и функционирования. В этом смысле характеристика бентоса через познание ландшафтной структуры становится тем ключом, который открывает дверь к глубокому пониманию связей донных биоценозов с условиями местообитания.

Нельзя забывать и о прикладном значении такого подхода. Россия, как великая морская держава, владеет огромными акваториями, богатыми минеральными и биологическими ресурсами. Их рациональное освоение и охрана невозможны без квалифицированных специалистов, владеющих методологией комплексных исследований. К сожалению, приходится констатировать, что в последние десятилетия инфраструктура для подготовки таких кадров и проведения морских подводных работ была в значительной мере утрачена. Ликвидация специализированных лабораторий и факультетов, о которой говорилось в начале статьи, — тревожный симптом, свидетельствующий о недооценке стратегической важности морских исследований.

Новые учебные издания — пособие «Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты» (2023) и учебник «Биогеография океана: теория и практика региональных исследований» (2024) — призваны восполнить образовавшийся вакуум и послужить надежной основой для возрождения школы ландшафтно-биономического изучения морей России. Однако книги — лишь инструмент. Главное, чтобы они нашли отклик в умах и сердцах молодых исследователей, готовых продолжить дело, начатое их предшественниками. Ведь, как говорил В.Б. Сочава, биогеограф-эколог, подобно ландшафтоведу, обязан вести исследования в трех измерениях: планетарном, региональном и топологическом. И только освоив все три уровня, можно надеяться на то, что заветы классиков — от С.А. Зернова, впервые применившего понятие «фация» к морскому дну, до Е.Ф. Гурьяновой, связавшей подводные ландшафты с распределением донных биоценозов, — будут не только сохранены, но и приумножены.

Настоящие программы — это приглашение к диалогу и совместному творчеству. Они открыты для дополнений и уточнений, для обсуждения методов полевых исследований и подходов к камеральной обработке материалов. И хочется верить, что представленные здесь идеи найдут дорогу не только в университетские аудитории, но и в практику морских экспедиций, на суда и береговые лаборатории, где куется будущее отечественной океанологии. Только так мы сможем ответить на вызовы времени и обеспечить нашей стране достойное место в изучении и освоении Мирового океана.

Литература

1. Зенкевич ЛА. Биология морей СССР. М.: Изд-во АН СССР; 1960.
2. Зенкович ВП. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР; 1962.
3. Гурьева ЗИ, Петров КМ, Шарков ВВ. Аэрофотометоды геолого-геоморфологического исследования внутреннего шельфа и берегов морей. Л.: Наука; 1976.
4. Петров КМ. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. Л.: Наука; 1989.
5. Петров КМ. Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты: учебное пособие. СПб.: Изд-во РГГМУ; 2023.
6. Петров КМ. Биогеография океана: теория и практика региональных исследований: учебник. М.: АйПиАр Медиа; 2024.

УДК 910 *1941/1945* (94 (047) 084.8) || EDN: GQDDJJ
CC BY-NC 4.0
© А.А. Тишков; ФНИ «XXI век»

ПОЛИТИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕНОЦИДА МИРНОГО НАСЕЛЕНИЯ СССР В ПЕРИОД ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ

А.А. Тишков
Институт географии РАН, Москва, Россия
Эл. почта: tishkov@igras.ru
Статья поступила в редакцию 25.01.2026; принята к печати 06.03.2026

Рассмотрены вопросы географии геноцида на оккупированных в период Великой Отечественной Войны территориях СССР. Спустя 80 лет страна вернулась к этой проблеме с позиций выявления размаха явления. Истинные масштабы геноцида стали вскрываться только в XXI веке по мере открытия архивных материалов, работы поисковых групп и деятельности специальных комиссий Прокуратуры Российской Федерации. Показано, что политико-географические основы геноцида населения СССР были исходно заложены в государственной военной доктрине Германии и стран Третьего Рейха, базировавшейся на учении географов К. Хаусхофера и Ф. Рацеля, которые последовательно определяли будущее место Германии в геополитическом пространстве за счет военной экспансии и истребления гражданского населения Европейской части СССР. Подтверждается важная роль географии в оценке последствий и в анализе распространения геноцида, которые не могут сводиться только к ретроспективному уточнению статистики потерь. Выявлены пространственные особенности геноцида на оккупированных землях СССР (8,7% территории, 1,926 млн. км² с населением на 1941 год 84,852 млн. человек – 44,5% всего населения СССР. Анализ подтвердил, что проявления геноцида не были связаны непосредственно с продолжительностью оккупации, не носили стихийный характер, а состояли в осознанном и систематическом истреблении местного населения, заложенном в военную стратегию фашистской Германии, и имели четкие пространственные ориентиры – «освобождение жизненного пространства» – и нацистскую основу.

Ключевые слова: *геноцид советского народа, Холокост, Нюрнбергский трибунал, оккупированные территории, политико-географические основы, геополитическое пространство, рейхскомиссариаты, коллаборационисты, Белорусская ССР, Украинская ССР, северо-запад РСФСР, блокада Ленинграда.*

THE GEOGRAPHICAL AND POLITICAL ASPECTS OF THE GENOCIDE OF THE CIVILIAN POPULATION OF THE USSR DURING THE GREAT PATRIOTIC WAR

A.A. Tishkov
Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Email: tishkov@igras.ru

The issues of geography of genocide in the occupied territories of the USSR during the Great Patriotic War are considered. Eighty years later, Russia has returned to this issue in order to assess the extent of the phenomenon. The true scale of genocide started to be revealed only in the twenty-first century after archival materials have been published and the activities of search teams and special commissions of the Prosecutor's Office of the Russian Federation were disclosed. It is shown that the political-geographical foundations of the genocide of the population of the USSR were originally laid down in the state military doctrine of Germany and the countries of the Third Reich, based on the teachings of the geographers K. Haushofer and F. Ratzel, which consistently determined Germany's future place in the geopolitical space as achievable by military expansion at the expense of extermination of the civilian population of the European part of the USSR. The important role of geography in assessing the consequences and in analyzing the spread of genocide, which cannot be reduced to the retrospective clarification of loss statistics, is reaffirmed. The spatial features of genocide in the occupied lands of the USSR (8.7% of the territory, which makes 1,926 million km², with a population of 84,852 million in 1941, which makes 44.5% of the total population of the USSR) are revealed. The analysis confirms that the manifestations of genocide were not related directly to the duration of the occupation, nor were they spontaneous by their nature, but consisted of the deliberate and systematic extermination of the local population, as this is embedded in the military strategy of fascist Germany, and had clear spatial orientations – "living space liberation", and that their basis was Nazi.

Keywords: *genocide of the Soviet people, the Holocaust, Nuremberg Tribunal, occupied territories, political and geographical foundations, geopolitical space, Reichskommissariats, collaborators, the Byelorussian SSR, the Ukrainian SSR, the north-west of the RSFSR, the Siege of Leningrad.*

Введение

С 1 января 2026 года вступил в силу Закон «Об увековечении памяти жертв геноцида советского народа в период Великой Отечественной войны 1941–1945 годов»[1]. В 2025 году в России отмечали 80-летие Великой Победы, а ранее – в 2022 году – 80-летие создания «Чрезвычайной государственной комиссии по установлению и расследованию злодеяний немецко-фашистских захватчиков и их сообщников и причинённого ими ущерба гражданам, колхозам, общественным организациям, государственным предприятиям и учреждениям СССР (ЧГК)». Комиссия работала почти 10 лет (до 1951 года), собрала более 250 тыс. свидетельств о преступлениях нацистов, составила 56 тыс. актов о совершённых ими злодеяниях на оккупированных территориях Советского Союза. В рамках работы ЧГК в 1943–1947 годах было проведено более 20 крупных судебных процессов в разных городах СССР – Харькове, Краснодаре, Киеве, Минске, Риге, Ленинграде, Смоленске и др. – над нацистами и их пособниками, совершившими преступления против местного населения. На момент прекращения деятельности комиссии было известно об уничтожении миллионов мирных жителей оккупированных территорий, что уже тогда, с учетом наследия Нюрнбергского процесса, можно было приравнять к преступлениям геноцида. Однако до сих пор для оценки потерь гражданского населения в 1941–1944 годов на оккупированных территориях надежная статистика отсутствует. Ежегодно в результате обнаружения и вскрытия новых захоронений войны и рассекречивания архивных материалов всплывают новые факты.

То, что научными вопросами геноцида занимаются преимущественно историки, наводит на мысль, что и оценки потерь, и характер самого явления на оккупированных территориях СССР будут сводиться к статистике и хронологии событий без учета важнейших политико-географических заключений. В материалах Нюрнбергского трибунала однозначно отмечено, что геноцид это «… преднамеренное и систематическое истребление расовых и национальных групп гражданского населения на *определенных оккупированных территориях*…» (п. С, ст. 6 Устава Нюрнбергского трибунала), а в Конвенции ООН «О предупреждении преступления геноцида и наказания за него» (1948) выделена необходимость судебного разбирательства именно *на территориях, где совершено преступление,* что и происходило в СССР сразу после ВОВ. В последние годы в связи с активным вовлечением в анализ новых материалов по географии мест массовых казней местного населения в период оккупации картина геноцида становится все более масштабной и существенно дополняет данные ЧГК конца 1940-х годов. Этому способствует и рассекречивание материалов расследований по случаям геноцида, которые были представлены обществу к 70-летию и 80-летию Великой Победы. В 2025 году Генеральная прокуратура Российской Федерации объявила об издании 2-томного «Сборника материалов» [1] о работе органов прокуратуры Российской Федерации по подготовке, организации и участию в судебных процессах о признании военными преступлениями, преступлениями против человечности и геноцидом народа Советского Союза установленных и вновь выявленных преступлений, совершенных против мирного населения и военнопленных немецко-фашистскими захватчиками и их пособниками в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 годов на территории СССР.[1]

Отметим также, что комплексно, с привлечением статистических и пространственных данных обо всех случаях проявления геноцида на оккупированных территориях СССР в период 1941–1945 годов даже **в объемных трудах о потерях в Великой Отечественной Войне [2] вопрос геноцида с политико-географических позиций не рассмотрен**. Исключение составляют детальнейшие сведения о холокосте на оккупированных землях [3, 4] с картами, пространственной привязкой всех случаев проявления и статистическими данными, подтвержденными соответствующими архивными документами.

Сравнительно полно к 80-летию Великой Победы вопрос рассмотрен и в отношении мирного населения Белорусской ССР, наиболее пострадавшей от немецких, литовских и украинских карателей в период Великой отечественной войны, где 3 млн местного населения было убито в рамках карательных операций (140), в лагерях (около 260) и в гетто, сожжено 9500 сел и деревень, полностью разрушено 200 городов [5].

Много новых уникальных данных получено в отношении местного русского населения оккупированной Карелии, более 20% которого оказалось в период 1941–1944 годов именно по расовым признакам в 100 концентрационных лагерях, около 86 тысяч – были убиты и погибли от истязаний и голода [6]. В последние годы стала более полно выявляться картина геноцида населения Крымской АССР, где нацисты и их пособники в период оккупации уничтожили практически каждого десятого мирного жителя [7, 8]. По большинству оккупированных регионов данные по пространственным масштабам и закономерностям геноцида мирного населения, несмотря на то, что прошло более 80 лет, до сих пор остаются не полными и ежегодно уточняются. Яркий пример – ситуация на оккупированных землях древнего российского региона – Новгородской области (в годы оккупации большая часть территории входила в состав Ленинградской области), где тысячи населенных пунктов, включая Новгород, были полностью уничтожены, а

[1] https://khorinsk.gosuslugi.ru/dlya-zhiteley/novosti-i-reportazhi/novosti_1277.html

население (около 300 тысяч) истреблено немецкими, испанскими, литовскими, латышскими и эстонскими карателями или угнано в Германию, Эстонию и Латвию [9, 10].

Цель настоящей статьи – используя исторические[2] и современные[3,4] данные о геноциде местного населения на оккупированных территориях СССР выявить его географические особенности, пространственные масштабы и закономерности и обосновать необходимость дальнейшего его рассмотрения как научной политико-географической проблемы.

Уточним, что следует различать прямые геноцидные действия – целенаправленное уничтожение населения оккупированных территорий, и ущерб населению, вызванный направленным разрушением природной среды и экологическими последствиями военных действий. К сожалению, получить такие данные ретроспективно невозможно, но пример современной ситуации на Донбассе и Новороссии показывает, что и эти вопросы важны при рассмотрении географических аспектов геноцида.

Статистика и расчеты потерь мирного населения на оккупированных землях

Данному вопросу посвящены публикации [11–15] и многие другие. Накануне 80-летия Великой Победы уточнения статистики потерь мирного населения на оккупированных землях СССР и непосредственно геноциду рассмотрены в специальных публикациях [1, 2, 16–18 и др.]. Как бы не убеждали авторы в точности своих оценок и расчетов потерь именно мирного населения в период ВОВ на основе сравнения демографических показателей, представления об абсолютных величинах и их приуроченности к определенным географическим точкам и регионам меняются.

Такие цифры не могут быть точными в связи с тем, что и у оккупантов, и у ГЧК, и у современных авторов гражданские потери обычно включают военнопленных, перемещенных лиц и т.д. Трудно объединить жертв карательных операций, плановых бомбардировок мирных городов (только в Ленинграде, Киеве, Минске, Сталинграде, Смоленске, Великом Новгороде и других городах погибло в результате бомбежек суммарно несколько сот тысяч мирных граждан) и умерших от истязаний в концлагерях, от голода, на принудительных работах в Германии. До сих пор не оценены потери пациентов, которых не успели эвакуировать вместе с медицинскими учреждениями, в том числе психиатрическими, которые были уничтожены оккупантами полностью. Кроме того, как мы знаем, цифры гражданских потерь не всегда попадали в статистику отдельно. Сами же оценки людских потерь менялись по мере отдаления от событий ВОВ коренным образом.

В 1946 году И.В. Сталин дав первые идеологически выдержанные оценки – всего 7 млн человек (для внутреннего пользования – 15 млн), затем после работы ЧГК и дополнительных оценок эта цифра была доведена до 16 млн 392 тысяч человек (из которых мирного населения на оккупированных территориях было 6 млн 716 тысяч человек), а уже во времена Н.С. Хрущева и Л.И. Брежнева была озвучено и на долгие десятилетия закреплена оценка потерь в 20 млн [13].

В начале перестройки в годы правления М.С. Горбачева в 1989 году была создана «Государственная комиссия по исследованию числа человеческих потерь СССР в Великой Отечественной войне» с участием представителей РАН. Она определила и озвучила в 1990 году на заседании Верховного совета СССР суммарные потери в 26,6 млн. чел. Эта цифра сохранялась и при Б.Н. Ельцине. В этот период наметился всплеск интереса к проблеме, и появились сотни независимых оценок общих потерь во время ВОВ – от 20 до 40 млн [12, 13], с закономерно превосходящими потерями мирного населения над военными.

Для сравнительно-географического анализа оценок людских потерь 1941–1944 годов на оккупированных территориях мы использовали только официальные данные о прямых потерях: гибель при проведении военных операций, расовых чисток, при уничтожении населенных пунктов, в том числе при бомбежке городов (например Сталинграда – уничтожено почти 40 тысяч жителей), в результате массовых казней, смерти от голода, смертей в блокадном Ленинграде (до 1,5 млн человек) и в концентрационных лагерях, умерщвление пациентов больниц и др.

Накануне 80-летия Великой Победы в 2024 году Библиотека МГПУ опубликовала аннотированный список публикаций «Геноцид советского народа в годы Великой Отечественной Войны», включающий 120 страниц [16], а Росстат представил в 2025 году обновленные данные о людских потерях в период войны – «Великая Отечественная Война. Цифра Победы»[5], где при сохранении суммарной оценки потерь *в 26,6 млн. чел., уточнены гражданские потери – 13,7 млн. человек, в том числе. 7,4 млн были намеренно истреблены, 2,1 млн погибли на принудительных работах в Германии, а 4,1 млн умерли от условий жизни во время оккупации.* Кроме того, к юбилею опубликованы новые материалы Прокуратуры Российской

[2] https://prokuratura.gov.by/ru/activity/rassledovanie-ugolovnogo-dela-o-genotside/iz-materialov-ugolovnogo-dela/akty-chrezvychaynoy-gosudarstvennoy-komissii/

[3] https://khorinsk.gosuslugi.ru/dlya-zhiteley/novosti-i-reportazhi/novosti_1277.html

[4] https://expert.ru/obshchestvo/rosstat-raskryl-dannye-poter-v-velikoy-otechestvennoy-voyne/

[5] https://rg.ru/2025/05/05/vyshel-tretij-sbornik-velikaia-otechestvennaia-vojna-cifry-pobedy.html

Федерации по геноциду [1, 18]. И во всех случаях присутствует важная информация по географии преступлений.

Главная особенность большинства прошлых и современных оценок людских потерь СССР в период Великой Отечественной Войны состоит в том, что в них *преобладают потери мирного населения на оккупированных территориях*. Причем эта закономерность прослеживается и у отечественных авторов, имеющих доступ к новым, постоянно открывающимся источникам информации, и у зарубежных исследователей [19]. Это свидетельствует о том, что в целях и стратегических планах Третьего Рейха в отношении СССР доминировали политико-географические позиции, связанные с геноцидом населения и освобождением «жизненного пространства».

Особо отметим первые оценки, проведенные в рамках деятельности ЧГК, в некоторых актах которой были объединены данные об уничтоженных мирных гражданах вместе с военнопленными, отсутствовали указания на число мирных граждан, уничтоженных в период эвакуации. Для многих регионов выявлены новые факты и новые места захоронения и массового уничтожения мирных жителей. Причем для некоторых из них, например, для Псковской, Новгородской, Ленинградской, Тверской (Калининской), Ростовской областей, Краснодарского и Ставропольского краев и Республики Крым дополнения столь существенные, что меняется сама возможная интерпретация количественных оценок потерь.

Чтобы не давать критикам-историкам повод для обвинений автора в незнании современной литературы по рассматриваемой проблеме, например известных работ по истории Великой Отечественной Войне академических и военных историков – В.А. Золотарева, А.В. Исаева, Ю.А. Петрова, К.А. Залесского, А.Ю. Сидорова и многих других, в также издания «Великая Отечественная война 1941–1945 годов в 12 томах.» под редакцией С.У. Шойгу, подчеркну, что они знакомы автору, но, на мой взгляд, не несут дополнительной информации для анализа политико-географических проблем геноцида.

Может быть, автору-географу удастся направить обсуждение проблемы геноцида от историко-статистического и демографического стереотипа в русло его мотивации врагом – «борьба за пространство и ресурсы». Эта угроза как никогда актуальна в наши дни, и есть ее примеры в современной политике стран Запада, которые менее чем на 50% (как и накануне войны у Германия и союзников) обеспечены потенциалом природного капитала и жизненного пространства для экономического развития (наши оценки). Здесь следует отметить геноцид местного населения в связи с ландшафтно-экологическими последствиями уничтожения природной среды и их аналогии с современной ситуацией в ДНР, ЛНР, Херсонской и Запорожской областях и проявлениями геноцида в районах Курской и Белгородской областей, аналогичными фактам геноцида местного населения и уничтожению природных комплексов с начали с 2014 года и особенно после 2022 года.

Политико-географический взгляд на геноцид населения СССР в период Великой Отечественной Войны

Выход в свет в 2016 году перевода книги Роберта Каплана «Месть географии» [20], в которой с позиций жесткого географического детерминизма говорится о месте политической географии в жизни государств, в определении целей и стратегий их развития, идеологии и формирования геопространства, вынудил меня вспомнить применительно к проблеме геноцида советского народа во время Великой Отечественной Войны работу В Г. Маккиндера [21] с его геополитической теорией «heartland» – «срединной земли», «оси истории» в Евразии, ассоциированной с территорией Российской империи/СССР. Накануне Великой Отечественной Войны в Советском Союзе практически отсутствовала политическая география как наука, способная формировать основы устройства и сохранения геополитического пространства страны. Ее подменяли в некотором смысле идеология и директивные решения в отношении границ, национальных автономий, пространственного развития и международного сотрудничества. Достаточно посмотреть на политико-административное устройство СССР в 1920–1930-х годах, чтобы понять слабость геопространственных моделей развития того времени. Ленинская модель политико-географического устройства СССР с его же делением страны на экономические районы и национальные образования не была адаптирована к современности, тем более – к противостоянию Третьему рейху и его южных (Турция) и восточных (Япония) союзников. А академическая география в отношении государственных границ, внешних угроз и конфликтов в те годы развивалась в соответствии с директивными указаниями, а точнее – практически не развивалась.

Издержки отсутствия адекватных политико-географических решений сказались на возникновении советско-финского военного конфликта 1940 года, на слишком поздних геопространственных стратегических решениях в отношении «западных территорий», что в дальнейшим с началом войны создало условия для массового коллаборационизма в связи с ограниченными масштабами эвакуации населения с занимаемых врагом территорий.

Чтобы понять политико-географические аспекты генезиса геноцида населения СССР на оккупированных Третьим Рейхом землях, надо вернуться к развитию политической географии Германии после

Первой Мировой войны. Немецкая геополитика в то время развивалась на основе политической географии Ф. Ратцеля, который, рассматривая государство как биологический организм, действующий согласно биологическим законам, вывел теорию *«пространственного роста государства» – «растущий народ нуждается в новых землях для увеличения своей численности».* Нации с растущим населением, которому требуется больше территории, должны завоевать ее, превратив в необитаемую *«через убийство и перемещение»* [22]. Ранее в книге «Der Lebensraum» он обосновал, что растущее население Германии и Европы в целом особенно нуждалось в колониях, но не за океаном, а здесь, в Евразии – «heartland». Эта концепция стала важным элементом восстановления немецкой уверенности в своем превосходстве и обоснования захватнических целей войны с СССР. Практически все общество стало жить новыми идеями политической географии о необходимости «жизненного пространства» – «Lebenstraum». Ключевыми понятиями в немецком обществе в предвоенные годы стали «кровь и почва», «сила и пространство», «народ без пространства», «большое пространство», «осознание границ», «новый порядок».

Прародителем немецкой геополитики и идеологом собственно нацистского экспансионистского проекта был выдающийся географ Карл Хаусхофер – президент Немецкой академии наук. Он поддерживал Гитлера в агрессии против СССР, в идее захватить «heartland», а отдельные главы «Main Kampf», по мнению Р. Каплана [20] были написаны под прямым влиянием идей К. Хаусхофера. Основанный на его работах проект гитлеровской экспансии (*«планируемый геноцид»* народов СССР) лег и в основу «плана Бакке» и «плана «Ост», которые должны были реализоваться в трех основных направлениях: (1) полное господство в Центральной и Восточной Европе, перекраивание восточно-европейских границ, уничтожение и выселение в Сибирь 20–30 млн человек населения европейской части СССР, устранение здесь «этнической неоднородности» (уничтожение славян, евреев, цыган, татар, представителей кавказских народов и т.д.), как возможного *«разрушающего фактора»*; (2) «проникновение на Восток» для приобретения «недостающего жилого пространства», геостратегических, транспортных, сырьевых, аграрных и промышленных областей, необходимых Третьему рейху, в первую очередь захват славянских земель на востоке и юго-востоке; (3) определение нового мирового порядка и убеждение мировой общественности в справедливости его создания (по сути – одна из моделей однополярного мира).

Это было в преддверии 2-й Мировой войны. А через 80 лет после Победы СССР в Великой Отечественной Войне начался, как мы сейчас видим, новый виток европейской истории с географией, обоснование расширения «жизненного пространства на Восток», перекройка границ, планы разделения России и по сути захвата новых земель и ресурсов, в том числе через геноцид (не будем приводить цитаты некоторых европейских политиков уже третьего десятилетия XXI века и их постоянную русофобскую риторику). И игроки – те же: практически вся Европа, но теперь объединившаяся не вокруг Третьего Рейха – фашистской Германии, а вокруг НАТО. Как и накануне нападения на СССР всплывают политико-географические мотивы таких европейских геополитических игроков, как Польша с ее планами *Великой Польши* «*Пильска Инперша от може до може*», *Великой Румынии* с землями Молдовы и некоторыми украинскими территориями, *Великой Финляндии (Suur-Suomi)* с территориями Карелии и Архангельской области до Урала, *Великой Украины (Велика Україна)* с включением многих исторических русских земель, Норвегия с ее идеей «*поморской идентичности» в Баренцево-Евро-Арктическом регионе*. Практически во всех этих случаях подразумевается освобождение территории от коренного населения России, то есть по сути геноцид. А значит, идеология неоколониализма спустя 80 лет после Победы сохраняется. И исследовать его возрождение должны не только историки, но и географы. Тем более, что возрождение отечественной политической географии начинается на таком фоне, который требует ее оперативного включения в практику принятия решений на государственном уровне. Например, известная еще со времен З. Бжезинского карта «разделения СССР» почти совпадала с картой рейхкомиссариатов «гражданского» управления оккупированных во время ВОВ земель СССР, где Прибалтика, Белоруссия, Украина, Кавказ выступают самостоятельными государственными образованиями, а на европейской части создается маленькая «Россия» (без Санкт-Петербурга и многих черноземных земель).

Пространственно-временной вектор геноцида мирного населения на оккупированных землях

Дополнительным аргументом в пользу признания преднамеренного уничтожения мирного населения оккупированных земель СССР геноцидом является и тот факт, что оно началось сразу с началом военных действий и продолжалось без остановки вплоть до освобождения оккупированных территорий. Напрямую количество жертв и динамика потерь с продолжительностью оккупации связана только в случае с нарастающей гибелью мирного населения от голода, например в блокадном Ленинграде[6].

[6] https://spb.aif.ru/society/people/blokada_v_cifrah_strashnaya_statistika_iz_osazhdennogo_leningrada

Площадь временно оккупированных территорий СССР в период ВОВ была максимальной в сентябре 1942 года – 1 926 тыс. км^2, то есть 8,75% площади страны (рис. 1), но к 7 ноября 1944 года все они были освобождены (рис. 2), кроме так называемого «курляндского загона» (на территории Латвийский ССР), который де-юре освободили 8 мая 1945 года. В период максимальной оккупации ее восточная граница проходила по диагонали от западных районов Карело-Финской АССР через восточные территории Ленинградской, Калининской, Московской областей, города Воронеж, Сталинград и аулы Ногайского района Дагестана. Акты геноцида зафиксированы повсеместно.

Единовременный максимум населения под оккупацией Германией и ее союзниками (на юге – Румынией, на севере – Финляндией) составлял 84,852 млн чело-

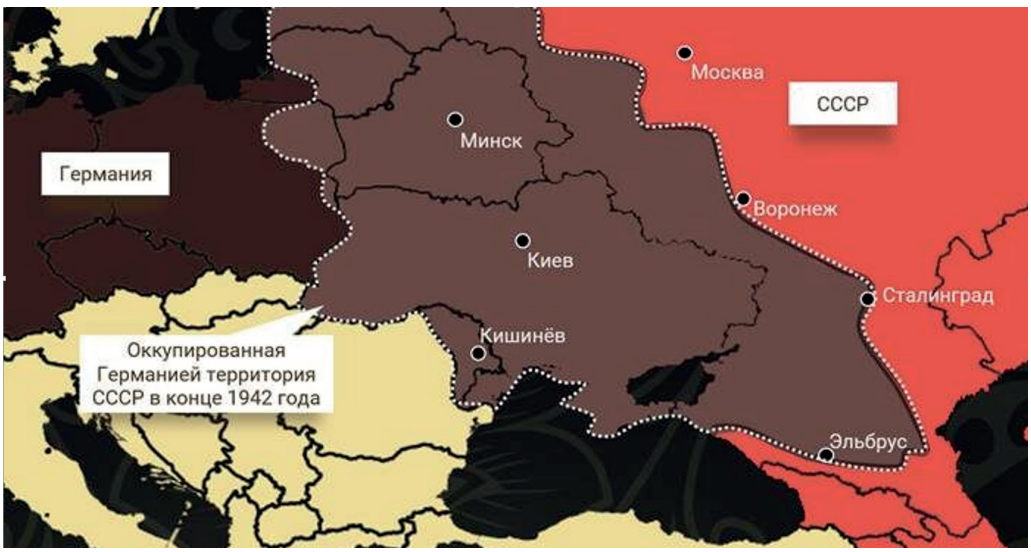


Рис. 1. Положение линии максимальной по площади оккупации Европейской части СССР на сентябрь 1942 г. По открытым источникам интернета.

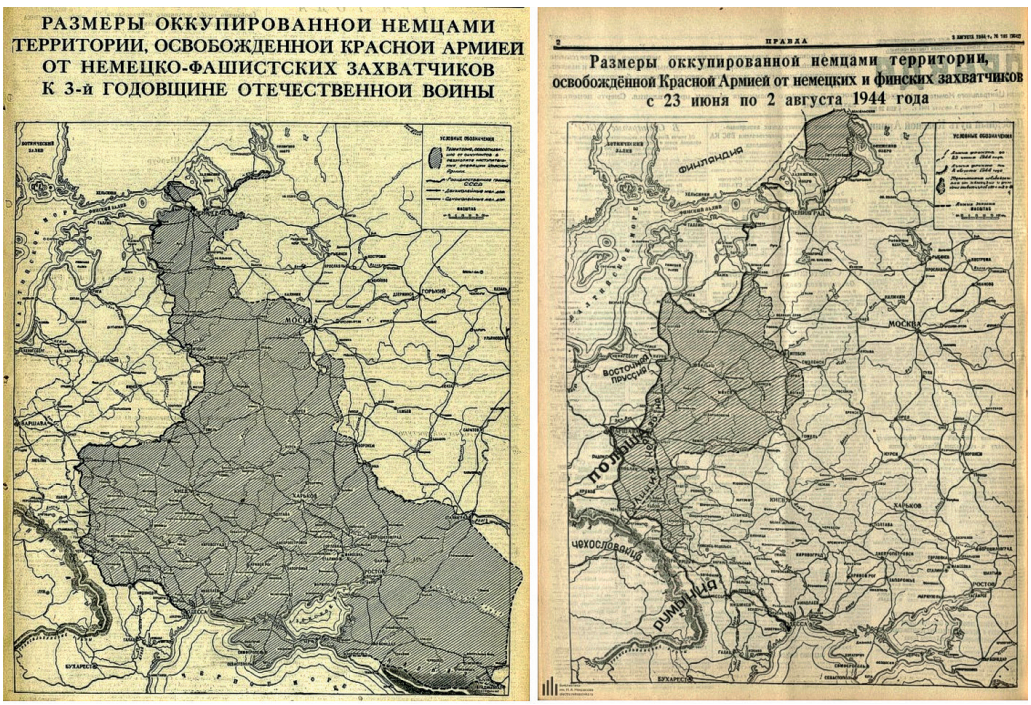


Рис. 2. Освобожденные от немецко-фашистских захватчиков оккупированные территории СССР 22 июня 1944 года (слева) и с 23 июня по 2 августа 1944 года (справа). Источник: газета Правда, 23 июня 1944 года, 3 августа 1944 года)

век – 44,5% населения СССР [12, 17, 23]. Уничтожение мирного населения начиналось согласно планам оккупации сразу, происходило осознанно и включало как прямые (массовые казни, уничтожение людей вместе с жильем и так далее), так и косвенные действия (помещение в концлагеря и гетто, создание условий для голода и болезней, принудительная депортация в Германию и другие страны.

Географический и политико-административный вектор геноцида мирного населения на оккупированных землях СССР 1941—1944 годов

В основе всех действий захватчиков (немцев и их союзников – французов, итальянцев, испанцев, румын, финнов и др.) и коллаборационистов (литовских, латвийских, эстонских, украинских и др.) в отношении местного населения в период оккупации лежали идеи захвата земель и ресурсов, «освобождения/расширения» жизненного пространства для жизни. В соответствии с этим строилась политико-административная организация оккупированных земель, которые были разделены на области гражданского и военного управления. В них среди основных функций управления выделялись карательные функции, направленные по сути на геноцид населения. Это следует из того, что еще до начала войны с СССР Германия сформировала 18 комендатур тыла, 58 полевых комендатур и 181 гарнизонную комендатуру. Они подчинялись так называемому Восточному министерству, осуществляющему военное управление оккупированными землями [24]. Непосредственно в областях гражданского управления были созданы «рейхскомиссариаты». Планировалось, что на оккупированных территориях СССР таких будет пять. Их главная задача была проводить политику германизации и готовить территорию к присоединению к Третьему Рейху. Фактически за период оккупации было создано только 2 рейхскомиссариата – «Остланд» с округами Белоруссия, Литва, Эстония и «Украина» с округами Волыно-Подольский, Николаевский, Таврический и др. (в планах были еще – Воронежский, Ростовский, Саратовский). Третьей формой политико-административного вектора с особым режимом карательных действий были «псевдогосударственные образования» на территориях Прибалтики и Молдавской ССР и юга-запада Украинской ССР. Там действовали госсоветы (Литва), генеральные директораты (Латвия, Эстония), губернаторства (Бессарабия и Транснистрия). Отличительной чертой геноцида практически во всех областях «гражданского» управления оккупированных земель СССР, на наш взгляд, является более высокий уровень истребления местного населения (по сравнению с областями военного управления) и доминирующее участие коллаборационистов в этом. Последних, объединенных в подразделения Вспомогательной полиции и другие военные и полицейские образования, к 1943 году насчитывалось более 330 тыс. человек [24].

Поиски пространственных закономерностей в проявлении геноцида снимают все попытки объяснить высокие потери мирного населения на оккупированных территориях СССР *только ответными карательными действиями* против широкого партизанского движение и работы подполья. Например, в качестве ключевых исполнителей борьбы с партизанами и подпольем выделяются *айнзатцкоманды и гестапо*, численность которых по разным оценкам составляла до 40 тыс., на руках которых миллионы жертв мирных граждан. Наша точка зрения такая: репрессии и уничтожение «лишнего» населения были заложены исходно в задачи германизации и присоединения этих территорий к Третьему Рейху. Как доказательство – проявления геноцида на территориях, где деятельность подполья и партизанского движения, особенно в первый период оккупации, отсутствовала, а казни и репрессии в отношении мирного населения определенных национальностей и социальных групп проходили сразу. Представлять айнзатцкоманды и гестапо единственными исполнителями планов Третьего Рейха в отношении «очистки территории» от лишних людей не следует.

Выявляемые пространственные особенности геноцида на оккупированных территориях СССР в период 1941–1944 годов имели следующие особенности.

Первое – проявление геноцида было повсеместным, но с разными масштабами и интенсивностью, не зависящими от продолжительности оккупации. Это лишний раз доказывает, что геноцид был осознанным и был направлен конкретно на выполнение политико-географической доктрины Германии. Примером может служить карта массовых казней, гетто и концлагерей, подготовленная Научно-просветительским центром «Холокост»[7], и карта уничтожения гражданского населения Белоруссии[8], где за время оккупации было уничтожено не менее 3,0 млн мирных жителей, почти 10 тыс. деревень и сел, из которых около половины (4667) уничтожено с частью жителей, а 628 деревень сожжено вместе со всеми жившими в них людьми, то есть картографирование мест геноцида сводилось бы к нанесению на карту уничтоженных деревень (Рис. 3). Аналогичную ситуацию демонстрирует и распространение мест массового уничтожения населения оккупантами в Ленинграде и Ленинградской области [25]. Последние примеры демонстрируют то, что о пространственных закономерностях геноцида можно говорить условно – он был всюду.

[7] https://vk.com/photo-46237292_457239652

[8] https://dzen.ru/a/ZidgEuzwf3O6hQ8I



Рис. 3. Места массового уничтожения мирного населения на территории Белоруссии[9]

Второе – выявляются территории с наибольшей плотностью геноцидных действий. Они приурочены (а) к окраинным приграничным землям – западные и северо-западные территории (Карелия, Ленинградская, Новгородская, Псковская, Смоленская области, Белорусская и Украинская ССР), (б) к южным и черноземным аграрным областям РСФСР с высокой плотностью населения (Курская, Белгородская, Брянская, Воронежская и Ростовская области, Крымская АССР), (в) к историческим областям «оседлости» еврейского населения в Российской Империи [4], где выявляется собственно так называемая «ось Холокоста» на оккупированной территории европейской части СССР, (г) к областям с высокой интенсивностью партизанского и подпольного движения (Белоруссия, Смоленская и Калининская области, Донбасс…) и (д) к городам с многонациональным составом населения – республики Прибалтики, Белорусской ССР, восточные и южные области Украинской ССР, Крымской АССР, южные области РСФСР, включая Северный Кавказ.

В.Г. Кикнадзе [17] уточнил и цифры и географию геноцида на оккупированных землях СССР в 1941–1944 годах. При этом он отметил, что юридически по результатам судебных процессов в субъектах Российской Федерации, где установлено преступление, потери местного населения составили 6 млн 350 тыс. В Заявлении Госдумы Российской Федерации от 22 марта 2023 года представлена общая цифра потерь местного населения в ВОВ – 13 млн 685 тыс., а исторически обоснованное количество с учетом всех потерь – 19 млн 800 тыс. [17]

[9] https://dzen.ru/a/ZidgEuzwf3O6hQ8I

Именно такой подход позволяет до конца понять «географию геноцида» на оккупированных землях СССР в 1941–1944 г. и оценить возможные последствия полной реализации первого этапа планов Гитлера, подразумевавшего захват земель европейской части СССР по линии Архангельск, Казань, Астрахань, Азербайджана и Грузии. И для этих регионов планировались карательные акции на всех «освобожденных территориях».

Национальный вектор геноцида мирного населения на оккупированных землях СССР

Национальный вектор геноцида определяется не только национальным составом его жертв, но и составом тех сил Третьего Рейха и коллаборационистов, которые проводили акции геноцида. В первом случае большую роль играет историко-географический фактор. Например: приуроченность многих территорий геноцида (1) к районам оседлости еврейского населения царской России, (2) к областям принудительной полонизации населения на Западной Украине («волынская резня» и др.), (3) к исторически сложившимся местам массового проживания цыган на территории Украинской ССР, Молдавской ССР, в Смоленской, Ленинградской и Псковской областях, (4) к районам широкого распространения партизанского движения в Белорусской ССР, Смоленской, Тверской (Калининской) областях и других западных областях СССР, (5) к районам, планируемым для оперативного переселения населения Германии на «освобожденные земли», (6) к некоторым черноземным областям (Ростовская и другие области) и Крымской АССР.

Понятно, что нельзя массовое уничтожение гражданского населения на оккупированных землях СССР в 1941–1944 годах сводить только к холокосту [3, 4] или, как это делается в некоторых изданиях [26], к геноциду славянских народов по нацистскому плану Ost, согласно которому уничтожению и переселению на восток подлежало 85% населения оккупированных земель европейской части СССР. Сравнительно-географический и статистический анализ потерь мирного населения на оккупированных землях в 1941–1944 годах демонстрирует иное. Наиболее показательные примеры:

– уничтожение многонационального мирного населения Ленинграда во время блокады (по разным оценкам около 1,5 млн человек) и населения ленинградских пригородов (как демонстративной акции «освобождения» территорий для переселения «правильных людей» из Германии и ее союзников);

– миллионные потери мирного населения Украинской ССР и Белорусской ССР, среди которых преобладали жертвы, относящиеся к титульной нации, и евреи [2, 15];

– гибель мирного населения на территории Краснодарского края, важного для фашистской Германии плацдарма захвата Кавказа, где массовые расстрелы и истребление населения в походных газовых камерах происходило в населенных пунктах с многонациональным составом населения (в Новороссийске 7– 000 человек, в Майкопе – 2056, в Тихорецке – 600, в Крымском – 1558, в станице Белореченская – 272, в станице Усть-Лабинская – 400) [18];

– уничтожение мирного населения Калининской (ныне Тверской) области, находящейся более двух лет под оккупацией, где полностью разрушено около 9 тыс. населенных пунктов, 1400 школ, 120 детских садов, 380 больниц, убито более 65 тыс. человек, около 23 тыс. человек угнано в Германию[10].

Все проявления этой стороны национального вектора геноцида на оккупированных землях СССР в 1941–1944 годах, когда жертвами идеологической и расово-религиозной ненависти стали миллионы людей, надо тщательно проанализировать. Они не должны исчезнуть бесследно для общественного сознания. Их сохранением и занималась Генеральная прокуратура России и ее региональные подразделения накануне 80-летия Великой Победы [1, 18].

Второе направление национального вектора геноцида на оккупированных землях СССР в 1941–1944 годах связано с национальным составом карателей. Если в первые годы после освобождения оккупированных территорий на так называемых «советских Нюрнбергах» (Краснодар, Харьков, Рига, Минск, Ленинград, Киев, Ростов и др.) по решениям судов казнили преимущественно немецких нацистов, руководителей зондеркоманд СС, айнзацгрупп и пр., то после открытия архивов и по результатам специальных расследований стали всплывать и факты участия представителей других стран и народов.

Во-первых, это украинские, прибалтийские (эстонцы, латыши, литовцы) и белорусские коллаборационисты. Во-вторых, воинские соединения союзников Германии – Финляндии (участие в блокаде Ленинграда, массовые казни и создание концлагерей в Карелии), Румынии (участие в карательных операциях в Одесской области, в Крымской АССР и на Кавказе), Венгрия («Карпатская группа», участие в карательных операциях против мирного населения Украинской ССР, Воронежской и Брянской областей), Испании («Голубая дивизия» участвовала в блокаде Ленинграда и уничтожении мирного населения Ленинградской, Новгородской и других областей), Италии (участие в карательных операциях на территории Украинской и Молдавской ССР), Хорватия (помимо геноцида сербов на Балканах в СССР отметилась участием в борьбе с партизанами и в казнях мирного населения: «Хорватский легион» отличился в Воронежской, Сталинградской, Донецкой, Полтавской и других областях).

На счет перечисленных выше исполнителей актов геноцида против мирного населения можно записать миллионы жертв, особенно на счет украинских, эстонских (Эстонская дивизия СС «Эстланд»), латышских (Латышский легион СС) и литовских (отдельных литовских национальных военных образований не было, но это не исключает участие литовцев в карательных операциях) коллаборационистов, которые участвовали в массовых казнях и других акциях против мирного населения не только на своих землях, но и на соседних территориях.

Так, Организация Украинских Националистов (ОУН), на счету которой сотни тысяч убитых мирных евреев, украинцев, поляков и русских и тысячи сожженных с людьми деревень, действовала не только на Западной Украине, но и составляла костяк карательных органов Германии на других оккупированных территориях. Прибалтийские коллаборационисты «отметились» в массовых казнях евреев, белорусов, русских, украинцев и в уничтожении деревень Псковской, Новгородской, Ленинградской областей, в Украинской, Белорусской.

Национальный аспект, как и представления об особенностях пространственного проявления геноцида важны для его правильного понимания этого фрагмента истории при нарастающем использовании искусственного интеллекта для его воспроизведения в условиях тенденциозности и откровенных подтасовок[11].

[10] https://tver.aif.ru/society/details/priznat-genocidom-v-tverskoy-oblasti-zavershilsya-istoricheskiy-process

[11] https://topwar.ru/179177-poteri-sredi-mirnogo-naselenija-v-19411945-fejki-i-fakty.html

Заключение

Оккупация территорий Европейской части СССР в период Великой Отечественной Войны охватывала максимально 1926 тыс. км^2, то есть 8,75% площади страны с населением около 88 млн человек и продлилась для разных регионов от года до трех лет. По разным оценкам потери гражданского населения здесь в абсолютных и относительных цифрах превышали военные потери и были настолько велики, что позволяют квалифицировать действия Германии и ее союзников как геноцид мирного населения.

Методологически в основу нашего анализа, выполненного с позиций политической географии, были взяты официальные согласованные на 2025 год оценки общих потерь в войне – 26,6 млн человек, уточненные гражданские потери – 13,7 млн человек, в том числе 7,4 млн были намеренно истреблены во время карательных операций, 2,1 млн погибли на принудительных работах в Германии, а 4,1 млн умерли от условий жизни во время оккупации.

К этому можно добавить и несколько сот тысяч мирных жителей, погибших в городах и других населенных пунктах при их бомбежках в 1941–1944 годах (например в Киеве, Минске, Одессе, Ленинграде, Сталинграде и др.).

В основе всех действий в отношении мирного населения СССР у оккупантов (немцев, французов, итальянцев, испанцев, румын, финнов и др.) и коллаборационистов (украинских, литовских, латвийских, эстонских и др.) лежали нацистские идеи «освобождения/расширения» жизненного пространства. Они были сформулированы крупными немецкими политико-географами К. Хаусхофером и Ф. Ратцелем. Их идеями Германия руководствовались, планируя карательные операции на оккупированных землях, находящихся под гражданским и под военным управлением, для чего еще до начала войны с СССР были созданы специальные государственные службы, комендатуры и военно-полицейские подразделения, а с началом войны еще и специальные команды из местных коллаборационистов.

Нами выявлены некоторые политико-географические особенности геноцида на оккупированных территориях СССР в период 1941–1944 годов, касающиеся собственно временно*г*о, пространственного и национального векторов преднамеренного уничтожения местного населения для перемещения немецких колонистов и расширения земель для экспансии некоторых союзников. Поэтому проявления геноцида на оккупированных территориях СССР, предназначенных для новых поселенцев, были повсеместными, но с разной интенсивностью и масштабами, не зависящими от продолжительности оккупации. Это доказывает, что геноцид был не спонтанным (например, как ответ на партизанское и подпольное движения), а осознанным и направленным конкретно на выполнение политико-географической доктрины.

Выявляются территории с наибольшей плотностью геноцидных действий, приуроченные к землям будущих немецких поселений – Прибалтика, Беларусь, Украина, Крым, юг европейской России; к окраинным приграничным землям на западе и северо-западе (Карелия, Ленинградская, Новгородская, Псковская, Смоленская области) и к южным и черноземным аграрным областям с высокой плотностью населения (Курская, Белгородская, Брянская, Воронежская и Ростовская области), а также к областям и городам с высокой плотностью еврейского населения (в значительной степени совпадающими с историческими границами «черты оседлости» в Российской империи) и к местам миграции в СССР евреев из стран Европы, оккупированной Третьим Рейхом.

Анализ географии геноцида отражает и еще одну его пространственную особенность – приуроченность к территориям, на которых активно действовали карательные подразделения коллаборационистов. Кроме того, геноцидные действия врага сопровождались уничтожением природного комплекса (вырубкой лесов, выжиганием степей, нарушением гидрологического режима оккупированных территорий и так далее), что делало невозможным проживание местного населения и усиливало демографические последствия геноцида.

Мы никогда не сможет дать полную картину и оценить истинные потери мирного населения на оккупированных землях СССР в 1941–1944 годах. Есть много факторов, препятствующих этому, – отсутствие достоверной дифференцированной статистики (то есть статистики, отделенной от гибели военных и военнопленных), очень приблизительные оценки численности перемещенных, депортированных и эвакуированных лиц с оккупированных ранее территорий, отсутствие качественной информации по демографии населения европейской части СССР, сохранение секретности части архивных материалов и, возможно, даже просто их медленное вовлечение в оборот из-за конъюнктуры. По-видимому, часть документов, касающихся ситуации с геноцидом и участием в нем коллаборационистов и национальных команд из стран Восточной Европы – например, участников Варшавского договора, были в послевоенный период уничтожены, Все эти позиции, увы, сохраняются с самого начала работ по установлению фактов геноцида населения оккупированных территорий СССР в 1941–1944 годах, то есть с начала работы «Чрезвычайной государственной комиссии по установлению и расследованию злодеяний немецко-фашистских захватчиков и их сообщников и причинённого ими ущерба гражданам, колхозам, общественным организациям,

государственным предприятиям и учреждениям СССР (ЧГК)» [27][12].

Наша задача – активнее выявлять полную картину геноцида на оккупированных землях СССР, чтобы осудить исполнителей и предупредить повторение геноцида, например, как это происходит на Донбассе и Новороссии и могло повторится в Крыму. Помимо юристов, политиков и историков, как показывает опыт нашего анализа, данная проблема укладывается в сферу исследований географов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2026-0002

Литература

1. Сборник материалов о работе органов прокуратуры Российской Федерации по подготовке, организации и участию в судебных процессах о признании военными преступлениями, преступлениями против человечности и геноцидом народа Советского Союза установленных и вновь выявленных преступлений, совершенных против мирного населения и военнопленных немецко-фашистскими захватчиками и их пособниками в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 годов на территории СССР. М.: 2025.
2. Кривошеев ГФ, Андроников ВМ, Буриков ПД, Гуркин ВВ. Великая Отечественная без грифа секретности. Книга потерь. Новейшее справочное издание. М.: Вече; 2009.
3. Холокост на территории СССР. Энциклопедия. М.: РОССПЭН. 2011.
4. Уничтожение евреев СССР в годы немецкой оккупации (1941–1944): Сборник документов и материалов. Иерусалим: Яд Ва-Шем; 1991.
5. Швед АИ, ред. Геноцид белорусского народа. Карательные операции. Минск: Генеральная прокуратура Республики Беларусь, 2024.
6. Веригин СГ. Финская оккупация Карелии в 1941–1944 годах: дискуссии между российскими и финляндскими историками. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2022;44(6):ю75-82. DOI: 10.15393/uchz.art.2022.799
7. Романько ОВ. Немецкая оккупационная политика на территории Крыма и национальный вопрос (1941 – 1944). Симферополь: Антиква; 2009.
8. Савченко АС. Нацистская политика геноцида в годы оккупации Симферополя (1941–1944 гг.). Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. 2023;9(3):131-42.
9. «…И ничто не забыто»: Документы и материалы о злодеяниях немецко-фашистских оккупантов на Новгородской земле (1941-1944). Новгород: Кириллица, 1996. 192 с.
10. Асташкин ДЮ, Ковалев БН, Кулик СВ. Оккупация, сопротивление, возмездие: нацистский режим на Новгородской земле. Великий Новгород, 2016.
11. Елисеев ВТ, Михалев СН. Так сколько же людей мы потеряли в войне? Военно-исторический журнал. 1992;(6-7):31-4.
12. Евдокимов РБ, ред. Людские потери СССР в период второй мировой войны: Сборник статей. СПб.: Русско-Балтийский информационный центр «Блиц»; 1995.
13. Рыбаковский ЛЛ. Людские потери СССР и России в Великой Отечественной войне. М.: Эконинформ; 2010.
14. Земсков ВН. Остается ли дискуссионным вопрос о масштабах людских потерь СССР в 1941-1945 гг. Изв Самарского науч центра РАН. 2015;17(3):115-7.
15. Земсков ВН. Людские потери СССР в 1941-1945 гг. (к вопросу о степени достоверности имеющихся подсчётов).Труды Института российской истории РАН. 2017(14);97-122.
16. Геноцид советского народа в годы Великой Отечественной Войны. М.: Библиотека МГПУ; 2024.
17. Кикнадзе ВГ. Количество жертв геноцида советского народа в годы Великой Отечественной войны. Наука Общество Оборона. 2025;13(1):1-1.
18. Сборник материалов о работе органов прокуратуры Российской Федерации по подготовке, организации и участию в судебных процессах о признании военными преступлениями, преступлениями против человечности и геноцидом народа Советского Союза установленных и вновь выявленных преступлений, совершенных против мирного населения и военнопленных немецко-фашистскими захватчиками и их пособниками в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 годов на территории СССР Том 2. М.; 2025.

[12] https://apni.ru/article/7164-rol-chrezvichajnoj-gosudarstvennoj-komissii

19. Engel BA, Martin J LB. Russia in World History. Oxford: Oxford University Press: 2015.
20. Каплан Р. Месть географии. М.: КоЛибри, Азбука Аттикус: 2016.
21. Mackinder HJ. The Geographical pivot of history. Geograph J. 1904;23(4):421-37.
22. Ratzel F. Politische Geographie oder die Geographie der Staaten, des Verkehrs und des Krieges. Münich: de Gruyter Oldenbourg;1903
23. Морозов СД. Мужчины, женщины и дети на оккупированных территориях СССР в годы Великой Отечественной Войны. Численность и потери. Женщина в российском обществе. 2015;(2):39-50.
24. Жуков Д. Германские оккупационные органы на территории СССР: структура и юрисдикция. Журнал российских и восточноевропейских исторических исследований. 2010;(2):38-44.
25. Зиновьев Д. Абсолютное зло. Геноцид населения Ленинграда и Ленинградской области в годы оккупации Нева. 2023;(5):180-201.
26. Волков ГЮ. Планы нацистского руководства Третьего Рейха по оккупации СССР. Вестник Костромского государственного университета. 2020;26:61-7.
27. Альферова ИВ, Блохин ВФ. Основание и деятельность Чрезвычайной Государственной комиссии по установлению и расследованию злодеяний немецко-фашистских захватчиков (1942–1945 гг.). Исторические науки и археологии. 2020;(4):8-19.



УДК 614.841 || EDN: ZYWBPP
CC BY-NC 4.0 © В.А. Усольцев, В.П. Часовских; ФНИ «XXI век»

ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ И ИХ УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА (ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

В.А. Усольцев[1], В.П. Часовских[2]

[1]Уральский государственный лесотехнический университет и [2]Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Эл. почта: Usoltsev50@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2026; принята к печати 07.05.2026

Чтобы ограничить повышение средней глобальной температуры поверхности земли на 1,5 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем, выбросы углекислого газа должны достичь чистого нуля к середине текущего столетия. Тем не менее, глобальные ежегодные выбросы CO_2 в результате лесных пожаров составляют примерно пятую часть их глобальных выбросов от использования ископаемого топлива. Дистанционный анализ площадей, пройденных природными пожарами за последние 20 лет, показал наличие как отрицательных, так и положительных тенденций, что связано с получением этих оценок датчиками с разным пространственным разрешением. На мировом уровне по разным оценкам наблюдалось как снижение, так и повышение уровня выбросов CO_2 при природных пожарах. В бореальной части Северной Америки выбросы CO_2 от пожаров увеличиваются и прогнозируется их повышение вплоть до 2050 года, однако увеличение финансирования на борьбу с пожарами, является экономически эффективной стратегией их ограничения. В Китае объем выбросов CO_2 от природных пожаров в последние десятилетия снижался за счет осуществления специальной политики по предотвращению лесных пожаров и эффективных мер борьбы с ними. В России в последние годы лесные пожары стали известны во всем мире как катастрофические. Выполненные оценки Службой мониторинга атмосферы (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) показали, что с 2011 по 2020 годы российские леса ежегодно выбрасывали в атмосферу 659 млн т CO_2, 55 % которых не отражены в официальных отчетах. С 2004 по 2021 годы пожары в резервной зоне, леса которой официально не охраняются, увеличили годичные выбросы CO_2 с 25 до 92 млн т. Для решения проблемы предупреждения и тушения катастрофических лесных пожаров требуется, прежде всего, восстановление государственной лесной охраны, упраздненной Лесным кодексом 2006 года. В целом, в зависимости от применяемых методов, оценки выбросов CO_2 от пожаров за последние десятилетия выявили как положительные, так и отрицательные тенденции, а прогнозы на ближайшие десятилетия однозначно показывают увеличение выбросов CO_2 от природных пожаров, что с учетом глобального потепления означает возможность развития положительной обратной связи двух тенденций.

Ключевые слова: *лесные пожары, углеродный след, изменение климата, дистанционное зондирование.*

FOREST FIRES AND THEIR CARBON FOOTPRINT DUE TO CLIMATE CHANGE (REVIEW OF FOREIGN LITERATURE)

V.A. Usoltsev[1], V.P. Chasovskikh[2]

[1] Ural State Forest Engineering University and [2]Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

Email: Usoltsev50@mail.ru

To limit the 1.5°C increase in the average global surface temperature compared to pre-industrial levels, carbon dioxide emissions should reach net zero by the middle of this century. However, global annual CO_2 emissions from wildfires account for about a fifth of their global emissions from fossil fuel use. Remote analysis of the areas covered by wildfires over the past 20 years has shown the presence of both negative and positive trends, which is associated with the acquisition of these estimates by sensors with different spatial resolutions. At the global level, according to various estimates, there has been both a decrease and an increase in CO_2 emissions from wildfires. In the boreal part of North America, CO_2 emissions from fires are increasing and are projected to increase up to 2050, but increasing funding for fire control is a cost-effective strategy to limit them. In China, CO_2 emissions from wildfires have been decreasing in recent decades due to the implementation of special forest fire prevention policies and effective control measures. In recent years, forest fires in Russia have become known worldwide as catastrophic. Estimates made by the Copernicus Atmosphere Monitoring Service showed that from 2011 to 2020, Russian forests annually emitted 659 million tons of CO_2 into the atmosphere, 55% of which are not reflected in official reports. From 2004 to 2021, fires in the reserve zone, whose forests are not officially protected, increased annual CO_2 emissions from 25 to 92 million tons. Solving the problem of preventing and extinguishing catastrophic forest fires requires, first of all, the restoration of state forest protection, abolished by the Forest Code of 2006. In general, depending on the methods used, estimates of CO_2 emissions from fires over the past decades have revealed both positive and negative trends, and forecasts for the coming decades clearly show an increase in CO_2 emissions from wildfires, which, taking into account global warming, means the possibility of developing a positive feedback between the two trends.

Keywords: *forest fires, carbon footprint, climate change, remote sensing.*

Введение

"Экстремальные лесные пожары превращают крупнейшую в мире лесную экосистему из поглотителя углерода в чистый источник выбросов" [67].

«В 2017 году лесные пожары в провинции Британская Колумбия привели к выбросу в атмосферу в два-три раза большего количества CO_2 по сравнению со всем ископаемым топливом, сжигаемым в провинции в том же году» [55].

«*Судьба лесов тесно связана с нашей собственной. Спасти их от изменения климата — значит сохранить баланс самой жизни, потому что без лесов Земля не сможет дышать, как и мы сами*» [71].

В лесных экосистемах накапливается большее количество углерода, чем во всей атмосфере. Поэтому относительно небольшое снижение запаса углерода в лесах в результате пожаров может существенно повлиять на чистый углеродный обмен между биосферой и атмосферой, увеличивая выброс парниковых газов и усугубляя изменение климата [70]. В.М. Тарко [88] так описывает влияние лесных пожаров на функционирование биосферы: «Углерод сгоревшей при пожаре древесной растительности, соединившись с кислородом воздуха, превращается в CO_2 и переходит в атмосферу. Погибшая, но не полностью сгоревшая масса деревьев в течение нескольких лет разлагается, и образовавшийся при этом CO_2 тоже переходит в атмосферу. Часть древесины и ветвей при пожаре окисляется не полностью и образует окись углерода и метан, которые попадают в атмосферу и, сделав, сколько смогут, вреда людям и животным, постепенно окисляются и переходят в CO_2. Оставшиеся на вырубке гумус почвы и подстилка разлагаются и, если не начинается бурный рост трав и новой древесной растительности, тоже с некоторой задержкой в виде CO_2 переходят в атмосферу. Выделение CO_2 в атмосферу продолжается после пожара долго – только когда в нарушенной экосистеме установится новое положение равновесия, они престанут быть источником биосферных выбросов CO_2 и смогут снова выполнять свою биосферную функцию – поглощать выбросы CO_2 из атмосферы» [88. С. 35].

Хотя понятие «углеродный след» все чаще используется государственными и общественными организациями, существует несколько его определений, в частности приводят шесть определений в научной и семь – в «серой» литературе. Утверждается, что учет выбросов только CO_2 приводит к упущению почти трети выбросов парниковых газов и существенному пробелу в их глобальном регулировании, в то время как учет всех выбросов парниковых газов является очень трудоемким и дорогостоящим процессом и должен учитываться в оценках жизненного цикла конкретной системы [103]. В контексте имеющейся информации понятие «углеродный след» рассматривается как составная часть более общего понятия «климатический след» [35] и предлагается следующее определение: «Углеродный след – это показатель общего количества выбросов CO_2 и CH_4 определенной популяцией, системой или видом деятельности с учетом всех соответствующих источников, поглотителей и хранилищ в пределах пространственных и временных границ интересующей популяции, системы или вида деятельности. Рассчитывается как CO_2-эквивалент с использованием соответствующего 100-летнего потенциала глобального потепления (GWP100)» [103. С. 70].

Леса покрывают около 30% поверхности суши в мире [109], они накапливают углерод, обеспечивая среду обитания для широкого спектра видов флоры и фауны и помогая уменьшить деградацию земель [33]. Однако леса становятся все более уязвимыми в результате их сведения [60], изменения климата [87], лесных пожаров [82] и других факторов, которые могут быть связаны с деятельностью человека [84]. Леса имеют особое значение, поскольку стабилизируют окружающую среду, регулируют круговорот углерода и являются местообитанием тысяч существующих форм жизни [6]. Лесные экосистемы представляют результат совокупного сочетания топографии, геологии, растительных видов и климата, которые связаны между собой физическими и биологическими процессами [96]. Лесная экосистема может быть размером с микросайт на ветке дерева, где взаимодействуют различные микробы, насекомые и мхи, или размером с бореальный лесной пояс, который окружает Землю в северных широтах [64]. Чем больше расширяется эта область, тем сложнее потенциальные взаимодействия. Лесоводство – один из древнейших видов человеческой деятельности, возникшей в результате необходимости людей культивировать древесные породы для удовлетворения таких основных потребностей, как кров, пища, одежда и тепло [45]. Все известные организации: "Рио-де-Жанейрская конвенция", "Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН)", "Конвенция Организации Объединенных Наций о биологическом разнообразии (КБР)" и "Конвенция Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием (КБО ООН)" - признают важную глобальную роль лесов [84].

Лесные пожары являются одним из непредсказуемых стихийных бедствий и наносят огромный ущерб людям, животным и природе, а также приводят к вымиранию видов и экономическим потерям [85], а экстремальные лесные пожары приводят к необратимым

потерям для общества, включая гибель людей, ухудшение качества воздуха, нагрузку на системы здравоохранения и экономические потери [14]. Лесные пожары представляют собой постоянную угрозу для жизни, но они также представляют угрозу для окружающей среды и могут проявляться в виде изменения климата [23]. Таким образом, лесные пожары и изменение климата - это взаимосвязанные понятия [84].

Чтобы ограничить повышение средней глобальной температуры поверхности земли на 1,5°С по сравнению с доиндустриальным уровнем, выбросы углекислого газа должны достичь чистого нуля к середине текущего столетия [76]. За период с 2001 по 2012 год лесные пожары во всем мире сократили накопление углерода в растительности примерно на 10 % [56], что существенно повлияло на концентрацию CO_2 в атмосфере [93]. Глобальные ежегодные выбросы CO_2 в результате лесных пожаров составляют примерно от 6,5 до 11 млрд т, что составляет примерно пятую часть глобальных выбросов CO_2 от использования ископаемого топлива [95]. Для смягчения последствий изменения климата и полного понимания механизмов углеродного обмена между наземными экосистемами и атмосферой важно учитывать воздействие выбросов CO_2 от лесных пожаров на наземную систему [30].

Антропогенное изменение климата способствовало увеличению числа благоприятствующих пожарам погодных аномалий во всем мире [47], более частых и экстремальных периодов засухи [1]. Повышенная жара и засуха создают периоды низкой влажности горючих материалов, что повышает вероятность возникновения лесных пожаров в экосистемах, где имеются достаточные запасы растительной биомассы и органики почв [1]. Повышенная атмосферная нестабильность связана с более непредсказуемым и экстремальным поведением лесных пожаров, что увеличивает распространение и интенсивность огня и ставит под угрозу способность пожарных тушить возгорания [21]. Эти повышенные риски привели к увеличению сгоревших площадей и выбросов углерода при пожарах в некоторых лесных регионах, особенно в течение последних двух десятилетий [11, 47]. Расширение землепользования и практика борьбы с пожарами по-разному взаимодействовали с последствиями изменения климата, усиливая или снижая активность лесных пожаров и выбросы углерода [29]. Увеличение частоты грозовых разрядов в условиях изменения климата также усугубило возникновение лесных пожаров, особенно в лесах высоких широт с ограниченной способностью к возгоранию [44]. Исследования причин возникновения пожаров показали, что изменение климата повысило вероятность возникновения экстремальных погодных условий, обусловивших экстремальные лесные пожары [48]. При этом увеличение выбросов углерода при лесных пожарах, наблюдаемое в бореальных регионах, контрастирует с сокращением выбросов углерода в саваннах глобальных тропиков [3, 107].

Лесные пожары играли ключевую роль в формировании наземных системам на протяжении 420 миллионов лет, начиная с эволюции сосудистых растений в силурийский период [83]. Пожары приводят к экосистемным нарушениям, которые повлияли на глобальное распределение лесов на Земле и контролировали накопление углерода в растительности и почвах в течение геологического времени [51]. Восстановление запасов углерода в растительности и органических почвах после лесных пожаров может занять десятилетия или столетия, и поэтому увеличение ежегодных выбросов углерода в результате пожаров и экстремальных выбросов приводит к длительному дефициту запасов углерода на суше [8]. В результате специального исследования, проведенного в лесостепной зоне России, установлено, что существующие методы расчета потерь углерода в лесах, пострадавших от пожаров, слишком упрощены, недостаточно дифференцированы по типу и интенсивности лесных пожаров, а также дают завышенные значения потерь углерода от пожаров [62]. В целом, увеличение выбросов углерода при пожарах может снизить способность глобальных лесов поглощать углерод из атмосферы, что создает проблемы для достижения климатических целей. В частности, увеличение активности пожаров только в северных районах Северной Америки может привести к чистым потерям углерода, эквивалентным 0,3-3% от оставшегося запаса углерода, необходимого для ограничения глобального потепления до 1,5°С [70].

Наряду с климатическими факторами, масштабы лесных пожаров зависят от различных видов деятельности человека на местах [88], а также от экологических особенностей и продуктивности растительного покрова [69]. Хотя климатические, антропогенные и растительные факторы влияют на характер пожаров в лесах, важность каждого из них зависит от локальных условий того или иного региона [13]. В целом, определить лесные регионы, где пожары наиболее чувствительны к изменению климата или другим аспектам изменений окружающей среды, довольно непросто [13]. Чтобы определить регионы мира, где реакция на будущие изменения климата или другие экологические стрессовые факторы будет сравнительно сильной или слабой, требуется изучение временных и пространственных взаимосвязей между пожарами и комплексом мер борьбы с пожарами [48].

В бореальных лесах пожары происходят чаще, чем в большинстве других экосистем, подверженных пожарам, но дополнительный углерод, накапливающийся в почвах и деревьях в течение длительного периода между пожарами, обычно превышает потери от них. В течение последних примерно 6000 лет эта тонкая

взаимосвязь между поглощением и выделением углерода была довольно стабильной, и бореальные леса служили глобально важным поглотителем углерода. Но глобальное потепление, которое особенно заметно в высоких широтах северного полушария, угрожает равновесию. Высокие температуры привели к удлинению пожароопасного сезона и увеличению частоты и серьезности лесных пожаров, и появляется все больше свидетельств того, что по мере сокращения интервала между пожарами из органических почв в бореальных лесах выделяется больше углерода, чем могут поглотить экосистемы [108].

Помимо воздействия на запасы углерода, в результате нескольких экстремальных пожаров было зафиксировано значительное сокращение биоразнообразия, и многие из видов, находящихся под угрозой исчезновения на Земле, страдают от изменения режима пожаров [102]. Недавние сезоны экстремальных лесных пожаров по всему миру продемонстрировали степень воздействия экстремальных лесных пожаров как на окружающую среду, так и на общество [48]. Что касается экологических аспектов, то наиболее существенными факторами возникновения лесных пожаров являются те, которые связаны с горючими материалами, погодой и рельефом местности. В последние годы режимы лесных пожаров менялись в нескольких частях мира с существенными различиями в зависимости от климатических условий регионов [75]. Таким образом, важно понимать связь между пожарами и движущими факторами в различных климатических зонах. Существует три типа факторов, которые обычно регулируют распространение пожара: горючие материалы, погода и топография, которые составляют “Треугольник пожарной обстановки” [54] (рис. 1).

Серия крайне аномальных случаев экстремальных выбросов углерода при лесных пожарах в последнее время выявила долгосрочные тенденции [108]. Значительные различия между странами в глобальных выбросах CO_2 от лесных пожаров подчеркивают сложность проблемы выбросов CO_2. Сильные лесные пожары в нескольких странах, таких как Австралия, Канада и Соединенные Штаты, привели к выбросам CO_2, которые превышают совокупные выбросы за несколько лет, оказывая значительное воздействие на глобальный климат и окружающую среду. В течение сезона лесных пожаров 2019–2020 годов в Австралии площадь, охваченная пожарами, более чем в два раза превысила предыдущий рекорд 1930-х годов [92]. В 2021 году на долю бореальных пожаров пришлось 0,48 млрд т выбросов углерода, или 23% глобальных выбросов CO_2 (обычно около 10 %), что является самым высоким показателем с 2000 года. Результаты моделирования показали, что в результате этих лесных пожаров было выброшено более 1300 млрд т CO_2 и 140 млрд т других парниковых газов, включая CH_4 и N_2O. При увеличении числа пожаров в бореальном регионе эти леса могут достичь “критической точки лесных пожаров” [67, 108]. Затем наступил 2023 год, установивший новый рекорд по выбросу углерода при пожарах, когда его выбросы в бореальных лесах Канады

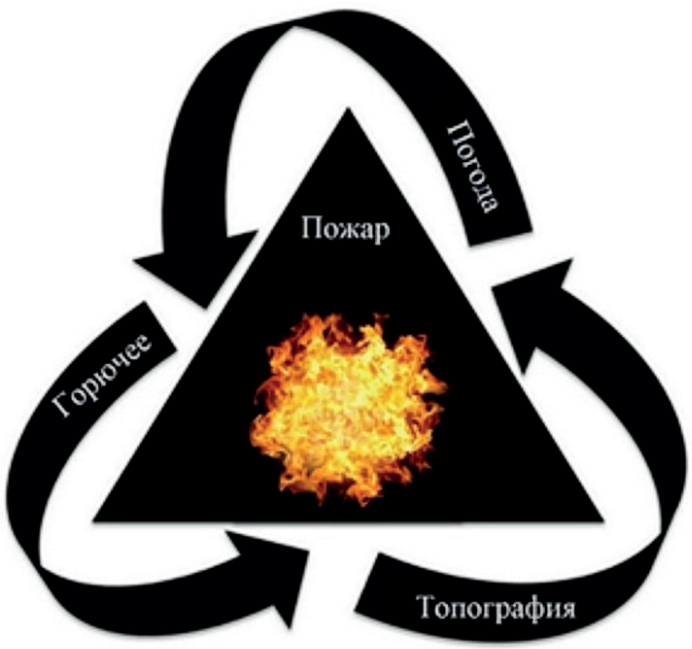


Рис. 1. Треугольник пожарной обстановки [84].

более чем в девять раз превысили средний показатель с 2001 по 2022 год [48], а затем и 2025 год, поставивший новый рекорд в Европе, когда за несколько недель выгорело около 1 млн га лесов [80]. И в этой связи возникает закономерный вопрос: «А есть ли свет в конце туннеля?» [15].

Изменение площади глобальных лесов вследствие пожаров

В последние годы леса многих регионов мира подверглись экстремальным лесным пожарам, однако не было четкой информации о том, что именно горело: леса или ранее обезлесенные участки, превращенные в пастбища и пахотные земли [12]. Данные об активных пожарах, полученные с помощью датчиков радиометра Visible Infrared Imaging Radiometer (VIIRS) и спектрорадиометра среднего разрешения (MODIS), предоставляют информацию в режиме, близком к реальному времени [31], но получаемые данные с грубым пространственным разрешением (375 м для VIIRS и 1 км для MODIS) не позволяют уверенно различать лесные и нелесные пожары. Эта проблема особенно актуальна для обезлесенных ландшафтов, где относительно небольшие участки оставшихся лесов переплетаются с участками, ранее расчищенными под сельское хозяйство [89].

В работе В. Тарко [88] площадь сгоревших лесов оценена по данным аппаратуры MODIS, установленной на научно-исследовательских спутниках Aqua/Terra. Полученная динамика площадей сгоревших лесов в странах мира в 2001-2019 годах показана на рис. 2. Видно, что площадь сгоревших мировых лесов возрастала с 2001 по 2010 годы, а с 2010 по 2018 годы имела некоторую тенденцию к снижению.

Иная тенденция изменения площадей сгоревших мировых лесов (**рис. 3**) была выявлена другими исследователями на основе той же аппаратуры MODIS [107]. Согласно **рис. 3** среднее годовое снижение площади сгоревших лесов за период с 2000 по 2018 годы составило –1,6 ± 0,4%.

Существующие глобальные карты сгоревших территорий [30, 58] имеют грубое разрешение 250-500 м и не позволяют различать лесные пожары, приводящие к потере лесного покрова (stand-replacement fires), и не приводящие к ней (non–stand-replacement fires). В отчете ФАО ООН по оценке лесных ресурсов (FRA) за 2020 год [25] сообщается об общей региональной площади сгоревших лесов при сопоставлении карты сгоревших территорий с разрешением 500 м [30] с глобальной 30-метровой картой сгоревших лесов, составленной в 2000 году [37]. Этот подход учитывал зону лесных пожаров, не связанных с потерей лесного покрова, и зону подсечно–огневого земледелия (где пожары возникают после вырубки деревьев), а также зону пожаров, связанных с потерей лесного покрова. Таким образом, Восточная и Южная Африка, а также Западная и Центральная Африка выделены в отчете (FRA) на 2020 год как два основных региона с выгоревшей площадью лесов, хотя большинство пожаров в этих регионах происходят в адаптированных к по-

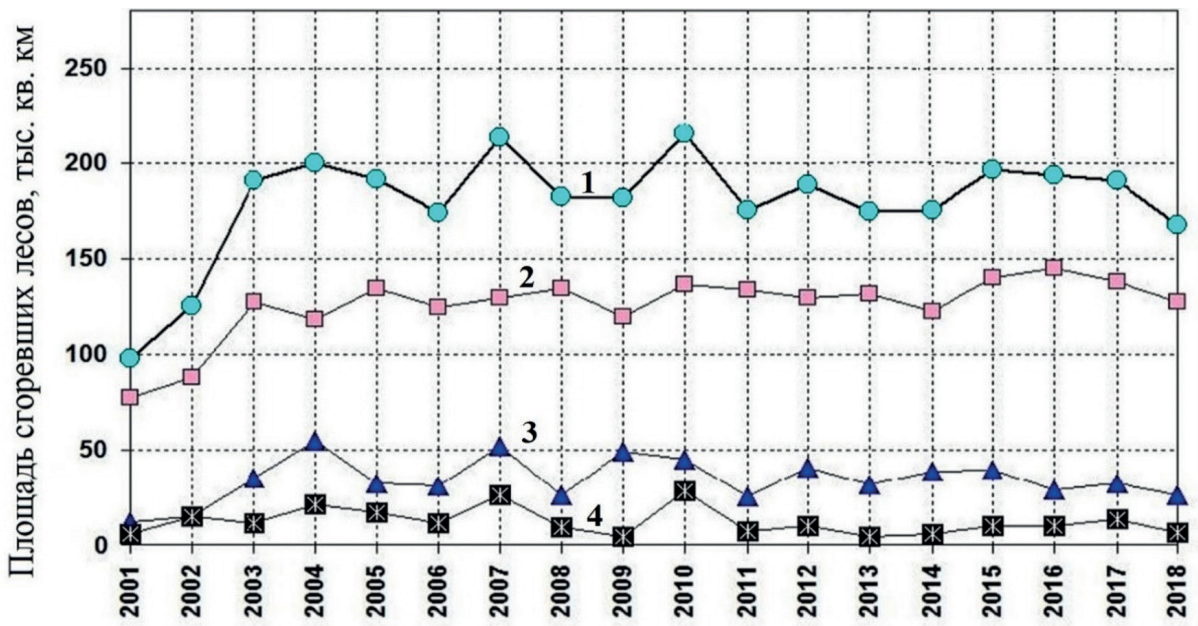


Рис. 2. Динамика площадей пожаров в мировых лесах (1), Африке (2), Азии (3) и Южной Америке (4) [88].

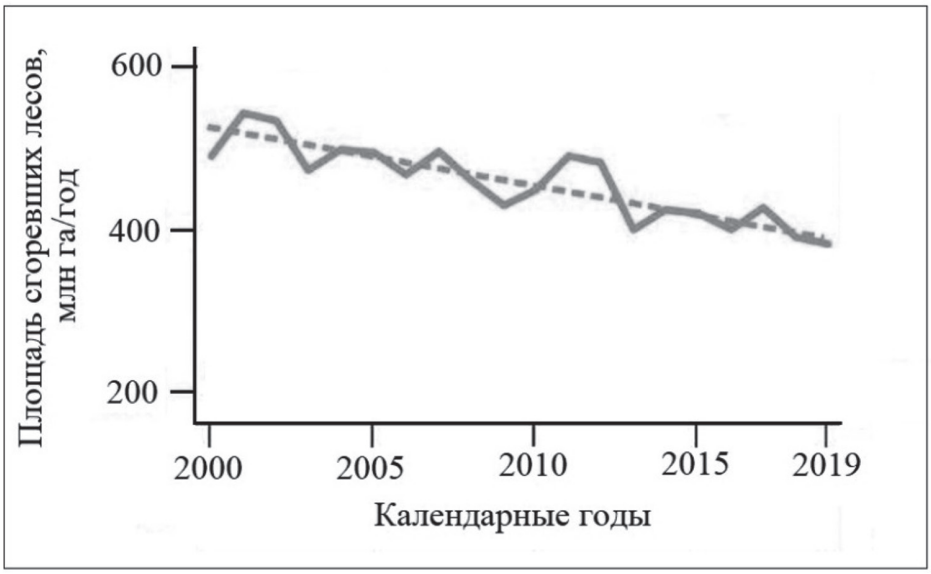


Рис. 3. Изменение глобальных сгоревших площадей в результате пожаров с 2000 по 2019 годы, полученное на основе данных MODIS с разрешением 500 м [107].

жарам парковых зонах и лесных саваннах, где насаждения практически не погибают. Такая отчетность вводит в заблуждение с точки зрения учета выбросов углерода и скрывает потенциальное увеличение потерь лесного покрова из-за пожаров в районах влажных тропических лесов [16].

Начиная с 1990-х годов, глобальные оценки сгоревших лесных площадей, основанные на спутниковых наблюдениях, позволяют получить критическую информацию о характере и тенденциях возникновения пожаров. Однако получение этих оценок основано на датчиках с грубым пространственным разрешением, которые непригодны для обнаружения небольших пожаров, когда сгорает лишь часть площади спутникового пикселя. На территории Африки были сопоставлены оценки сгоревших площадей, полученные как на основе изображений Sentinel-2 MSI с пространственным разрешением 20 м, так и на основе изображений спектрорадиометра MODIS с разрешением 500 м [74], и оказалось, что в первом случае сгоревших площадей было на 80% больше, чем во втором. Это различие в основном связано с наличием небольших площадей пожаров: при пожарах площадью менее 100 га в первом случае обнаружено 2,02 млн км^2 сгоревших лесов, а во втором – только 0,13 млн км^2. Это вызвало 31–101%-ное завышение оценок выбросов углерода при пожарах [74]. Существующие оценки сгоревших площадей регионального и национального масштабов с использованием дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения (≤30 м), в основном сосредоточены на лесах Северной Америки, Африки и Евразии [39, 43, 74]. На сегодняшний день не существует глобальной спутниковой оценки высокого разрешения по потерям лесов в результате пожаров, использующей согласованные методы для разных биомов [89].

В одном из недавних исследований [89] этот глобальный информационный пробел восполняется путем составления карты потерь лесов от пожаров за 2001-2019 годы, которая дополняет набор результатов глобального мониторинга лесного покрова с 30-метровым разрешением [37], ежегодно обновляемый в рамках инициативы Global Forest Watch (https://www.globalforestwatch.org/). Ограничив область, представляющую интерес для составляемой вновь карты потерь от пожаров, территориями потерь лесов согласно картам, составленным Хансеном и соавт. [37], были исключены низовые лесные пожары низкой интенсивности, которые не приводят к существенной потере лесного покрова в масштабе 30-метровых пикселей. Потери лесов от пожаров были нанесены на карту с использованием глобальных показателей ежегодных изменений на основе спутниковой системы Landsat за 2001-2019 годы [72] в качестве входных данных, откалиброванных на региональном уровне классификации лесов (рис. 4). Результат процесса картографирования представлен набором бинарных карт (потери лесов от пожаров в сравнении с другими факторами потерь), каждая из которых определяется выбором границы между двумя классами на основе непрерывного вывода из дерева решений [89].

В результате составления карты были получены основанные на выборках пикселей несмещенные оценки общей площади потерь лесов результате по-

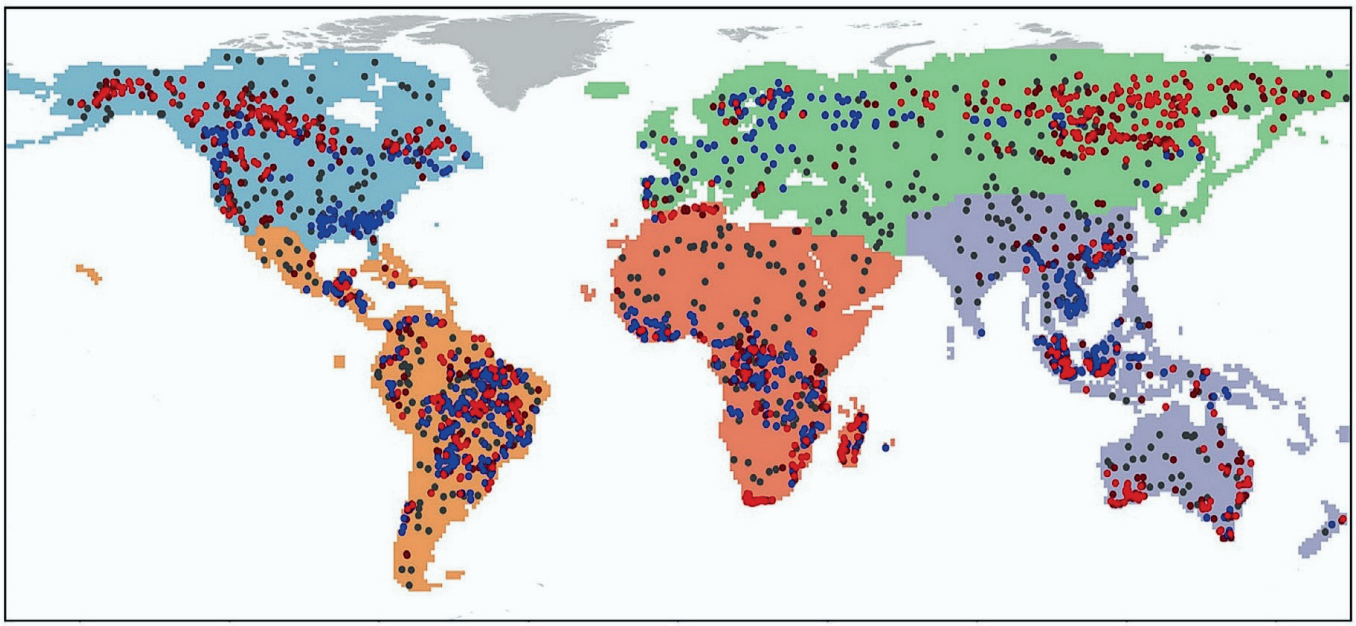


Рис. 4. Расположение 30-метровых пикселей лесов на карте исследуемых регионов [89].

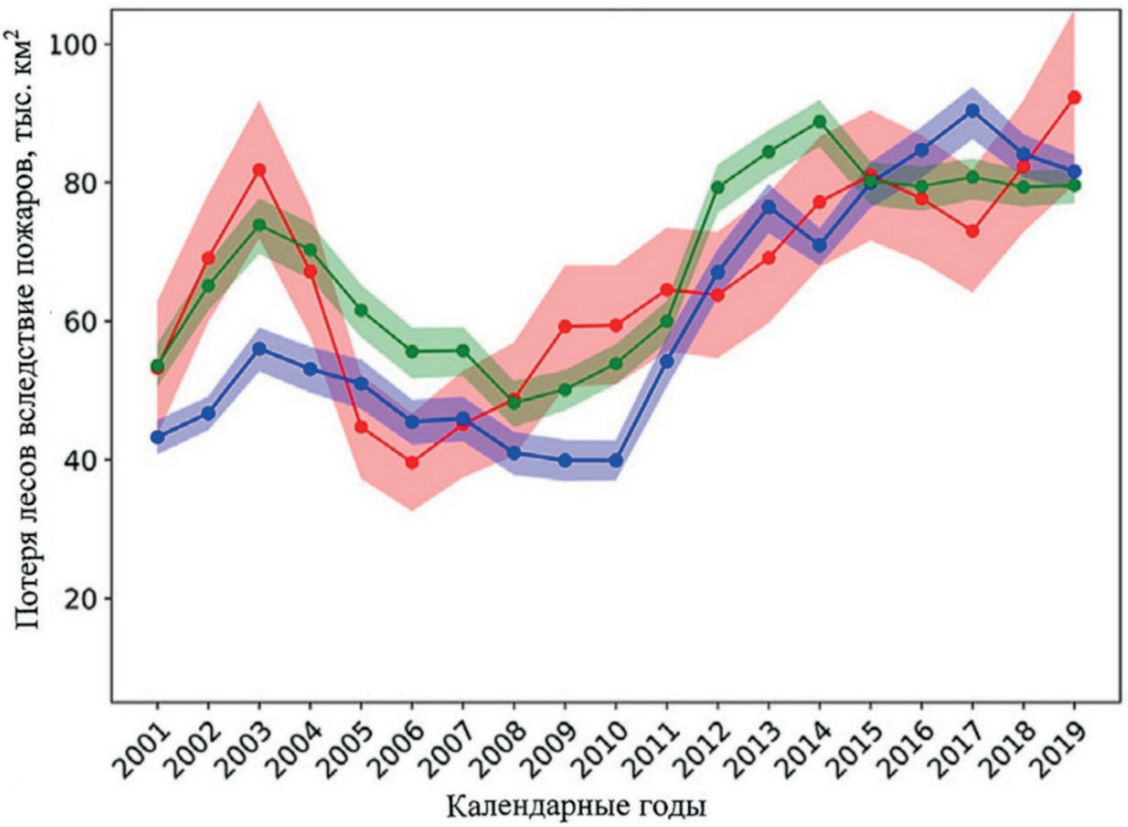


Рис. 5. Ежегодная площадь потерь лесов в результате пожаров (средние значения за три года) по картам (синий и зеленый цвета) и на основе эталонной выборки (красный цвет) на мировом уровне. Синяя линия соответствует модели потерь лесов в результате пожаров, ежегодно применяемой в рамках текущей версии карты потерь лесов Хансена с соавторами [37]; зеленая линия соответствует модели пожаров по глобальной карте потерь лесов, полученной на основе последней модели годичных потерь лесов [89].

жаров для каждого региона. Используя выборочные данные, были рассчитаны ежегодные площади потерь лесов в результате пожаров за период 2001–2019 годы. (рис. 5).

С 2001 по 2019 год наблюдается глобальная тенденция к увеличению потерь лесов от пожаров, обусловленная равномерным увеличением их площади в бореальной Евразии и в тропиках, субтропиках и умеренном климате Австралии. Полученные результаты дают количественную оценку растущей угрозы пожаров для сохранившихся лесов во всем мире и могут улучшить результаты моделирования будущих потерь от лесных пожаров при различных сценариях изменения климата и развития событий [89].

Согласно составленной новой карте [89], 26–29% глобальных потерь лесов в 2001–2019 годах были вызваны пожарами, что выше предыдущих оценок в 21–25% за 2001–2015 годы [20] и 12–18% за 2003–2014 годы [57]. Эти различия связаны с более тонким пространственным масштабом текущего исследования и более длительным временным интервалом, охватывающим последние годы с высокой пожарной опасностью. Оценки региональных масштабов утраты лесов в результате пожаров варьируют от 58–61% в Австралии и Океании до 2% в Африке. Наибольшая разница с предыдущим исследованием [20] наблюдается в Латинской Америке (11–14% в этом исследовании против 1% в работе [20]. В глобальном масштабе на бореальные леса приходится самая высокая доля потерь лесов в результате пожаров (69-73%), за ними следуют субтропические (19–22%), умеренные (17–21%) и тропические леса (6–9%) [89].

Таким образом, в зависимости от степени разрешения космической съемки площадей сгоревших лесов динамика их изменения с 2000 по 2019 годы имеет положительную тенденцию при разрешении 30 м и отрицательную или переменную при разрешении 500 м. Причиной может быть учет (или его игнорирование) площадей, пройденных пожаром, но не приведших к гибели насаждений, а также занижение площадей сгоревших лесов за счет наличия небольших площадей в больших пикселях [74, 89].

Однако, при установленной динамике площадей сгоревших лесов за некоторый период динамика выбросов углерода за тот же период может отличаться. Так, в выше упомянутой работе [107] при установленном снижении площади сгоревших лесов –1,6% ± 0,4% в год уровень выбросов углерода за тот же период был «квазистабильным», то естье. наблюдалось его снижение лишь в размере –0,7% ± 1,0%, причем статистически не значимое. Причина состоит в проявлении компенсирующего эффекта вследствие роста доли лесного покрова в общей площади лесных и нелесных сгоревших площадей, при этом коэффициент корреляции между увеличением выброса углерода, отнесенного к единице сгоревшей площади, и увеличением доли лесного покрова в общей сгоревшей площади составил 0,88 [107].

Лесные пожары и эмиссия углерода на глобальном уровне

Пожары влияют на климат через прямые выбросы углекислого газа и через источники его поступления после пожаров [94], являющихся неотъемлемыми компонентами глобального углеродного цикла. По прогнозам, к концу столетия интенсивность и продолжительность пожароопасного сезона увеличатся по всему земному шару, особенно в северных высоких широтах [27]. Деятельность человека приводит к фрагментации лесов [38], а их деградация снижает устойчивость лесов к пожарам [16, 106]. Сложное взаимодействие социальных и экологических факторов определяет различия регионов по интенсивности и частоте лесных пожаров [3]. Эти региональные различия могут изменить глобальный климат посредством биофизических обратных связей, хотя потенциальная величина и направление этих долгосрочных изменений остаются неопределенными [101].

Начиная с 2000 года, выбросы в результате использования ископаемого топлива и изменений в землепользовании составляли в глобальном масштабе около 9 млрд т углерода в год, в то время как выбросы при пожарах составляли около 2 млрд т углерода в год [107]. Около 80 % углерода, выделяющегося при пожарах, поглощается растительностью в последующие вегетационные периоды, а остальные 20% остаются в атмосфере и способствуют накоплению атмосферного CO_2. С 2000 года увеличиваются выбросы в глобальных лесных экосистемах в результате экстремальных пожаров, вызванных засухой [92, 107]. Согласно прогнозам, такие экстремальные пожары станут более частыми и масштабными в связи с будущим изменением климата [47]. Тропические лесные пожары привлекали большое внимание в результате обезлесения и деградации лесов, угрожающих биоразнообразию и поглощению углерода на суше. Бореальным лесам уделялось гораздо меньше внимания, несмотря на то, что они являются одним из самых обширных и важных биомов на Земле и несмотря на потепление в Арктическом регионе, которое происходит гораздо быстрее, чем на остальной планете. Таким образом, мониторинг и моделирование пространственно–временных колебаний выбросов при пожарах, особенно в обширных экосистемах с высокой плотностью углерода, таких как бореальные леса, имеют решающее значение для понимания углеродно–климатических и биофизических связей, влияющих на температуру на поверхности Земли [57], а также способствующих нивелированию усилий по смягчению последствий изменения климата [108].

Однако точный и своевременный мониторинг выбросов CO_2 в результате пожаров остается сложной задачей из-за сильных изменений в условиях горения и вследствие особенностей ландшафта, которые возникают при пожарах. Кроме того, сильные аэрозольные выбросы, возникающие в результате пожаров, часто мешают спутниковым наблюдениям за характеристиками послепожарных ландшафтов, а также затрудняют обнаружение небольших пожаров [74]. Имитационные модели (bottom-up) выбросов, которые моделируют загрузку горючего материала, степень и эффективность сгорания, хорошо воспроизводят средние условия горения и уровни выбросов в соответствии с наблюдениями, полученными в ходе полевых экспериментов [94], но не дают точной характеристики экстремальных выбросов при сжигании [92]. Использование коэффициентов выбросов при пожарах из справочных таблиц для усредненных по биомам уровней может привести к искажению информации о смешанном факельном и тлеющем состояниях горения из-за низкого пространственно-временного разрешения данных о коэффициентах выбросов. Кроме того, грубое пространственное разрешение спутниковых датчиков, используемых для определения большинства имеющихся в настоящее время данных о глобальных очагах возгорания (как правило, с разрешением в несколько сотен метров), создает большую неопределенность, особенно в районах с преимущественно небольшими очагами пожаров [74]. Эти недостатки спутниковых сенсоров, моделей и наборов данных препятствуют точной и динамичной оценке выбросов углерода при пожарах, особенно экстремальных, в режиме реального времени [108].

Эмиссия углерода при пожарах в бореальных и тропических лесах, оцененная по выбросам окиси углерода

При имеющихся сложностях непосредственного измерения выбросов CO_2 при пожарах на основе спутниковых наблюдений, подобные наблюдения за атмосферной окисью углерода (CO), полученные на основе данных ближнего и теплового инфракрасного излучения, обеспечивают альтернативный подход к косвенному отслеживанию выбросов CO_2 при пожарах. Выбросы CO от пожаров, особенно от чрезвычайно интенсивного горения, могут быть обнаружены спутниками и отделены от фоновых уровней CO из-за их неоднородности в распределении выбросов и короткого срока нахождения в атмосфере [108].

С учетом сказанного, в одном из последних исследований полученные со спутника данные о концентрациях CO были использованы для отслеживания выбросов различных загрязняющих веществ при пожарах путем интеграции моделей переноса химических веществ, методов атмосферной инверсии и соотношений выбросов между CO и другими видами загрязнений, определенных на основе локальных измерений [92]. Отмеченные данные были использованы для оценки глобальных еженедельных выбросов CO и CO_2 при пожарах с разрешением по горизонтали 3,75° на 1,9°. Упомянутая инверсионная система была разработана в результате усилий по разработке моделей в течение последних 15 лет и модернизирована для использования новейших данных о CO, полученных в результате измерений загрязнения тропосферы спутниковой системой MOPITT [107].

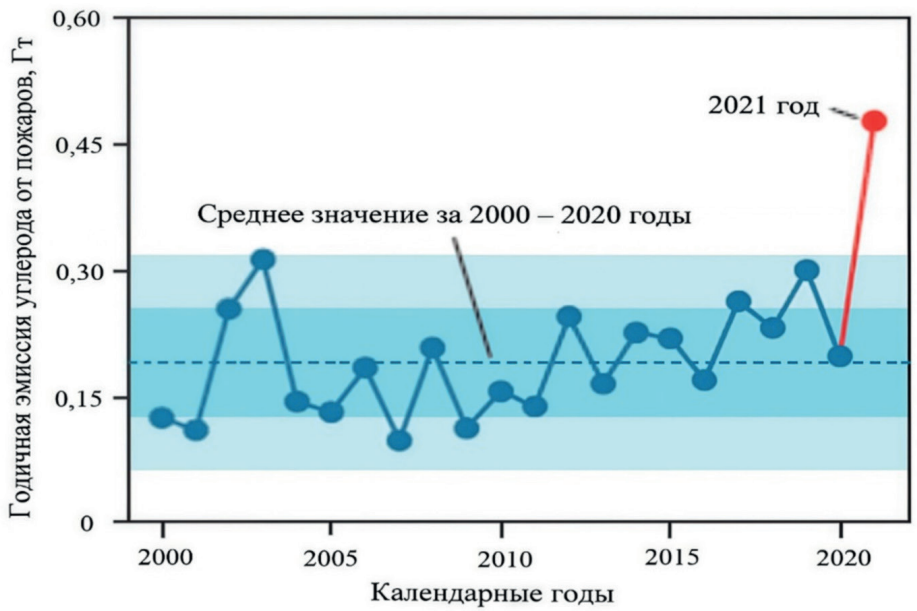


Рис. 6. Инверсионные оценки ежегодных выбросов углерода в результате бореальных пожаров за период с 2000 по 2021 год. Тонировка обозначает одно и два стандартных отклонения от среднего значения за 2000-2020 годы [108].



Рис. 7. Аномалии выбросов углерода в результате бореальных и тропических пожаров в период с 2000 по 2021 годы относительно среднего значения за период с 2000 по 2020 годы с целью сопоставления годовых аномалий бореальных выбросов с аномалиями тропических выбросов, полученных на основе моделирования глобальной атмосферной инверсии [108].

Полученные результаты глобального инверсионного анализа [108] выявили тенденцию к значительному увеличению выбросов при пожарах в бореальном регионе с 2000 по 2021 год (**рис. 6**). Напротив, выбросы при пожарах в тропическом регионе (от 23°южной широты до 23°северной широты) за тот же период несколько снизились (рис. 7). В 2021 году бореальные пожары привели к пиковым выбросам CO_2 в объеме 0,48 Гт (млрд т) углерода, в том числе 0,17 млрд т в бореальной части Северной Америки и 0,31 млрд т углерода в бореальной части Евразии, что на 150% превышает среднегодовые выбросы в период с 2000 по 2020 год. Аномалия выбросов от бореальных пожаров в 2021 году превышает любую ежегодную аномалию выбросов от тропических пожаров с 2000 года.

Полученные глобальные атмосферные инверсии выявили контрастные тенденции между выбросами от пожаров в бореальных и тропических регионах с 2000 года и рекордную ежегодную и сезонную аномалию выбросов от пожаров в бореальном регионе, которая в 2021 году превысила выбросы в тропических регионах. Оба эти факта свидетельствуют о том, что бореальные экосистемы становятся одним из доминирующих регионов–источников интенсивных пожаров и выбросов углекислого газа при пожарах, а также важнейшим фактором положительной обратной связи между пожарами и климатом [108].

Увеличение площади сгоревших лесов и выбросов в результате пожаров в бореальном пожароопасном сезоне 2021 года совпадает с сильной жарой, засухой и большим дефицитом влаги. Во всех регионах с большими выбросами от пожаров в 2021 году наблюдались более высокие температурные аномалии (>1°C над бореальной частью Северной Америки и >1,5°C над бореальной частью Евразии). Увеличение выбросов от пожаров в бореальной части Евразии также сопровождалось аномалиями с низким уровнем осадков (<-10 мм) и значительные аномалии климатического дефицита влаги (количество осадков минус потенциальное суммарное испарение, в основном <-20 мм). Проведенный анализ данных указывает на связь между масштабными бореальными пожарами и климатическими факторами, а также предполагает, что механизмы распространения лесных пожаров в Северной Америке и Евразии могут отличаться [108].

Географический анализ, объединяющий широтное распределение выбросов от пожаров и карты растительного покрова, показал, что чрезвычайно высокие выбросы в 2021 году произошли в бореальных регионах с плотным лесным пологом в высоких северных широтах. Тенденции к увеличению количества пожаров и аномалий в бореальном регионе происходят одновременно с наступлением более теплых и сухих пожароопасных сезонов. Существенное увеличение выбросов в результате бореальных пожаров в 2021 году наблюдается в основном в регионах с более суровыми условиями засух, чем в среднем за период с 2000 по 2020 год, причем это увеличение более заметно в бореальной части Евразии. Поскольку леса высоких широт очень уязвимы к засухам, которые могут

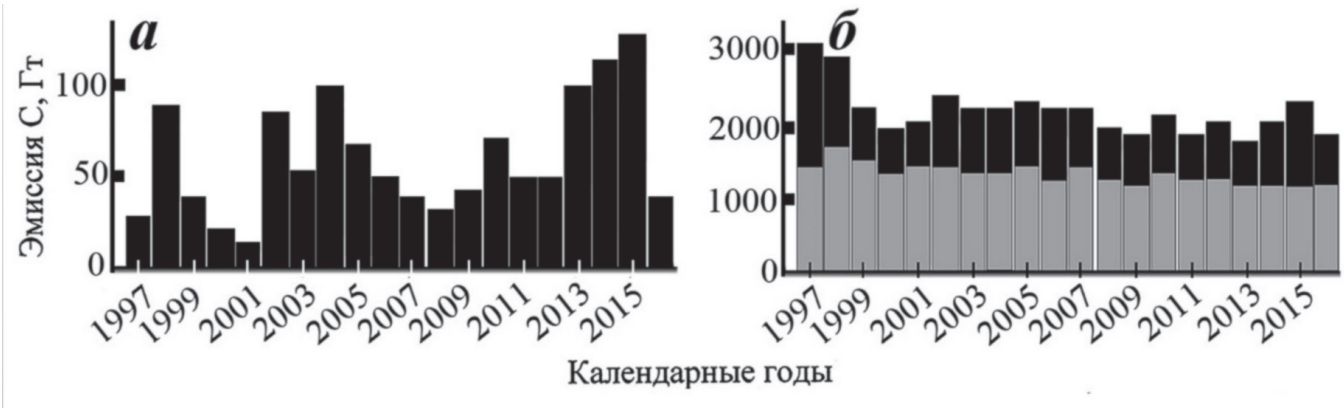


Рис. 8. Ежегодная суммарная эмиссия углерода от лесных и торфяных пожаров, сжигания отходов сельского хозяйства, послепожарной деградации территорий и от пожаров в саванных, лугопастпищных угодьях и кустарниковом покрове в бореальной зоне Северной Америки (*а*) и в мире (*б*). На рис. 8*б* серой тонировкой обозначена эмиссия углерода от выжигания саванн, черной – эмиссия от остальных источников [94].

значительно увеличить количество пожаров и, в свою очередь, спровоцировать выброс огромного количества углерода, как это произошло в 2021 году, тенденции к засухам и возможное увеличение частоты экстремальных засух могут привести к сильной положительной обратной связи между пожарами и климатом [108].

Кроме того, проведенное исследование показало, что выбросы углерода в результате пожаров в бореальных экосистемах Евразии более чувствительны к климатическому дефициту влаги, чем в бореальных экосистемах Северной Америки. Северная Америка и Евразия не всегда переживают засуху одновременно, как это было в случае с засухой в Северной Америке в 2017 году и засухой в Евразии в 2019 году, которые вызвали экстремальные пожары, связанные с большими выбросами CO_2, только в одном из двух регионов, что привело к меньшим аномалиям выбросов, чем те, которые произошли в других регионах в 2021 году [108].

Несмотря на то, что в последние годы в лесах по всему миру часто случались экстремальные пожары, в результате бореальных пожаров в 2021 году было выделено аномально большое количество углерода (на 0,29 Гт С выше среднего показателя за период с 2000 по 2020 год), то есть больше, чем за все предыдущие годы. В связи с глобальным потеплением в будущем более вероятно возникновение экстремальных пожаров, которые могут привести бореальный ландшафт к частым нарушениям и существенно снизить стабильность накопления углерода. Эта положительная обратная связь между климатом и пожарами усугубляет неполное восстановление после пожаров и повторное поглощение углерода после пожаров в последующие вегетационные периоды [108].

На основе модифицированной версии модели Карнеги–Эймса–Стэнфорда (CASA) с использованием платформы MODIS и характеристик растительности, метеоданных и параметров пожаров была рассчитана динамика годичных выбросов углерода за период с 1997 по 2018 годы на мировом уровне и по регионам мира [94]. На рис. 8 показаны суммарные выбросы углерода от лесных и торфяных пожаров, сжигания отходов сельского хозяйства, послепожарной деградации территорий и от пожаров в саваннах, лугопастпищных угодьях и кустарниковом покрове. На мировом уровне от 50% до 60% выбросов углерода происходит от пожаров в саваннах, и общая тенденция снижения выбросов углерода, особенно с 1999 по 2016 годы определяется снижением выбросов от выжигания саванн (рис. 8*б*) [94]. Динамика выбросов от пожаров в бореальной зоне Северной Америки (рис. 8*а*) находится в соответствии с выше изложенным результатом, полученным по выбросам окиси углерода (см. рис. 6) [108].

Таким образом, пожары являются ключевым фактором, влияющим на бореальные регионы Северного полушария. Проведенное исследование выявило 20-летнюю тенденцию к увеличению числа летних пожаров в бореальных лесах Евразии, которые приводят к огромным выбросам углекислого газа и вызваны постоянной и усиливающейся засухой. 2021 год был исключительным с точки зрения засухи, интенсивности и пространственных масштабов пожаров и связанных с ними выбросов углекислого газа, которые достигли рекордных значений с тех пор, как в 2000 году начали проводить измерения с помощью спутниковой системы MOPITT. Более жаркие и сухие пожароопасные сезоны в бореальных регионах, вероятно, из-за антропогенного изменения климата, повышают воспламеняемость растительной биомассы и эффективность воспламенения от молний, способствуя возникновению экстремальных и интенсивных пожаров [94].

Эмиссия углерода при пожарах в тропических и внетропических лесах на уровне пиромов

В ходе другого глобального анализа и систематизации регионов мира по степени общности реакций экосистем на лесопожарную обстановку [48] был использован алгоритм кластеризации по методу k-средних с целью сгруппировать 414 лесных экорегионов мира [68] в 12 лесных пиромов (pyromes), в пределах которых лесные массивы имеют общий набор взаимосвязей с климатическими условиями, растительностью и контролем со стороны человека [30]. После выделения пиромов, отличающихся высокой чувствительностью к климатическим воздействиям, было проанализировано изменение ежегодных сгоревших площадей [30] и выбросов углерода при пожарах [97] за период с 2001 по 2023 годы и оценена их связь с тенденциями изменения ключевых климатических переменных [48]. Для выделения пиромов был использован полный набор средств контроля за пожарами. Климатические параметры включали показатели пожароопасной погоды [99], влажность почвы [66], степень нестабильности атмосферы (представленную непрерывным индексом Хейнса) [21] и частоту разрядов молний [44]. Контроль за растительностью включал оценку потенциальных запасов горючих материалов в растительном покрове, его продуктивность в течение вегетационного периода, представленную нормализованным разностным индексом растительности, и степень сомкнутости насаждений [42]. Факторы, контролируемые человеком, включали плотность населения [22], площадь пахотных земель и пастбищ [3] и густоту дорожной сети [63]. Включены в расчет также особенности рельефа [2] из-за его потенциального влияния на поведение пожара [21]. Каждая из этих переменных продемонстрировала способность объяснять пространственную или временную изменчивость размера сгоревших площадей [48].

Концепция пирома была впервые введена К. Арчибальдом с соавторами [5] в качестве пирогеографического аналога биогеографической концепции биома. Биомы определяются не только их наблюдаемыми биологическими характеристиками, но и климатическими и другими факторами окружающей среды, которые вызывают возникновение определенных биологических характеристик. В предыдущих работах пиромы характеризовались только наблюдаемыми характеристиками, такими, как размер, продолжительность, интенсивность и частота пожаров [5, 19]. В данном исследовании концепция пирома была расширена, и в нее включена систематическая группировка экорегионов, основанная на эффективности климатических и других экологических мер контроля за пожарами [48].

Этот подход обогащает концепцию пирома аспектами, отражающими сложность, присущую изучению биомов, и в то же время дает критическое представление о различной чувствительности пиромов к различным аспектам глобальных изменений. Анализ глобальных лесных пожаров выявил быстрое увеличение выбросов от пожаров во внетропических лесах, которое превысило снижение выбросов от пожаров в тропических лесах в период с 2001 по 2023 годы. Это увеличение показало, что климатический контроль за лесными пожарами превосходит человеческий контроль за тенденциями выбросов при пожарах в глобальном масштабе [48]. Понимание причин возникновения пожаров в различных пиромах имеет важное значение для разработки целенаправленных стратегий прогнозирования и управления рисками возникновения пожаров. Объединение лесных экорегионов в пиромы с различными мерами контроля за пожарами, дало возможность лучше понять региональные различия в динамике пожаров и их чувствительность к изменению климата. Такой подход позволяет изолировать последствия изменения климата от других влияющих факторов, таких как землепользование и продуктивность растительности [48].

Выполненное исследование [48] показало, что выбросы от внетропических лесных пожаров существенно возросли в связи с изменением климата. Выбросы от пожаров в одном из внетропических очагов, охватывающем бореальные леса Евразии и Северной Америки, почти утроились в период с 2001 по 2023 годы. Это увеличение было связано с ужесточением пожароопасных погодных условий, снижением влажности почвы и повышением продуктивности растительного покрова. Напротив, тропические пожары показали снижение выбросов при пожарах, связанное с уменьшением масштабов вырубки лесов во влажных тропических лесах и увеличением фрагментации сухих тропических лесов в сельском хозяйстве и других видах землепользования [48].

В целом, за исследуемый период (с 2001 по 2023 годы) выбросы углерода при лесных пожарах во всем мире увеличились на 60%, причем наиболее существенный вклад в это внесли внетропические регионы. Увеличение активности внетропических пожаров свидетельствует о сильном влиянии климатических факторов по сравнению с деятельностью человека, которая играет более доминирующую роль в тропических регионах. Увеличение выбросов углерода при лесных пожарах было объяснено изменениями как в масштабах, так и в серьезности пожаров (измеряемыми в пересчете на выбросы углерода на единицу сгоревшей площади). Во время пожаров во внетропических лесах наблюдается значительное усиление интенсивности пожаров наряду с расширением площадей, затронутых огнем. Этот результат показывает, что интенсивность и серьезность пожаров во внетропических лесах возрастает, что согласуется с тем, что пожары затра-

гивают более сухие и легковоспламеняющиеся запасы горючих материалов по мере потепления климата и учащения засух [48].

Таким образом, на мировом уровне от 50 до 60 % выбросов углерода происходит от пожаров в саваннах. Это создает серьезную проблему для глобальных целевых показателей по борьбе с изменением климата, поскольку пожары снижают способность лесов поглощать углерод. Эффективное лесопользование и политика, направленные на сокращение выбросов парниковых газов, необходимы для снижения этих рисков. Выполненное исследование подчеркивает важность учета региональных различий в способах контроля за пожарами при разработке противопожарных мероприятий и защиты лесных экосистем. Активные меры, такие как мониторинг изменений в продуктивности растительного покрова, могут помочь определить приоритетность областей для ведения лесного хозяйства во внетропических районах. При тропических пожарах уменьшение количества возгораний при экстремально благоприятных погодных условиях и предотвращение фрагментации лесов должны защитить леса и усилить депонирование углерода. В регионах с длительной историей тушения пожаров смещение акцента на управляемые, экологически более благоприятные пожары, может помешать преобразованию источников возгорания в поглотители углерода. Устранение первопричин изменения климата, в частности выбросов ископаемого топлива, имеет решающее значение для минимизации будущих рисков возникновения лесных пожаров во всем мире и обеспечения устойчивости лесов в будущем. Кроме того, выполненная работа свидетельствует о необходимости более полной отчетности о выбросах при лесных пожарах перед Организацией Объединенных Наций в рамках национальных отчетностей об антропогенных потоках углерода. Существующая норма учета выбросов от естественных лесных пожаров, как на управляемых, так и на неуправляемых землях, все больше противоречит наблюдаемому росту выбросов от пожаров, связанному с антропогенным изменением климата. Это способствует возникновению разрывов между антропогенными балансами содержания углерода, которые официально представляются в Организацию Объединенных Наций, и бюджетами, составленными на основе моделей и наблюдений за наземными запасами углерода или концентрациями CO_2 в атмосфере. Имеется потенциальная возможность существенного завышения запасов углерода (и, следовательно, кредитов на содержание углерода) в рамках схем лесовосстановления во внетропических лесах, если растущий риск возникновения пожаров не будет должным образом учтен в протоколах аккредитации [48].

Прогнозирование эмиссии углерода от пожаров, вырубки лесов и индустриальных выбросов на основе модели глобального биогеохимического цикла

Изложенные выше результаты исследования выбросов углерода от лесных пожаров посвящены констатации прогрессирующих выбросов углерода в течение последних 20 лет с расчетом конкретных количественных показателей. Поскольку Парижским соглашением предусмотрено, что рост CO_2 не должен приводить к росту температуры атмосферы выше 2^0 С, большое внимание уделяется вопросам включения моделей природных пожаров в глобальные модели Земной системы. Представляет интерес результат моделирования глобального биогеохимического цикла CO_2 и прогноза роста CO_2 в атмосфере на ближайшие 10-летия при разных сценариях, в том числе с учетом лесных пожаров [88]. В основе расчетов лежит глобальная пространственная модель, включающая три функциональных блока: «Растения – почва – атмосфера», «Океан – Атмосфера» и «Антропогенные воздействия». В исходных данных территория всей планеты разделена на ячейки размером 50×50 км, и предполагается, что в каждой ячейке суши находится растительность одного типа. Переменными модели для каждой ячейки являются количество углерода в массе растительности, органического вещества почвы, количество углерода в атмосфере, среднегодовые температура воздуха и количество осадков. Модель описывает процессы роста и отмирания растительности, накопления и разложения гумуса в терминах обмена углеродом между атмосферой, растениями и гумусом почвы в каждой ячейке суши и включает более 150 тысяч дифференциальных уравнений [88].

Были проведены два расчета, являющиеся одновременно и прогнозом, и иллюстрацией к пониманию различия проявления пожаров лесов и их вырубки. В первом вычислительном эксперименте совокупный антропогенный эффект включал индустриальные выбросы CO_2 и пожары лесов, во втором – индустриальные выбросы CO_2 и вырубку лесов. Рис. 9 иллюстрирует полученную расчетом динамику содержания CO_2 в атмосфере и в биомассе растительности в интервале 1950–2100 годов в результате совокупного влияния промышленных выбросов, лесных пожаров и вырубки лесов.

Согласно выполненному прогнозу, лесные пожары и вырубка лесов дают меньший вклад в выбросы CO_2 в атмосферу по сравнению с индустриальными выбросами. Однако, если при гипотетическом отсутствии лесных пожаров концентрация углекислоты в атмосфере к 2100 году по отношению к базовому 1860 году увеличится примерно в 2,8 раза, то с учетом пожаров – почти в 3,5 раза. Согласно рис. 9, количество

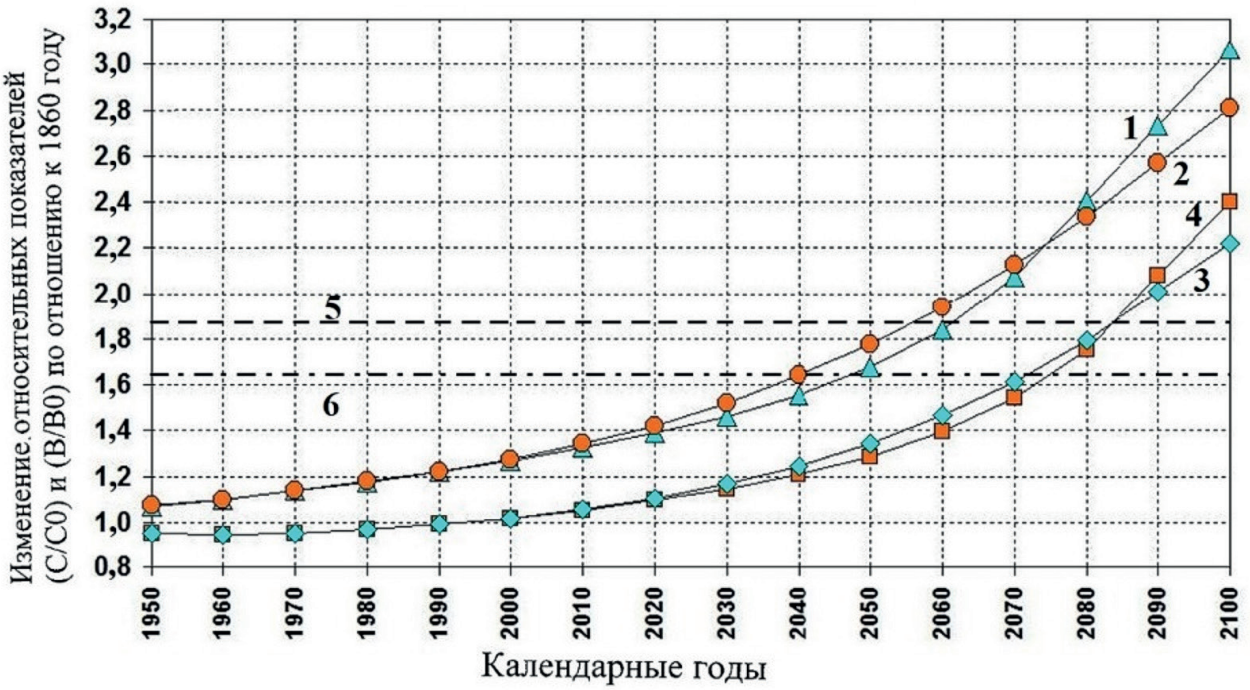


Рис. 9. Прогноз относительного роста концентрации CO_2 (C/C0) с 1950 по 2100 годы вследствие: (1) индустриальных выбросов CO_2 и пожаров и (2) индустриальных выбросов CO_2 и вырубки лесов; и прогноз относительного роста биомассы лесов (B/B0) за тот же период вследствие: (3) индустриальных выбросов CO_2 и пожаров и (4) индустриальных выбросов CO_2 и вырубки лесов; (5) и (6) линии, соответствующие концентрации атмосферной CO_2, обеспечивающей увеличение температуры атмосферы не выше соответственно 2^0 C и $1,5^0$ C [88].

CO_2 в атмосфере с течением времени увеличивается при всех сценариях. При этом влияние вырубки оказывается больше, чем пожаров, и CO_2 от вырубки до 2070 г. увеличивается быстрее, чем от пожаров, а растительная биомасса с учетом пожаров до 2085 года наоборот растет быстрее, чем с учетом вырубки лесов. По мере роста концентрации CO_2 в атмосфере и глобального потепления частота и интенсивность пожаров увеличивается, и влияние пожаров будет опережать влияние вырубки лесов. Таким образом, возникает положительная обратная связь между глобальным потеплением и выбросами от лесных пожаров лесов – чем больше глобальное потепление, тем больше выбросы [88].

Эмиссия углерода от лесных пожаров в Северной Америке и экономическая эффективность борьбы с ними

Чтобы ограничить повышение средней глобальной температуры поверхности земли на 1,5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем, выбросы углекислого газа должны достичь нуля к середине столетия различными путями, включая изменения в землепользовании [76]. Бореальные леса, которые занимают площадь около 16,6 млн. км^2 в приполярном регионе и содержат примерно две трети глобального лесного углерода [9], могут сыграть огромную роль в режиме будущих выбросов углерода, связанных с пожарами. Несмотря на то, что все более распространяющиеся бореальные лесные пожары ускоряют выброс углерода, накопленного в этих экосистемах [98], ни влияние этих будущих выбросов на соответствующие углеродные бюджеты, ни потенциал борьбы с пожарами для их сдерживания, количественно не были оценены [70].

Преобладающий пожарный режим бореальной части Северной Америки характеризуется редкими, но очень сильными верховыми пожарами [77]. При этом текущая частота пожаров и площадь выгорания превышают показатели прошлых пожароопасных периодов [52]. За последние 60 лет площадь пожаров в бореальной части Северной Америки почти удвоилась, а количество крупных пожаров (площадью более 1000 км^2) увеличилось, особенно в западной части Северной Америки [36]. Бореальные леса Канады более разнообразны, чем леса Аляски, как с точки зрения видового состава и периодичности возникновения пожаров, так и с точки зрения борьбы с ними [77], однако риск увеличения выбросов парниковых газов, вызванного пожарами, остается высоким во всех экорегионах. Температура во всем бореальном био-

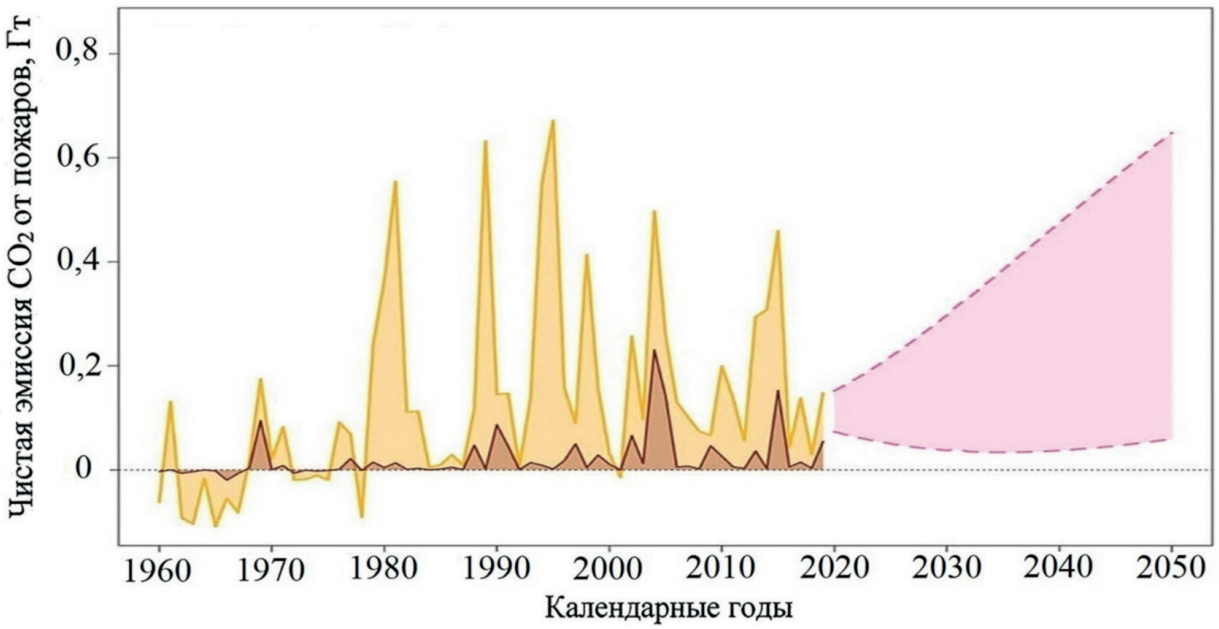


Рис. 10. Наблюдаемые в течение 1960-2019 годов и прогнозируемые на 2020-2050 годы чистые годичные выбросы CO_2 в бореальной части Северной Америки. Коричневые области представляют выбросы бореальных лесов Аляски, в то время как оранжевые области представляют совокупные выбросы бореальных лесов Северной Америки (Аляски и Канады). Розовые области показывают диапазон прогнозируемых среднегодовых выбросов до середины столетия для бореальной части Аляски и Канады [70].

ме повышается почти в два раза быстрее, чем среднемировая [7]. По прогнозам, в связи с дальнейшим потеплением, а также более частыми грозами [98], площадь сгоревших территорий в циркумбореальном регионе в течение следующих нескольких десятилетий должна увеличиться [53]. Борьба с бореальными пожарами дает возможность сокращения выбросов. В течение 60 лет пожары в бореальных районах Северной Америки устранялись, главным образом, путем тушения, главная цель которого состояла в защите населения и инфраструктуры [10].

Цель специального исследования, проведенного в бореальных лесах Северной Америки [70], состояла в оценке не только будущих выбросов углекислого газа в результате лесных пожаров, но также экономической эффективности защиты запасов бореального лесного углерода посредством борьбы с пожарами. Проведенный анализ выбросов углекислого газа к середине века включал всю Северную Америку, в то время как оценка экономической эффективности борьбы с пожарами в северных районах, как стратегии сокращения выбросов, была сосредоточена на Аляске. Согласно опубликованным прогнозам, площадь выгоревших лесов на Аляске с 2020 по 2050 годы увеличится на 24%-169%, а в бореальных лесах Канады на 36%–150% (рис. 10). Если текущий уровень тушения пожаров сохранится до середины столетия, лесные пожары в бореальной части Северной Америки приведут к суммарным выбросам от 1,33 до 11,93 Гт углекислого газа. Усиленная борьба с пожарами могла бы снизить выброс CO2 в период с 2021 по 2050 годы до уровня от 0,89 до 3,87 Гт [70].

Результаты построенной линейной модели «случайный лес» показали, что отношение к зоне управляемых пожаров является важным фактором, определяющим их площадь, и объясняет ~22% общей изменчивости конечного размера пожара. В подмножество предикторов регрессии вошло 11 переменных, включая состав растительности, вид горючего материала, погодный фактор, причину и год возникновения пожара, а также отношение к зоне управляемых пожаров. После обратного преобразования и перекрестной проверки коэффициент детерминации модели составил 0,43. Оценка важности условных переменных [86] показала, что, хотя такие факторы, как состав растительности и погодные условия важны для прогноза возникновения пожаров, отношение к зоне управляемых пожаров была пятым по значимости фактором, определяющим масштабы пожара, и только максимальная температура, средняя температура, максимальная влажность воздуха и причина возникновения пожара были отнесены к более важным факторам. Выявлена отрицательная связь между усилиями по тушению в зоне управляемых пожаров и размерами пожара: увеличение общих расходов по тушению пожаров на 1% уменьшало их площадь на 0,21 ± 0,10% [70].

Установлено, что средняя стоимость предотвращения выбросов CO_2 за 1 т составляет 12,63 долл. США.

Выбросы от сжигания топлива техникой при тушении пожаров составили около 0,57% от годового объема чистых выбросов от лесных пожаров. Средние затраты на борьбу с пожарами на Аляске составили примерно 133 млн долларов США. Для поддержания выбросов углекислого газа в результате лесных пожаров на Аляске на историческом уровне в течение следующего десятилетия потребуются инвестиции в размере 696 млн долларов США в год. В течение следующих 30 лет для сокращения выбросов до исторического уровня потребуются инвестиции в размере от 7,1 до 50 млрд долларов [70].

Полученные результаты показывают, что лесные пожары в бореальной части Северной Америки представляют собой как существенный риск увеличения выбросов углекислого газа, так и, в частности, для бореальных лесов Аляски, значительные возможности для экономически эффективного ограничения этих выбросов за счет усиления борьбы с пожарами. Полученные результаты показывают, что увеличение инвестиций в борьбу с бореальными пожарами следует рассматривать в рамках стратегий по смягчению последствий изменения климата, необходимых для того, чтобы к середине столетия свести выбросы к нулю и ограничить повышение глобальной температуры до 1,5°C, что является целью, установленной. Парижским соглашением по климату. При отсутствии борьбы с пожарами в северных районах Аляски и Канады они могут привести к выбросу от 1,33 до 11,93 Гт CO_2 в период с 2020 по 2050 годы, или от 0,33 до 2,98% от оставшихся глобальных выбросов углекислого газа, связанных с поддержанием температуры в пределах 1,5°C. Полученные результаты показывают, что увеличение ресурсов, выделяемых на борьбу с пожарами, может стать экономически эффективной стратегией ограничения потерь глобально значимых количеств углерода, накопленных в бореальных лесах [70].

Лесные пожары и эмиссия углерода в Китае

В Китае опубликован большой объем данных о выбросах от лесных пожаров, но они были сосредоточены главным образом на небольших территориях и краткосрочных периодах [73, 104]. В частности, в центральном и восточном Китае с 2003 по 2015 годы была выполнена оценка выбросов загрязняющих веществ в результате лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования [104]. Большинство исследований были сосредоточены на выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, а исследования выбросов CO_2 были ограничены [105]. При оценке последствий пожаров на пахотных землях в условиях сильного задымления в провинции Хэйлунцзян была использована геохимическая модель, показавшая наличие высокой неопределенности в существующей глобальной базе данных о выбросах от пожаров (GFED) версии 4.1 [105]. Существенная неопределенность в оценке выбросов от лесных пожаров в существующих кадастрах выбросов была отмечена и в других исследованиях [94]. Изучению долгосрочной динамики выбросов от лесных пожаров фактически не уделялось должного внимания [32].

В долгосрочном исследовании по оценке выбросов CO_2 в результате природных пожаров на территории Китая за период с 2001 по 2022 годы [32] были оценены пожары в лесах, кустарниках, травяном покрове и пахотных землях. Данные о площади сгоревших участков были получены с использованием платформы MODIS-MCD64A1 с пространственным разрешением 500 м [30], а данные о растительном покрове получены из набора данных дистанционного зондирования (CNLUCC) с пространственным разрешением 30 м. Данные о нормализованном разностном растительном индексе (NDVI) получены из регионального 250-метрового набора данных для Китая [32].

Коэффициент выбросов представляет количество газа, выделяющегося при сгорании единицы массы сухого горючего материала, обычно в г/кг. На коэффициенты выбросов влияют различные факторы, включая горючесть пород деревьев, интенсивность горения и различия в типах растительного покрова [59]. Чтобы обеспечить максимальную точность оценки выбросов от лесных пожаров, были выбраны соответствующие коэффициенты выбросов. Важным фактором, влияющим на точность оценок выбросов CO_2 при лесных пожарах, является также эффективность сжигания биомассы, на которую влияют интенсивность и тип лесного пожара, содержание влаги и количество горючих материалов, а также метеорологические условия. Для расчета эффективности сжигания для древостоев, кустарников и лугопастбищных угодий использована эмпирическая зависимость между эффективностью сжигания и долей растительного покрова на территории [40]. Количество выбросов CO_2 от лесных пожаров рассчитано по формуле, включающей произведение сгоревшей площади (га), наземной биомассы (т/га), коэффициента выбросов и коэффициента эффективности сжигания [32].

Общий объем выбросов CO_2 в результате природных пожаров в период с 2001 по 2022 годы составил 693,7 Гт при среднегодовом значении 31,5 Гт, что составляет 0,46% от глобального объема выбросов при всех типах пожаров и 0,52% выбросов от сжигания ископаемого топлива в Китае. Выбросы CO_2 в результате лесных пожаров в Китае были относительно низкими и медленно снижались на 0,43 Гт в год (рис. 11) [32].

Ежегодные выбросы CO_2 в результате пожаров различных типов характеризовались разными временными тенденциями. Тенденция к снижению выбросов в

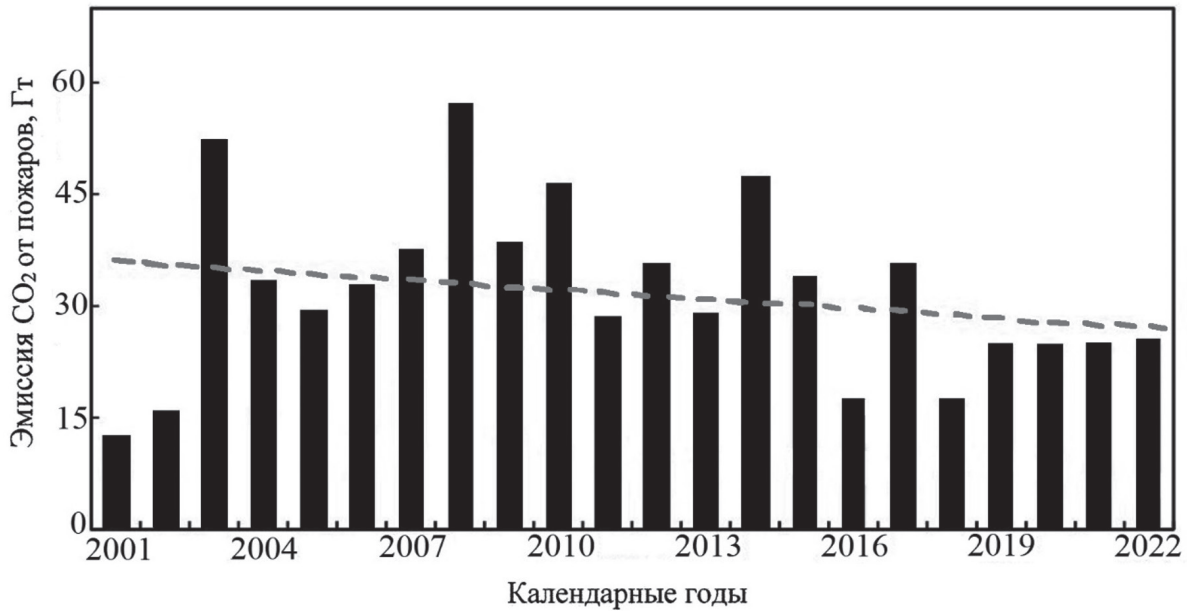


Рис. 11. Ежегодные выбросы CO_2 в результате пожаров в растительном покрове Китая с 2001 по 2022 годы [32].

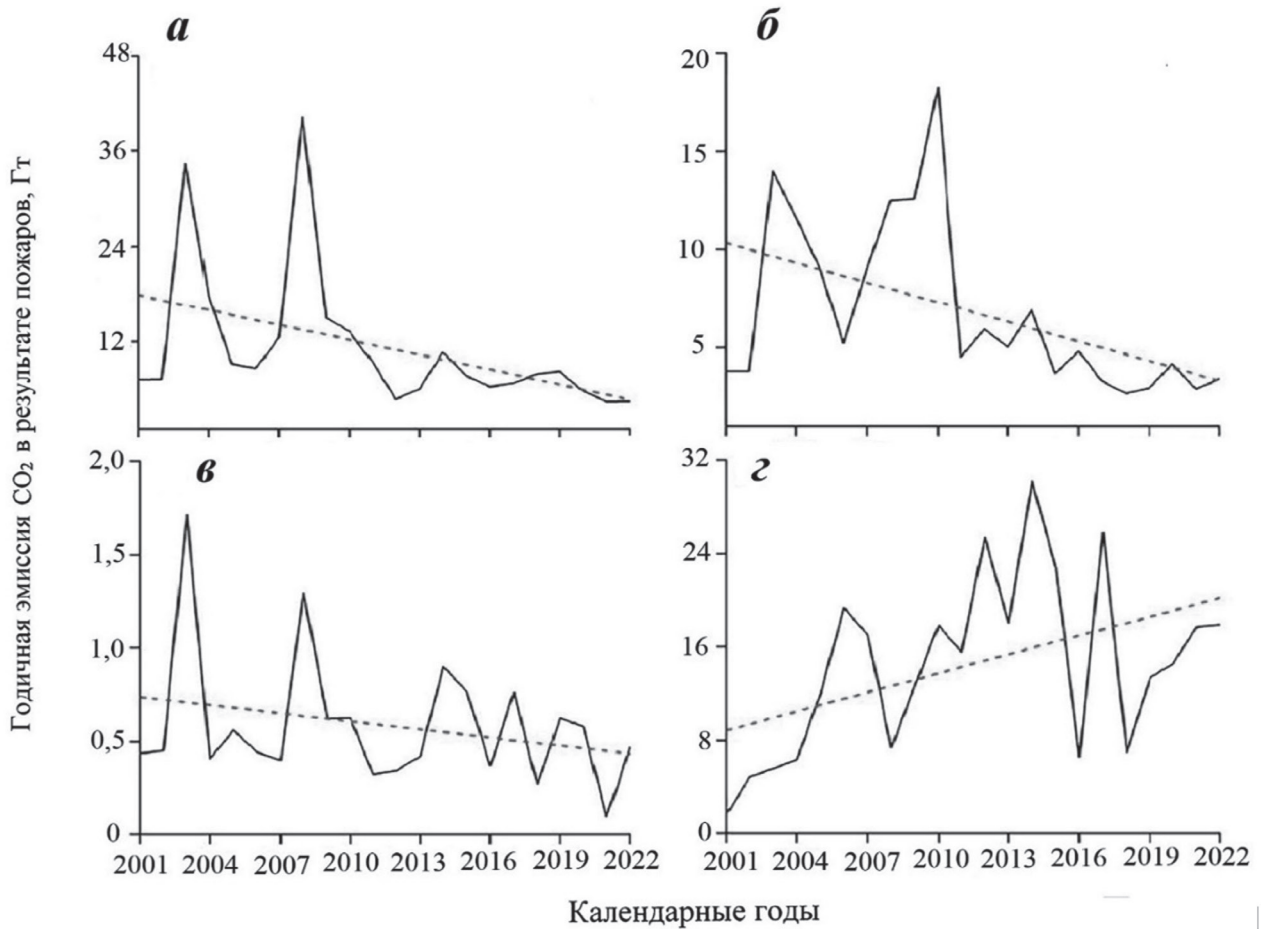


Рис. 12. Динамика ежегодных выбросов CO_2 в Китае в результате пожаров в лесном (*а*) и кустарниковом (*б*) покрове, в лугопастбищных угодьях (*в*) и на пахотных землях (*г*) [32].

лесах и кустарниках была значительной и составила 0,63 и 0,33 Гт в год соответственно (рис. 12*а* и 12*б*). Такое снижение получено за счет эффективных мер борьбы с лесными и кустарниковыми пожарами. Напротив, выбросы на пахотных землях показали четкую тенденцию к росту, увеличившись на 0,63 Гт в год (рис. 12*в*), что может быть связано с расширением сельскохозяйственной деятельности, изменениями в землепользовании и повышением интенсивности возделывания культур. Динамика выбросов на лугопастбищных угодьях была относительно стабильной (рис. 12*г*), на что могло повлиять сочетание экологических и антропогенных факторов [32].

Факторы, влияющие на выбросы CO_2 в результате лесных пожаров, многочисленны и сложны. Для анализа связи между выбросами CO_2 в результате лесных пожаров и такими климатическими факторами, как температура, осадки, относительная влажность, скорость ветра, интенсивность солнечной инсоляции, а также первичная продукция растительности и индекс NDVI, был использован коэффициент корреляции Спирмена *r*. Основными факторами, влияющими на выбросы CO_2 при лесных и кустарниковых пожарах, были суммарное количество солнечных часов в сутки (*r* равен соответственно –0,41 и 0,25) и NDVI (r равен соответственно –0,35 и 0,37), в то время как основным фактором, влияющим на выбросы CO2 при пожарах в лугопастбищных угодьях, была температура (r = –0,45). Пожары на пахотных землях, вызванные деятельностью человека, показали отрицательную корреляцию с валовым внутренним продуктом (r = –0,52) и плотностью населения (r = –0,51).

На выбросы CO_2 от лесных пожаров влияют изменения в технике и интенсивности борьбы с пожарами [28, 105]. Органами власти Китая была реализована специальная политика по предотвращению лесных пожаров, возгораний кустарников и лугопастбищных угодий, что позволило снизить частоту возникновения лесных пожаров, в результате чего выбросы CO_2 от лесных и кустарниковых пожаров с 2001 года значительно снизились (рис. 13а, б). В целом с 2001 по 2019 годы средние выбросы CO_2, вызванные лесными, кустарниковыми и луговыми пожарами, в соответствии с осуществляемой политикой борьбы с пожарами, снизились более чем на 80% по сравнению с выбросами от природных пожаров при отсутствии борьбы с ними [46].

Одновременно с изложенным выше было проведено исследование по оценке выбросов основных углерод содержащих газов в результате лесных пожаров в материковом Китае за более короткий период последних лет, с 2011 по 2021 годы [24]. Информация о лесных пожарах была получена с помощью инструмента Google Earth Engine (GEE) на основе объединения результатов платформы MODIS и данных о глобальной лесной надземной биомассе, полученной в рамках программы «Инициатива по биомассе и изменению климата» (CCI BIOMASS). Используя модель плотности горючих материалов и принимая во внимание коэффициенты выбросов углерода в различных растительных сообществах, установлено, что с 2011 по 2022 год пожары в материковом Китае привели к выбросам 46,9 Гт углерод содержащих газов. Углекислый газ является преобладающей формой выбросов углерода

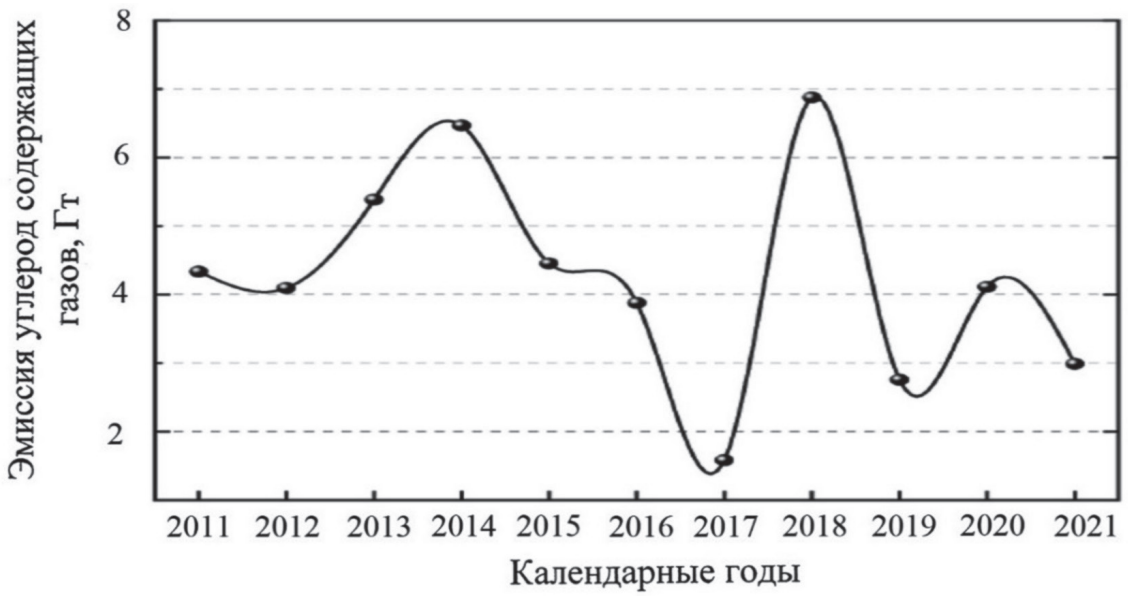


Рис. 13. Ежегодные выбросы углеродсодержащих газов в Китае в результате лесных пожаров с 2011 по 2021 годы [24].

в результате лесных пожаров, составляя около 89,8% от общего объема выбросов. Среднегодовые выбросы углерод содержащих газов составили 4,3 Гт, что существенно ниже предыдущего результата оценки выбросов CO_2 только от лесных пожаров, за период с 2001 по 2022 годы (около 10 Гт в год) [32]. Как показано на рис. 13, межгодовые колебания выбросов углерод содержащих газов в результате лесных пожаров демонстрируют закономерность, характеризующуюся первоначальным увеличением, последующим снижением, еще одним увеличением и, в конечном итоге, снижением [24].

Но в целом тенденция последовательного снижения выбросов CO_2 в Китае от лесных пожаров за последние годы подтверждает закономерность, показанную на рис. 11 и 12 *а-в*.

Лесные пожары и эмиссия углерода в России

Площадь лесов России составляет 815 млн га, или 20 % от общей площади лесов в мире. Динамика лесов и управление ими на этой обширной территории играют важную роль в глобальном круговороте углерода и влияют на уровень CO_2 в атмосфере [50]. В последние годы пожары в российских лесах стали известны во всем мире как катастрофические: они распространяются на обширные территории, образуя густой дым, который достигает других регионов и стран [78, 79]. Согласно отчету Службы мониторинга атмосферы Copernicus [17], в результате пожаров в Дальневосточном федеральном округе России в период с июня по август 2020 года было выброшено в общей сложности около 540 млн т CO_2, что превышает предыдущий самый высокий объем выбросов в 2003 году. Согласно выполненным расчетам [78], основанным на картах лесной растительности и лесопожарного районирования, дальневосточные леса охватывают более 304 млн га, из них 160 млн га (54%) не подлежат охране от пожаров. Из-за усиления лесных пожаров происходит выброс все большего количества углерода [61], что усугубляет последствия изменения климата [110].

Национальный кадастровый отчет России согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) [90] содержит официальные значения поглощения углерода лесами и выбросов в результате лесных пожаров. Существенный недостаток национального кадастрового отчета [90] заключается в том, что он не отражает выбросы из неуправляемых (резервных) лесов в соответствии с действующей отчетностью РКИК ООН. Кроме того, официальная государственная статистика содержит устаревшие данные, которые соответствуют состоянию лесов на 2012 год, а не на 2020 год. Поэтому для всестороннего анализа выбросов во всех лесах России было выполнено исследование на основе спутниковых данных [79].

Полный набор информации о составе атмосферы [100] предоставляет алгоритм Copernicus Atmosphere Monitoring Service [18]. Он основан на следующем надежном физическом принципе: скорость выделения теплового излучения при пожаре зависит от скорости сгорания топлива и образования дыма. Усредненные за день данные о радиационной мощности и интенсивности пожаров используются для оценки выбросов газов и твердых частиц в глобальном масштабе. Для анализа поврежденных пожарами районов [30] за 2010-2020 годы была использована информация о сгоревших площадях, основанная на данных MODIS (MCD64A1). Продукт MCD64A1 с разрешением 500 м в пикселях включает в себя информацию о дате пожара, неопределенности данных о пожаре, гарантии качества данных, первом и последнем дне надежного обнаружения изменений. Спутниковые наблюдения MODIS предоставляют глобальные данные о пространственно-временных закономерностях сгоревшей фитомассы [4]. Исходные данные о площади сгоревших лесов, представленные в растровом формате, были преобразованы в проекцию ESRI:102025, и построены векторные полигоны на основе растра, совмещенные с векторной маской лесной растительности [18]. Затем рассчитана площадь сгоревших лесов с использованием инструмента QGIS v 3.16 [79].

Авторы [79] отмечают, что в российском законодательстве нет определения понятия «управляемый лес». В Лесном кодексе 2006 года, регулирующем правила ведения лесного хозяйства, не используются термины «управляемый» и «неуправляемый лес». Отсутствие терминологии и четкого различия между управляемыми и неуправляемыми категориями, которые должны быть прозрачными в соответствии с руководящими принципами Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) приводит к непониманию методологии управления лесами на региональном уровне и вносит неопределенность в глобальный углеродный цикл российских лесов. В начале подготовки отчетности по Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК ООН) в 2011 году в России было решено считать охраняемые и лесопромышленные леса управляемыми, а резервные леса неуправляемыми, в результате чего не были учтены какие-либо изменения в поглощении углерода или его потерях в резервных лесах, охватывающих 21,6% лесов России. Хотя резервные леса поглощают около 120 тыс. тонн углерода в год [26] и существует неопределенный объем потерь углерода, связанных с пожарами, нападениями насекомых и незаконными рубками, резервные леса по-прежнему не включаются в отчеты согласно РКИК ООН [79].

Оценка площадей сгоревших лесов [79] была выполнена с учетом качества противопожарного контроля за лесами, т.е. на площадях наземного, авиационного

и космического контроля, составляющих соответственно 9, 40 и 43 % общей площади лесов. Наибольшее сокращение площади лесов с 2000 по 2020 год наблюдалось в зоне космического контроля (резервные леса Сибири и Дальнего Востока) - на 15 млн га. Площадь лесов в зоне авиаконтроля сократилась на 5 млн га. Были сопоставлены выгоревшие площади согласно данным Национального кадастрового отчета (NIR) и согласно спутниковым данным MODIS на основе продукта MCD64A1. Результаты представлены на рис. 14. Общая площадь сгоревших лесов России за 20012020 годы, представленная по данным Национального кадастрового отчета за 2021 год была занижена на 95,9 млн га (или в среднем на 4,8 млн га за 1 год).

Средние годичные выбросы в результате лесных пожаров в период с 2001 по 2020 годы по данным Национального кадастрового отчета составили 81,2 млн т углерода, или 298 млн т CO_2. Чтобы получить более точные данные, были сопоставлены потери углерода вследствие лесных пожаров по Национальному кадастровому отчету и оцененные Службой мониторинга атмосферы [18] (рис. 15).

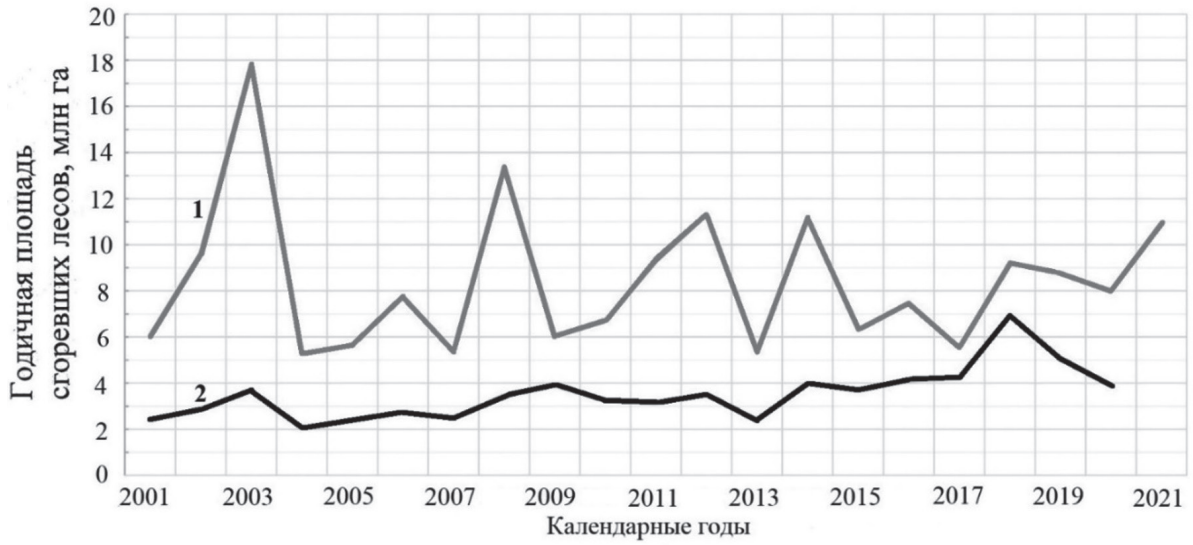


Рис. 14. Годичная площадь сгоревших лесов по данным MODIS (MCD64A1) (1) и Национального кадастрового отчета (NIR) (2) и в России с 2001 по 2021 годы [79].

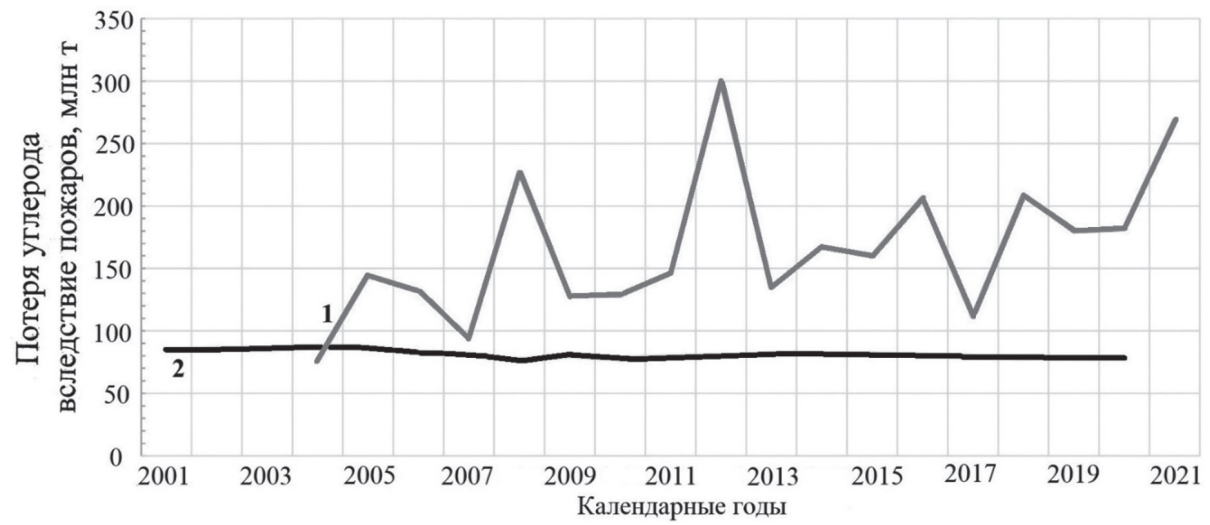


Рис. 15. Потери углерода в результате лесных пожаров, которые оцениваются с использованием данных Службы мониторинга атмосферы Copernicus (1) и о которых сообщается в Национальном кадастровом отчете (NIR) (2) за период с 2001 по 2021 годы [79].

Выполненные оценки с использованием данных Службы мониторинга атмосферы [18] показали, что с 2011 по 2020 годы российские леса ежегодно выбрасывали в атмосферу 179,7 млн т углерода, что эквивалентно 659 млн т CO_2. Таким образом, около 99,9 млн т углерода (или 366 млн т CO_2) не отражено в Национальном кадастровом отчете за тот же период. В целом, совокупные выбросы в результате пожаров в российских лесах с 2004 по 2020 годы были выше на 1359 млн т углерода, и эти цифры до сих пор не указываются в кадастровых отчетах. В целом, в 2016-2021 годы на 417,7 млн га лесов резервной зоны (43% площади лесов) приходилось около половины (53 %) всех выбросов углекислого газа от пожаров, в то время как на остальные 487 млн га приходилась другая половина (47%). Разрушительные пожары в резервной зоне увеличили средние годичные выбросы с 25 млн тонн (с 2004 по 2010 годы) до 66,2 млн т (с 2011 по 2020 годы) и за период с 2016 по 2021 годы достигли 92,1 млн тонн. Вследствие игнорирования эмиссии углерода от пожаров резервных лесов в Национальных кадастровых отчетах заявлено лишь 45% общей фактической эмиссии [79].

С учетом установленных потерь углерода в результате лесных пожаров была предложена переоценка чистого поглощения углерода российскими лесами [79]. Для этого была использована методологически наиболее строгая (поскольку она учитывает все типы растительности) оценка поглощения углерода с учетом резервных лесов по методике А. Н. Филипчука [26]. Расчет был выполнен на основе данных Государственного лесного реестра за 2015 год с использованием методологии МГЭИК. Накопление углерода в российских лесах в 2015 году составило 630 ± 110 млн тонн [26], что примерно в два раза превышает официальные 332 млн тонн углерода в год согласно Национальному кадастровому отчету. Основное отличие этой оценки от предыдущих заключается в том, что она учитывает накопление углерода в труднодоступных резервных лесах и включает площади кустарников (около 80 млн га) [26]. Полученная оценка чистого поглощения углерода за 2015-2020 годы [79], довольно близка к оценке Д. Щепащенко на основе спутниковых данных за период с 1988 по 2014 годы [81].

Вызовы, связанные с изменением климата, требуют разработки и последовательного проведения особой экологической политики в России Несмотря на то, что ежегодное накопление углерода в российских лесах полностью компенсирует его суммарную промышленную эмиссию, в проведении лесной политики сказывается слабая эффективность Лесного кодекса Российской Федерации 2006 года, которая была поставлена под сомнение профессиональным лесным сообществом практически сразу после его введения [41, 91]. В результате в оценке углеродного бюджета лесного покрова есть существенные неопределенности и недочеты. По крайней мере, одна из них связана с использованием устаревших на 20 лет данных инвентаризации лесов в связи с отменой ГУЛФ, а вторая – с ликвидацией существовавшей ранее лесной охраны. Летом 2010 года в европейской части РФ было зарегистрировано более 6 тыс. пожаров, повлекших выбросы CO_2 в количестве 256 млн т. В это же время в Оренбургской области, где всё лето стояла жара за 40° С, не было потеряно ни одного гектара леса, потому что по согласованию с губернатором действие нового Лесного кодекса было отложено, сохранена служба охраны лесов, и все пожары тушили «в зародыше» [34, 91].

Необходимость усовершенствования системы охраны лесов от пожаров в России является неотложной государственной задачей, однако ее эффективное решение остается пока делом будущего, а ряд государственных решений последних лет нанес непоправимый ущерб существовавшей системе пожарной охраны лесов. Хотя более 87 % лесных пожаров в России происходит по вине населения [65], продолжающаяся административная реформа и постоянные изменения в лесном законодательстве ведут к полному демонтажу системы лесной охраны [49]. Для решения проблемы предупреждения и тушения катастрофических лесных пожаров требуется, прежде всего, восстановление государственной лесной охраны, упраздненной Лесным кодексом 2006 года [91].

Заключение

Глобальные ежегодные выбросы CO_2 в результате лесных пожаров составляют примерно пятую часть глобальных выбросов CO_2 от использования ископаемого топлива, а в некоторых регионах уже сегодня лесные пожары привели к выбросу в атмосферу в два-три раза большего количества CO_2 по сравнению с сжигаемым ископаемым топливом. Дистанционный анализ площадей, пройденных природными пожарами за последние 20 лет, показал наличие как отрицательных, так и положительных тенденций, что связано с получением этих оценок датчиками с грубым пространственным разрешением, непригодными для обнаружения небольших пожаров. При имеющихся сложностях непосредственного измерения выбросов CO_2 при пожарах на основе спутниковых наблюдений, подобные наблюдения за атмосферной окисью углерода (CO), полученные на основе данных ближнего и теплового инфракрасного излучения, обеспечивают альтернативный подход к косвенному отслеживанию выбросов CO_2 при пожарах. За последние 20 лет установлено увеличение выбросов углерода от природных пожаров в бореальных лесах и их снижение в тропиках. На мировом уровне по разным оценкам имеется как снижение, так и повышение уровня выбросов CO_2

при природных пожарах. В результате моделирования глобального биогеохимического цикла CO_2, в том числе с учетом лесных пожаров, установлено, что по мере роста концентрации CO_2 в атмосфере и глобального потепления частота и интенсивность пожаров в ближайшие десятилетия будет возрастать, и возникает положительная обратная связь между глобальным потеплением и выбросами от лесных пожаров лесов.

В бореальной части Северной Америки площадь лесных пожаров за последние 60 лет почти удвоилась, и увеличилось количество крупных пожаров. Согласно прогнозам, к 2050 году лесные пожары здесь могут привести к суммарным выбросам от 1,33 до 11,93 Гт CO_2. Усиленная борьба с пожарами могла бы снизить выброс CO_2 в период с 2021 по 2050 годы до уровня от 0,89 до 3,87 Гт. Показано, что увеличение ресурсов, выделяемых на борьбу с пожарами, может стать экономически эффективной стратегией ограничения потерь глобально значимых количеств углерода, накопленных в бореальных лесах.

В Китае среднегодовой объем выбросов CO_2 в результате природных пожаров в период с 2001 по 2022 годы составил 31,5 Гт, что составляет 0,52% выбросов от сжигания ископаемого топлива. Выбросы CO_2 в результате лесных пожаров в Китае снижались на 0,43 Гт в год за счет осуществления специальной политики по предотвращению лесных пожаров и эффективных мер борьбы с ними.

В России в последние годы лесные пожары стали известны во всем мире как катастрофические: они распространяются на обширные территории, образуя густой дым, который достигает других регионов и стран. При использовании радиометра AVHRR со спутника NOAA оценка среднегодовой площади лесных пожаров с 1998 по 2010 годы составила 8,23 млн га, что в 5,9 раза больше, чем средняя годовая площадь пожаров по официальным данным Росстата за 2000–2009 годы – 1,4 млн га. Последняя цифра относится только к площади управляемых лесов. В результате лесных пожаров с 2001 по 2020 годы средние годичные выбросы по данным Национального кадастрового отчета составили 298 млн т CO_2. Выполненные оценки с использованием данных Службы мониторинга атмосферы Copernicus Atmosphere Monitoring Service показали, что с 2011 по 2020 годы российские леса ежегодно выбрасывали в атмосферу 659 млн т CO_2. Таким образом, выбросы около 361 млн т CO_2 (55%) не отражены в Национальном кадастровом отчете за тот же период. С 2004 по 2021 годы пожары в резервной зоне, где борьба с ними не предусмотрена, увеличили средние годичные выбросы CO_2 с 25 до 92 млн т. Для решения проблемы предупреждения и тушения катастрофических лесных пожаров требуется, прежде всего, восстановление государственной лесной охраны, упраздненной Лесным кодексом 2006 года. В России велика вероятность развития положительной обратной связи между глобальным потеплением и эскалацией катастрофических лесных пожаров.

В целом, в зависимости от применяемых методов, оценки выбросов CO_2 от пожаров за последние десятилетия выявили как положительные, так и отрицательные тенденции, а прогнозы на ближайшие десятилетия однозначно показывают увеличение выбросов CO_2 от природных пожаров, что с учетом глобального потепления означает возможность развития положительной обратной связи двух тенденций.

Благодарности. *Авторы благодарят Николая Ивановича Плюху за помощь в оформлении рисунков.*

Литература

1. Abatzoglou JT, Williams AP, Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices. Geophys Res Lett. 2019;46(1):32-36.
2. Amatulli G, McInerney D, Sethi T et al. Geomorpho90m, empirical evaluation and accuracy assessment of global high-resolution geomorphometric layers. Sci Data. 2020;7(1):162.
3. Andela N, Morton DC, Giglio L et al. A human-driven decline in global burned area. Science. 2017;356(6345):1356-62.
4. Andela N, Morton D, Giglio L et al. The global fire atlas of individual fire size, duration, speed and direction. Earth Syst Sci Data. 2019;11(2):529-52.
5. Archibald S, Lehmann CER, Gómez-Dans JL et al. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. Proc Natl Acad Sci USA. 2013;110(16):6442-7.
6. Balla A, Silini A, Cherif-Silini H et al. The threat of pests and pathogens and the potential for biological control in forest ecosystems. Forests. 2021;12(11):1579.
7. Bekryaev RV, Polyakov IV, Alexeev VA Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming. J. Climate. 2010; 23(14):3888-906.
8. Bowman DMJS, Williamson GJ, Price OF et al. Australian forests, megafires and the risk of

dwindling carbon stocks. Plant Cell Environ. 2021;44(2):347-55.
9. Bradshaw CJA, Warkentin IG Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. Global Planet Change. 2015;128:24-30.
10. Calef MP, Varvak A, McGuire AD et al. Recent changes in annual area burned in interior Alaska: The impact of fire management. Earth Interact. 2015;19(5):1–17.
11. Canadell JG, Meyer CP, Cook GD et al. Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change. Nat Commun. 2021;12(1):6921.
12. Cardil A, De-Miguel S, Silva CA et al. Recent deforestation drove the spike in Amazonian fires. Environ Res Lett. 2020;15(12):121003.
13. Chuvieco E, Pettinari ML, Koutsias N et al. Human and climate drivers of global biomass burning variability. Sci Total Environ. 2021;779:146361.
14. Clarke H, Nolan RH, De Dios VR et al. Forest fire threatens global carbon sinks and population centres under rising atmospheric water demand. Nat Commun. 2022;13(1):7161.
15. International Energy Agency. CO_2 emissions in 2023 - A new record high, but is there light at the end of the tunnel? URL: https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023
16. Cochrane MA Fire science for rainforests. Nature. 2003;421(6926):913-9.
17. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), 2020. Copernicus Reveals Summer 2020's Arctic Wildfires Set New Emission Records [WWW Document]. URL: https://atmosphere.copernicus.eu/copernicus-reveals-summer-2020s-arctic-wildfires-set-new- emission-records.
18. Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2021. Northern Hemisphere Wildfires Follow Pattern of Warm and Dry Weather. URL: https://atmosphere.copernicus.eu/northern-hemisphere-wildfires-follow-pattern-warm-and-dry-weather.
19. Cunningham CX, Williamson GJ, Nolan RH et al. Pyrogeography in flux: Reorganization of Australian fire regimes in a hotter world. Glob Change Biol. 2024;30(1):e17130.
20. Curtis PG, Slay CM, Harris NL et al. Classifying drivers of global forest Loss. Science. 2018;361(6407):1108-11.
21. Di Virgilio G, Evans JP, Blake SAP et al. Climate change increases the potential for extreme wildfires. Geophys Res Lett. 2019;46(1):8517-26.
22. Dobson JE, Bright EA, Coleman PR et al. LandScan: A global population database for estimating populations at risk. Photogramm Eng Remote Sens. 2000;66(7):849-57.
23. Ertugrul M, Varol T, Ozel HB et al. Influence of climatic factor of changes in forest fire danger and fire season length in Turkey. Environ Monit Assess. 2021;193(1):28.
24. Fan D, Wang M, Liang T et al. Estimation and trend analysis of carbon emissions from forest fires in mainland China from 2011 to 2021. Ecol Inform. 2024;81:id.102572.
25. FAO. Global forest resources assessment 2020: Main report. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2020.
26. Filipchuk A, Moiseev B, Malysheva N et al. Russian forests: a new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity. Environ Dev. 2018;26:68-75.
27. Flannigan M, Cantin AS, de Groot WJ et al. Global wildland fire season severity in the 21st century. For Ecol Manag. 2013;294(S1):54-61.
28. Gao J, Yang Y, Wang H et al. Climate responses in China to domestic and foreign aerosol changes due to clean air actions during 2013–2019. Clim Atmos Sci. 2023;6:160.
29. Gatti LV, Basso LS, Miller JB et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. Nature. 2021;595(7867):388-93.
30. Giglio L, Boschetti L, Roy DP et al. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. Remote Sens Environ. 2018;217(7):72-85.
31. Giglio L, Schroeder W, Justice CO. The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. Remote Sens Environ. 2016;178(1):31-41.
32. Gong X, Liu Z, Tian J et al. Global carbon emission accounting: national-level assessment of wildfire CO_2 emission - a case study of China. EGUsphere. 2024. Preprint. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1684
33. Gupta GS. Land degradation and challenges of food security. Rev Eur Stud. 2019;11(1):63.
34. Guo M, Li J, Xu J et al. CO_2 emissions from the 2010 Russian wildfires using GOSAT data. Environ Pollut. 2017; 226:60-8.
35. Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue. Nature. 2007;445(7125):256.
36. Hanes CC, Wang X, Jain P et al. Fire-regime changes in Canada over the last half century. Can J For Res. 2019;49(3):256-69.
37. Hansen MC, Potapov PV, Moore R et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science. 2013;342(6160):850-3.
38. Hansen MC, Wang L, Song XP et al. The fate of tropical forest fragments. Sci Adv. 2020;6(11):eaax8574.
39. Harvey BJ, Donato DC, Turner MG. Drivers and trends in landscape patterns of stand-replacing fire in forests of the US Northern

Rocky Mountains (1984-2010). Landscape Ecol. 2016;31(10):2367-83.
40. Hély C, Caylor K, Alleaume S et al. Release of gaseous and particulate carbonaceous compounds from biomass burning during the SAFARI 2000 dry season field campaign. J Geophys Res. 2003;108(D13):8470.
41. Hitchcock E. The 2006 Forest Code of the Russian Federation: An evaluation of environmental legislation in Russia. ASEES. 2010;24(1-2):19-39.
42. Huete A, Didan K, Miura T et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sens Environ. 2002;83(1-2):195-213.
43. Huo LZ, Boschetti L, Sparks AM. Object-based classification of forest disturbance types in the conterminous United States. Remote Sens. 2019;11(5):477.
44. Janssen TAJ, Jones MW, Finney D et al. Extratropical forests increasingly at risk due to lightning fires. Nat Geosci. 2023;16(12):1136-44.
45. Jhariya MK, Banerjee A, Meena RS, Yadav DK, eds.. Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management. Berlin: Springer; 2019.
46. Jin Q, Wang W, Zheng W et al. Dynamics of pollutant emissions from wildfires in Mainland China. J Environ Manage. 2022;318(9):115499.
47. Jones MW, Abatzoglou JT, Veraverbeke S et al. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. Rev Geophys. 2022;60(3):e2020RG000726.
48. Jones MW, Veraverbeke S, Andela N et al. Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics. Science. 2024;386(6719):eadl5889.
49. Karpachevskiy ML. Forest fires in the Russian taiga: Natural disaster or poor management? In: Taiga Rescue Network Factsheet. Jokkmokk, Sweden: Biodiversity Conservation Center; 2004.
50. Keenan RJ. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. Ann For Sci. 2015; 72(2):145-67.
51. Kelly LT, Giljohann KM, Duane A et al. Fire and biodiversity in the Anthropocene. Science. 2020;370(6519):eabb0355.
52. Kelly R, Chipman ML, Higuera PE et al. Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. Proc Natl Acad Sci USA. 2013;110(32):13055-60.
53. Kitzberger T, Falk DA, Westerling AL et al. Direct and indirect climate controls predict heterogeneous early-mid 21st century wildfire burned area across western and boreal North America. PLoS One. 2017;12(12):e0188486.
54. Krawchuk MA, Haire SL, Coop J et al. Topographic and fire weather controls of fire refugia in forested ecosystems of northwestern North America. Ecosphere. 2016;7(12):e01632.
55. Kurz WA, Hayne S, Fellows M et al. Quantifying the impacts of human activities on reported greenhouse gas emissions and removals in Canada's managed forest: conceptual framework and implementation. Can J For Res. 2018;48(10):1227-40.
56. Lasslop G, Hantson S, Harrison SP et al. Global ecosystems and fire: Multi-model assessment of fire-induced tree-cover and carbon storage reduction. Glob Change Biol. 2020;26(9):5027-41.
57. Liu Z, Ballantyne AP, Cooper LA. Biophysical feedback of global forest fires on surface temperature. Nat Commun. 2019;10(1):214-9.
58. Lizundia-Loiola J, Otón G, Ramo R et al. Spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. Remote Sens Environ. 2020;236:2005-12.
59. Lü A, Tian H, Liu M et al. Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000. J Geophys Res. 2006;111:D05313.
60. Mahmoud MI, Campbell MJ, Sloan S et al. Land-cover change threatens tropical forests and biodiversity in the Littoral Region, Cameroon. Oryx. 2020;54(6):882-91.
61. Masyagina OV. Carbon dioxide emissions and vegetation recovery in fire-affected forest ecosystems of Siberia: Recent local estimations. Curr Opin Environ Sci Health. 2021;23:100283.
62. Matveev SM, Slavskiy VA, Sheshnitsan SS et al. Sequestered carbon in the above-ground phytomass of forests affected by fires of different intensity. Rus J Ecol. 2025; 56(3):245-57.
63. Meijer JR, Huijbregts MAJ, Schotten KCGJ et al. Global patterns of current and future road infrastructure. Environ Res Lett. 2018;13(6):064006.
64. Ménard LP, Ruel JC, Thiffault N. Abundance and impacts of competing species on conifer regeneration following careful logging in the eastern Canadian boreal forest. Forests. 2019;10(2):177.
65. Mollicone D, Eva H, Achard F. Human role in Russian wild fires. Nature. 2006;440(7083):436-7.
66. Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth Syst Sci Data. 2021;13(9):4349–83.
67. Nikonovas T, Doerr SH. Extreme wildfires are turning the world's largest forest ecosystem from carbon sink into net-emitter. Conversation Newslett. 2023:1-5. URL: https://phys.org/

news/2023-03-extreme-wildfires-world-largest-forest.html
68. Olson DM, Dinerstein E, Wikramanayake ED et al. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on earth. Bioscience. 2001;51(11):933.
69. Pausas JG, Keeley JE. Wildfires and global change. Front Ecol Environ. 2021;19(7):387-95.
70. Phillips CA, Rogers BM, Elder M et al. Escalating carbon emissions from North American boreal forest wildfires and the climate mitigation potential of fire management. Sci Adv. 2022;8(17):eabl7161.
71. Pinto FAN. Saving global forests from the changing climate. Science Insights. 2025; 47(5): 2025-9.
72. Potapov P, Hansen MC, Kommareddy I et al. Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping. Remote Sens. 2020);12(3):426.
73. Qiu X, Duan L, Chai F et al. Deriving high-resolution emission inventory of open biomass burning in China based on satellite observations. Environ Sci Technol. 2016;50:11779-86.
74. Ramo R, Roteta E, Bistinasd I et al. African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. Proc Natl Acad Sci USA. 2021;118(9):e2011160118.
75. Reid PC, Hari RE, Beaugrand G et al. Global impacts of the 1980s regime shift. Glob Change Biol. 2016;22(2):682-703.
76. Rogelj J, Shindell D, Jiang K et al. Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. In: G. Flato, J. Fuglestvedt, R. Mrabet, R. Schaeffer, eds. Global Warming of 1.5°C. Final Government Draft. Chapter 2. Geneva; 2018. P.93-174.
77. Rogers BM, Soja AJ, Goulden ML et al. Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks. Nat Geosci. 2015;8(3):228-34.
78. Romanov AA, Tamarovskaya AN, Gusev BA et al. Catastrophic PM2.5 emissions from Siberian forest fires: Impacting factors analysis. Environ Pollut. 2022a;306(8):119324.
79. Romanov AA, Tamarovskaya AN, Gloor E et al. Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021. Sci Total Environ. 2022б;846(333):157322.
80. Sánchez-Hernández G, Turco M, Repeto-Deudero I et al. Record-breaking 2025 European wildfires concentrated in Northwest Iberia. Glob Change Biol. 2025;31:e70649.
81. Schepaschenko D, Moltchanova E, Fedorov S et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. Sci Rep. 2021;11(1):12825.
82. Schoennagel T, Balch JK, Brenkert-Smith H et al. Adapt to more wildfire in western North American forests as climate changes. Proc Natl Acad Sci USA. 2017;114(18):4582-90.
83. Scott AC, Glasspool IJ. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. Proc Natl Acad Sci USA. 2006;103(29):10861-5.
84. Singh S. Forest fire emissions: A contribution to global climate change. Front For Glob Change. 2022;5:925480.
85. Singh S, Suresh Babu KV. Forest fire susceptibility mapping for Uttarakhand state by using geospatial techniques. In: Rai PK, Singh P, Mishra VN, eds. Recent Technologies for Disaster Management and Risk Reduction. Cham: Springer; 2021. P. 173-88.
86. Strobl C, Boulesteix A-L, Kneib T et al. Conditional variable importance for random forests. BMC Bioinformatics. 2008;9(1):307.
87. Tabor K, Hewson J, Tien H et al. Tropical protected areas under increasing threats from climate change and deforestation. Land. 2018;7(3):90.
88. Tarko AM. Analysis of the world's forest fires and their relationship to the global carbon dioxide cycle. NJD-iScience. 2020;50:34-44.
89. Tyukavina A, Potapov P, Hansen MC et al. Global trends of forest loss due to fire from 2001 to 2019. Front Remote Sens. 2022;3:825190.
90. UNFCCC. Russia. National Inventory Report. 2021. URL: https://unfccc.int/documents/273477.
91. Usoltsev V. Forest Arabesques, or Sketches of Our Trees' Life. Radom: Radomska Szkoła Wyższa w Radomiu; 2019. URL: http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2551187
92. van der Velde IR, van der Werf GR, Houweling S et al. Vast CO_2 release from Australian fires in 2019-2020 constrained by satellite. Nature. 2021;597(7876):366-9.
93. van der Werf GR, Randerson JT, Collatz GJ et al. Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Nino/La Nina period. Science. 2004;303(5654):73-6.
94. van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L et al. Global fire emissions estimates during 1997–2016. Earth Syst Sci Data. 2017;9(2):697-720.
95. van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L et al. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). Atmosph Chem Phys. 2010;10(6):11707-35.
96. van Dijk J. Biodiversity and nature. In: The Netherlands and the Dutch. World Regional Geography Book Series. Cham: Springer; 2019. P. 81-104.

97. van Wees D, van der Werf GR, Randerson JT et al. Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED). Geosci Model Dev. 2022;15(22):8411-37.
98. Veraverbeke S, Rogers BM, Goulden ML et al. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. Nat Clim Chang. 2017;7(7):529-34.
99. Vitolo C, Di Giuseppe F, Barnard C et al. ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. Sci Data. 2020;7(1):216.
100. Wagner A, Bennouna Y, Blechschmidt AM et al. Comprehensive evaluation of the Copernicus atmosphere monitoring service (CAMS) reanalysis against independent observations: reactive gases. Elementa Sci Anthropocene. 2021;9(1). URL: https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00171.
101. Walker XJ, Baltzer JL, Cumming SG et al. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. Nature. 2019;572(7770):520-3.
102. Ward M, Tulloch AIT, Radford JQ et al. Impact of 2019-2020 mega-fires on Australian fauna habitat. Nat Ecol Evol. 2020;4(10):1321-6.
103. Wright LA, Kemp S, Williams I. "Carbon footprinting": towards a universally accepted definition. Carbon Manag. 2011;2(1):61-2.
104. Wu C, Liu X, Lin Z et al. Impacts of absorbing aerosol deposition on snowpack and hydrologic cycle in the Rocky Mountain region based on variable-resolution CESM (VR-CESM) simulations. Atmos Chem Phys. 2018;18:511-33.
105. Xie X, Zhang Y, Liang R et al. Wintertime heavy haze episodes in Northeast China driven by agricultural fire emissions. Environ Sci Technol Lett. 2024;11(2):150-7.
106. Xu X, Jia G, Zhang X et al. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. Glob Change Biol. 2020;26(10):5874-85.
107. Zheng B, Ciais P, Chevallier F et al. Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. Sci Adv. 2021;7(39):eabh2646.
108. Zheng B, Ciais P, Chevallier F et al. Record-high CO_2 emissions from boreal fires in 2021. Science. 2023;379(6635):912–7.
109. Zhou X, Prigent C, Yamazaki D. Toward improved comparisons between land-surface-water-area estimates from a global river model and satellite observations. Water Resour Res. 2021;57(5):e2020WR029256.
110. Zhu C, Kobayashi H, Kanaya Y et al. Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: large underestimation in croplands. Sci Rep. 2017;7(1):4181.



УДК 556.114:574.5(470.51)(045) || EDN THGHPO
CC BY-NC 4.0
© Н.В. Холмогорова и соавт.; ФНИ «XXI век»

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЖЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ГИДРОХИМИЧЕСКИМ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Н.В. Холмогорова[1]*, Л.В. Головатюк[2], О.А. Пушина[1]
[1]Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия;
[2]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, п. Борок, Россия
Эл. почта: nadjaholm@mail.ru
Статья поступила в редакцию 09.02.2026; принята к печати 16.04.2026

На протяжении многих лет качество воды качество воды Ижевского водохранилища (ИВХ) вызывает тревогу. Летом и осенью в акватории ИВХ регулярно отмечаются «вспышки» численности цианобактерий, что значительно ухудшает качество воды. Купание на городском пляже запрещено более 20 лет. Несмотря на долгую историю исследований, до настоящего времени не получены единовременные комплексные оценки состояния воды и донных отложений ИВХ по гидрохимическим показателям и данным биоиндикации. Восполнение этого пробела было целью настоящей работы. Установлено, что, хотя по большинству показателей качество воды ИВХ в осенний период оценивается классом II (чистая), на всем протяжении ИВХ отмечается превышение предельно допустимых концентраций легко окисляемых органических соединений и, локально, нефтепродуктов. В донных отложениях аккумулировано значительное количество токсикантов, включая тяжелые металлы (хром, медь, свинец, никель, цинк и кобальт), уровни которых в несколько раз превышают фоновые значения, и нефтепродукты. Загрязнение ИВХ тяжелыми металлами существенно выше, чем в ряде водохранилищ Волжского каскада. Почти за 20 лет не отмечено улучшения состояния ИВХ по содержанию тяжелых металлов в донных отложениях и показателям макрозообентоса, но количественные характеристики кормовых объектов, потребляемых бентосоядными рыбами, остаются относительно стабильными. В ИВХ происходит активное расселение моллюска *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), захватывающего свободные экологические ниши, что вызывает необходимость проведения дальнейших мониторинговых исследований водоема для оценки последствий влияния инвазивного вида на аборигенные сообщества и состояние кормовой базы рыб.
Ключевые слова: *Ижевское водохранилище, тяжелые металлы, донные отложения, макрозообентос, биоиндикация*

ASSESSMENT OF THE CURRENT CONDITION OF IZHEVSK RESERVOIR USING HYDROCHEMICAL AND HYDRO-BIOLOGICAL INDICATORS

N.V. Kholmogorova[1]*, L.V Golovatiuk[2], O.A. Pushina[1]
[1]Udmurt State University, Izhevsk, Russia;
[2]I.D. Papanin Institute of Inland Water Biology, Borok, Russia
Email: nadjaholm@mail.ru

The quality of water of the Izhevsk Reservoir is alarming. In summer and autumn, outbreaks of cyanobacteria occur regularly in the water basin and significantly spoil water quality. Swimming at the city beach is prohibited for more than 20 years. Despite the long history of research of the resevoir, no single comprehensive assessments of the conditions of its water and bottom sediments according to hydrochemical and bioindicator data have been obtained so far. Filling this gap was the purpose of the present work. It has been found that, although according to most indicators the quality of water of the Izhevsk Reservoir in autumn is judged as class II (pure), the maximum permissible concentrations of easily oxidized organic matter and, locally, petroleum products are exceeded throughout the water basin. Sediments accumulate significant amounts of toxins, including heavy metals (chromium, copper, lead, nickel, zinc and cobalt), several times above the background values, and petroleum products. Izhevsk reservoir pollution with heavy metals is substantially higher than in the cases of several reservoirs of the Volga Cascade. Heavy metal content in the bottom sediment of Izhevsk Reservoir and its macrozoobenthos did not improve for almost 20 years, but the quantitative characteristics of the alimentary objects consumed by benthic fish remain relatively stable. In the reservoir, the mollusk *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) actively spreads and occupies spare ecological niches. This necessitates further monitoring of the ressrvoir to assess the impact of the invasive species on aboriginal communities and the condition of fish forage reserve.
Keywords*: Izhevsk Reservoir, heavy metals, sediments, macrozoobenthos, bioindication*

Введение

Водные объекты в условиях урбанизации подвержены разностороннему антропогенному воздействию [11, 18, 39]. В результате деятельности промышленных предприятий и эксплуатации автотранспорта, а также смывов ливневых стоков с городских территорий в водоемы поступают различные загрязняющие вещества, такие как щелочные и щелочноземельные металлы, биогенные элементы, тяжелые металлы и др. [2, 25]. Как следствие, в водоемах происходит изменение химического состава вод, что сказывается на их качестве и пригодности для различных видов водопользования [18].

Ижевское водохранилище (ИВХ) – антропогенный водоем плотинного типа, созданный в среднем течении р. Иж для нужд железоделательного завода в 1759 году – расположено в центральной части г. Ижевска, используется для рекреации, водоснабжения населения и промышленных предприятий. Воду из ИВХ потребляет 1/3 жителей города[1].

Загрязняющие вещества поступают в ИВХ с водосборного бассейна с притоками, а также с талыми и дождевыми водами с городской территории, вызывая, в числе прочих последствий, массовое цветение цианобактерий в летне-осенний периоды. Согласно расчетам, проведенным институтом Ленгипроводхоз в 1994 году [7], в водоемы и водотоки бассейна Ижевского пруда со сточными водами ежегодно поступает 38,1 т общего фосфора, 245,6 т общего азота, 10,0 т хлорид-ионов и 500,9 т нефтепродуктов. Основной вклад в загрязнение природных вод этими химическими веществами вносят стоки животноводства и смывы с сельскохозяйственных угодий и нарушенных территорий. Роль промышленности и жилищно-коммунального хозяйства в поступлении вышеуказанных объемов загрязняющих веществ в ИВХ не столь велика, но она постоянно растет в связи с развитием нефтедобычи в водосборе реки Иж, а также по мере расширения площадей селитебных территорий, занимаемых частной застройкой в окрестностях г. Ижевска. При этом организованный сброс промышленных сточных вод непосредственно в Ижевский пруд осуществляют только ТЭЦ-1 г. Ижевска и АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг». Стоки этих городских предприятий характеризуются как «условно чистые» [12].

Оценка качества воды ВДХР, как источника питьевого и промышленного водоснабжения, ведется с 1950-х годов, сведения о содержании загрязняющих веществ содержатся в работах [4-5, 12, 16]. Донные отложения изучались при проведении геоэкологических работ в 1991–1993[1] и 1998–1999 годах[2], а также в рамках комплексного экологического обследования верхней и средней части ВДХР в 2011–2012 годах [12].

Первые исследования макрозообентоса Ижевского пруда проведены В.В. Варфоломеевым в 1956–64 годах [3], однако списки видов в его работах отсутствовали. Дальнейшие исследования этой группы гидробионтов связаны с научной деятельностью лаборатории Госкомприроды Удмуртской республики (УР), в ходе которых в 1991 году было выявлено 32 вида [8]. В 2006 году по заказу МУП «Ижводоканал» сотрудниками Пермского отделения ФГНУ «ГосНИОРХ» был определен состав фауны макрозообентоса ИВХ, включающий 70 видов, проведена оценка качества воды и экологического состояния водоема по биологическим показателям [9]. Описание зарослевой фауны верхней части пруда и Пазелинского залива приведены в работах [10, 32]. В 2011–2012 годах ученые Удмуртского государственного университета изучали макрозообентос верхней и средней частей ИВХ, и были отмечены 29 видов и таксонов более высокого ранга [12].

Несмотря на достаточно долгую историю исследований Ижевского ВДХР, до настоящего времени не проводилось единовременной комплексной оценки состояния воды и донных отложений пруда по гидрохимическим и гидробиологическим показателям.

Цель данной работы – оценить современное экологическое состояние Ижевского ВДХР по комплексу химических показателей и данным биоиндикации.

Материалы и методы исследования

Гидрологическая характеристика ИВХ.

ИВХ вытянуто с северо-запада на юго-восток вдоль русла р. Иж и имеет протяженность до 13 км (рис. 1). Его объем при нормальном подпорном уровне (99,5 м) составляет 76,3 млн м^3, площадь зеркала – 26,4 км^2, максимальная ширина – 2,3 км, наибольшая глубина – 12 м, средняя глубина – 3,2 м, площадь мелководий с глубинами до 2 м – 7 км^2 [21], коэффициент водообмена – около 3,34 [23]

Притоками ИВХ являются реки Люк, Пазелинка, Шабердинка, Подборенка и Малиновка. Питание водоема смешанное, осуществляется преимущественно за счет осадков зимнего периода (60–65% годового стока), а также поступления дождевых и грунтовых вод. В двух местах берега ИВХ сближаются на расстояние 500–1500 м, в результате чего акваторию можно разделить на три участка: верхний (ст. 1–6), средний (ст. 7–12) и нижний (ст. 13-18).

[1] Качанов НВ, Сажнев ИВ, Качанова ЛЕ, Стурман ВИ, Ильминских НГ, Печерских ВН. Геоэкологическое исследование масштаба 1:25 городской агломерации г. Ижевска. Отчет. Москва: Государственное научно производственное предприятие «Аэрогеология»; 1993;(1).

[2] Борзенков АВ. Отчет об эколого-геологическом обследовании Ижевского пруда. Неклюдово, 1999. Геолфонд УР, инв. № 749д.

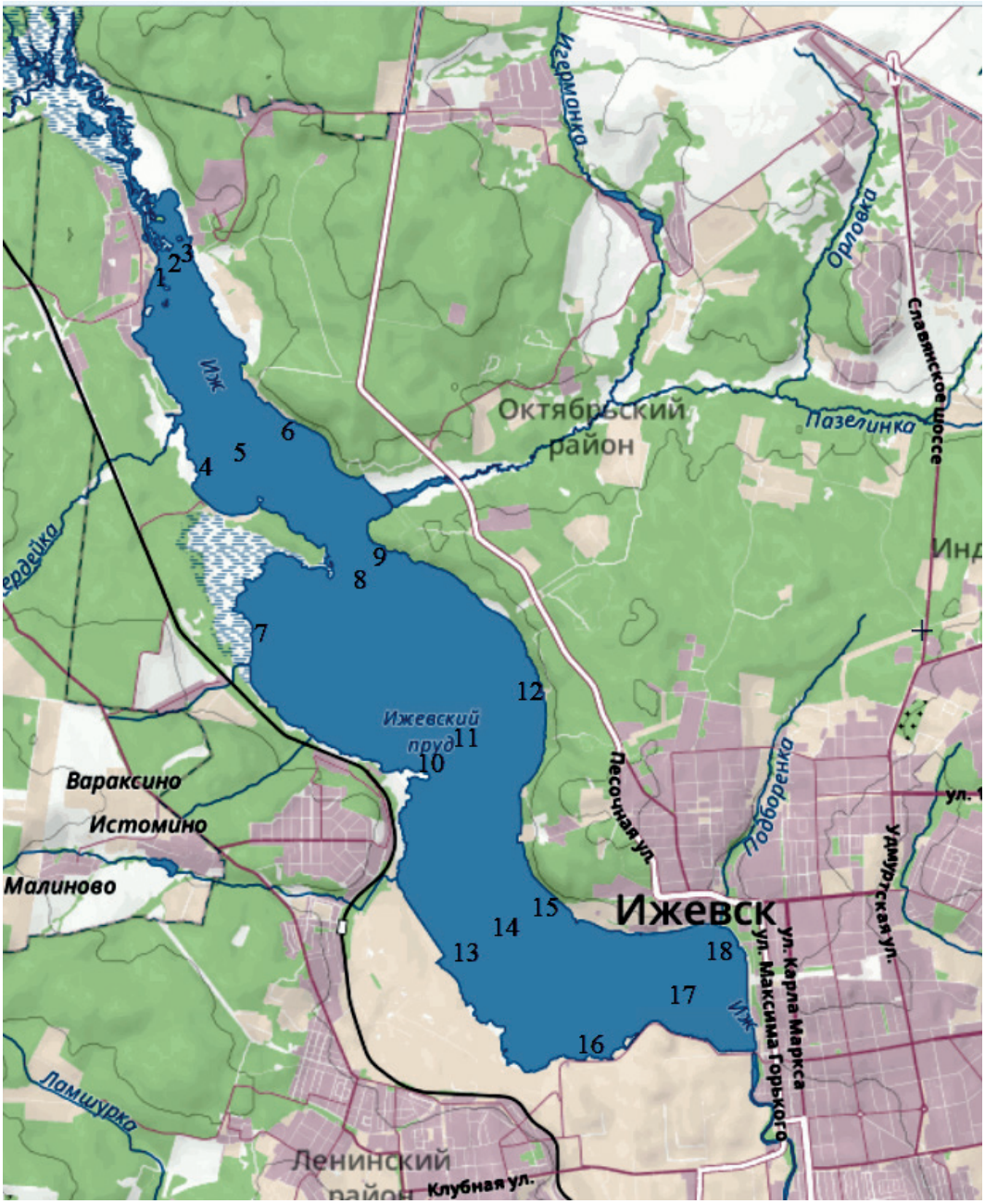


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб на Ижевском водохранилище

Полевые исследования и методы анализа данных

Материал отбирали в сентябре 2025 года на 6 разрезах ИВХ, каждый из которых включал три станции (рис. 1). Выбор периода исследований был обусловлен необходимостью проведения сравнительного анализа состояния ИВХ в многолетнем аспекте.

В местах отбора проб с помощью полевых приборов измеряли следующие гидрологические и физико-химические показатели: глубину (эхолот Lowrance 9 TI), температуру поверхностного слоя воды, прозрачность (диск Секки), содержание растворенного кислорода (оксиметр Марк-302Э) и общую минерализацию (ТДС-метр E-Z9909SP).

Пробы воды отбирали с поверхностного горизонта 0–0,15 м. В связи с тем, что водные ресурсы ИВХ одновременно используются в различных целях (рекреационных, рыбохозяйственных, хозяйственно-

бытовых), для определения качества воды согласно Приказу Росрыболовства от 26.05.2025 N 296[3] взяты наиболее жесткие нормативы ПДК, характерные для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Оценку качества воды проводили с использованием индекса ИЗВ:[4]

$$ИЗВ = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{ПДК_i}$$

где: n – число показателей, используемых для расчёта индекса; C_i – концентрация химического вещества в воде (мг/л); $ПДК_i$ – предельно допустимая концентрация вещества в воде (мг/л).

Отбор и подготовка проб донных отложений (ДО) были выполнены в соответствии с базовыми национальными стандартами[5].

Анализ гидрохимических показателей воды и ДО проводился в аккредитованной лаборатории Регионального центра государственного экологического контроля и мониторинга по Удмуртской Республике АУ «Управление Минприроды УР». В отобранных образцах ДО определяли содержание валовых форм микроэлементов рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре «Квант Z» при помощи аттестованной методики М-049-П/10, нефтепродуктов (НПР) – методом ИК-спектрофотометрии концентратомером «КН3». Из общесанитарных показателей состояния Ижевского водохранилища определялись: прозрачность воды, водородный показатель (pH), содержание растворенного кислорода и биохимическое потребление кислорода ($БПК_5$).

По причине того, что в России отсутствуют утвержденные экологические нормативы содержания веществ в ДО, при анализе полученных результатов использовали разработанные на основе исследований Куйбышевского водохранилища и рекомендуемые к практическому применению предельно допустимые уровни загрязнения ДО ($ПДУ_{до}$) [20]. При оценке загрязнения ДО нефтепродуктами основывались на рекомендованных региональных нормативах [24].

Отбор проб макрозообентоса производили с лодки дночерпателем ДАК-100 (1/100 м²) трехкратным зачерпыванием донного грунта в каждой точке. Беспозвоночных фиксировали в 70% этиловом спирте, камеральную обработку проб проводили, руководствуясь методическими указаниями [13]. Для идентификации видов макрозообентоса использовали ключи [1, 26-28]. Для оценки видовой структуры сообществ рассчитывали индекс доминирования (D_i) [17, 33].

Оценку качества воды по показателям макрозообентоса проводили на основе биотического индекса Вудивисса [40], индекса сапробности по Пантле-Букку [36], индекса видового разнообразия Шеннона [37]. Для оценки связи между биотическими показателями и абиотическими факторами был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r_s) в программе Statistica 10.

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав воды Ижевского водохранилища

Прозрачность воды неравномерна: от верхнего участка (ст. 1–6) к среднему и нижнему (ст. 7–18) осенью 2025 года наблюдалось снижение ее величины от 1,1–1,7 м до 0,61–0,99 м. Взмучиванию грунтов и поступлению взвешенных веществ в воду на данном участке могут способствовать работа земснаряда и более активное использование плавсредств (моторные лодки, гидроциклы) в рекреационных целях, а в приплотинной части – стоки с территории города и река Подборенка.

Водородный показатель (ед. pH). Вода ИВХ почти на всем его протяжении имеет слабощелочную реакцию (pH 7,75–8,46) (рис. 2). Исключение составляет станция 9, где вода характеризуется как нейтральная (pH 7,45). Изменчивость pH по длине ИВХ невелика, и, как показал анализ данных, его значения находятся в пределах ПДК для рыбохозяйственных водоемов (6,5–8,5), однако в другие сезоны (август 2024 года), как сообщалось [5], может наблюдаться превышение норматива pH.

Кислородный режим водохранилища благоприятен для развития гидробионтов, концентрации кислорода в сентябре 2025 года не падали ниже нормативных показателей, находясь в диапазоне 8,0–14,0 мг/л. В верхнем участке водохранилища содержание кислорода колебалось в пределах 8,0–9,9 мг/л. Начиная от среднего участка (ниже устья р. Пазелинка, ст. 9) до приплотинного насыщение воды растворенным кислородом возрастало от 10,2 мг/л до 14,0 мг/л. Таким образом, наблюдается тренд увеличения концентрации кислорода в воде от верхней части водохранилища к нижней. В ходе многолетних наблюдений (1950–2003 годы) было показано, что минимальное содержание кислорода в ИВХ присуще концу зимней межени, а максимальное – периоду перед ледоставом (ноябрь) [4, 16].

Содержание лабильной фракции органического вещества ($БПК_5$) превышает установленные для вод рыбохозяйственного назначения нормативы в 1,1–2,0 раза почти на всем протяжении водохранилища, за

[3] Приказ Федерального агентства по рыболовству от 26 мая 2025 года № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

[4] Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. №250–1163 М.: Госкомгидромет СССР;1986.

[5] ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 28168-89, ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ Р 53123-2008 (ИСО 10381-5:2005)

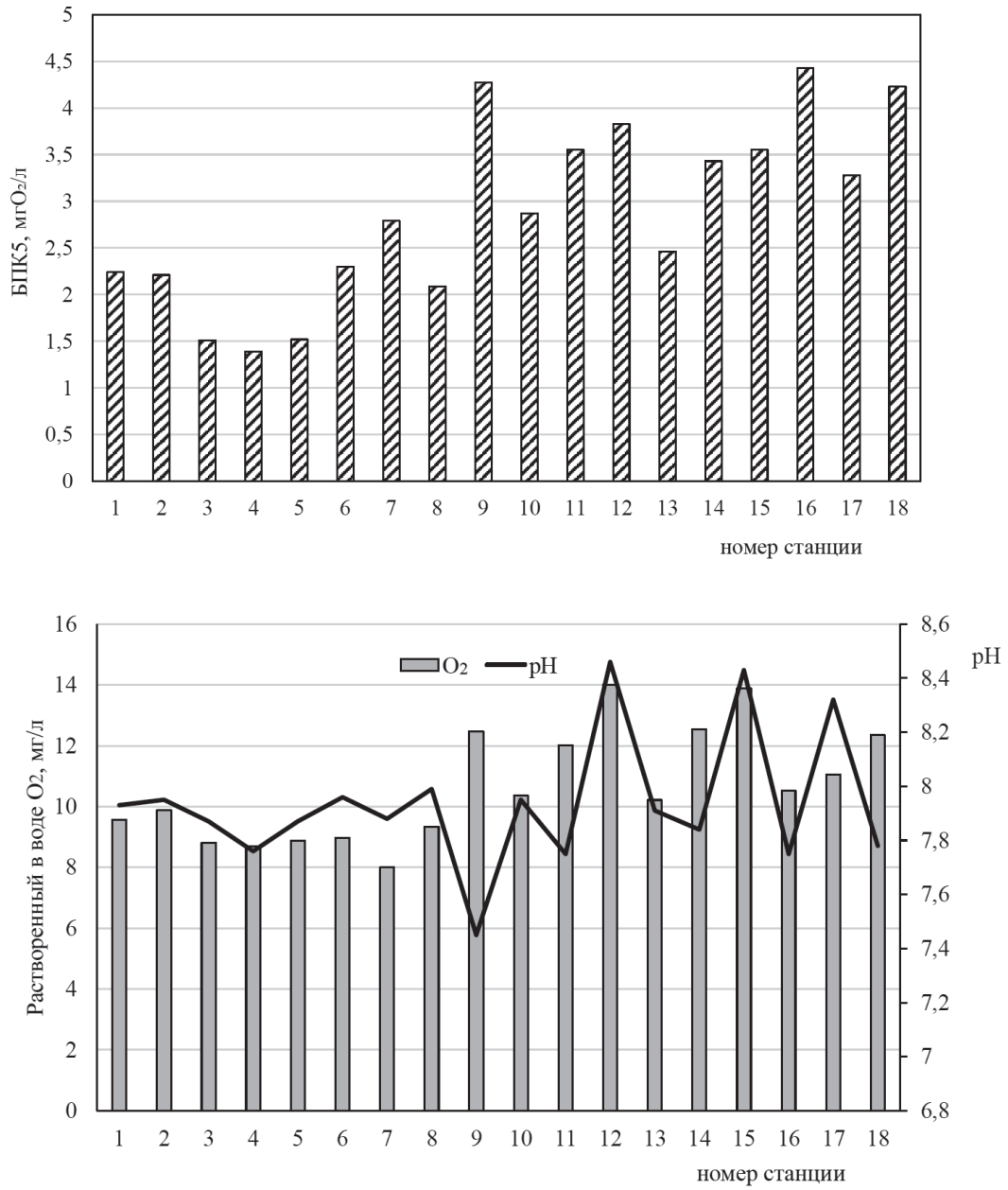


Рис. 2. Санитарные показатели воды Ижевского водохранилища в сентябре 2025 года

исключением станций 3, 4 и 5 в верхней части водоема. Это указывает на загрязнение большей части водохранилища органическим веществом и подтверждает данные более ранних исследований [4, 12, 16].

Общая минерализация воды не превышала значений ПДКрх, находясь в диапазоне 153–257 мг/л. Наибольшие показатели минерализации (257 мг/л) характерны для приплотинного участка со стороны правого берега (ст. 16). Колебания общей минерализации воды могут быть связаны с химическим составом осадочных пород бассейна Ижевского водохранилища и влиянием промплощадок заводов «Ижсталь» и «Ижмаш».

Из биогенных элементов определялись фосфаты и формы азота (нитритный, нитратный). Содержание как нитратного, так и нитритного азота на всех участках водохранилища в несколько раз ниже ПДК: от <0,1 до 0,2 мг/л, и <0,003 до 0,007 мг/л соответственно (рис. 3).

Содержание фосфат-ионов (PO_4^{3-}) и общего фосфора не превышало $ПДК_{рх}$ на всем протяжении водохранилища, изменяясь от <0,05 до 0,067 мг/л и от <0,04 до 0,084 мг/л соответственно.

На основе данных сентябрьской съемки, по содержанию в воде фосфат-ионов, ИВХ следует отнести к

олиготрофному типу водоемов.

Среди специфических органических соединений исследовались нефтепродукты, содержание которых на большинстве обследованных станций было ниже ПДКрх (0,007–0,019 мг/л), однако на среднем участке водохранилища (ст. 8) зафиксировано загрязнение воды до уровня 3 ПДК. Как показали проведенные ранее исследования, незначительный рост содержания нефтепродуктов свойственен теплому периоду – с мая по октябрь [4].

Для оценки качества воды ИВХ на основе шести измеренных показателей был произведен расчет индекса ИЗВ (индекс загрязнения воды), результаты которого представлены в табл. 1. На обследованных станциях индекс изменялся от 0,31 (верхний участок, ст. 4, 5) до 0,78 (нижний участок, ст. 8), то есть находился в диапазоне, соответствующем классу II качества – «вода чистая». Наиболее высокие значения индекса обусловлены загрязнением воды легко окисляемыми органическими соединениями (по $БПК_5$) и нефтепродуктами. Проведенная за период с 2006 года по 2016 год оценка качества воды ИВХ в районе водозабора очистных сооружений Ижводоканала по удельному комбинаторному индексу загрязнения воды (УКИЗВ) также характеризовала воду как «условно чистая» и «слабозагрязненная» (классы I и II) [4].

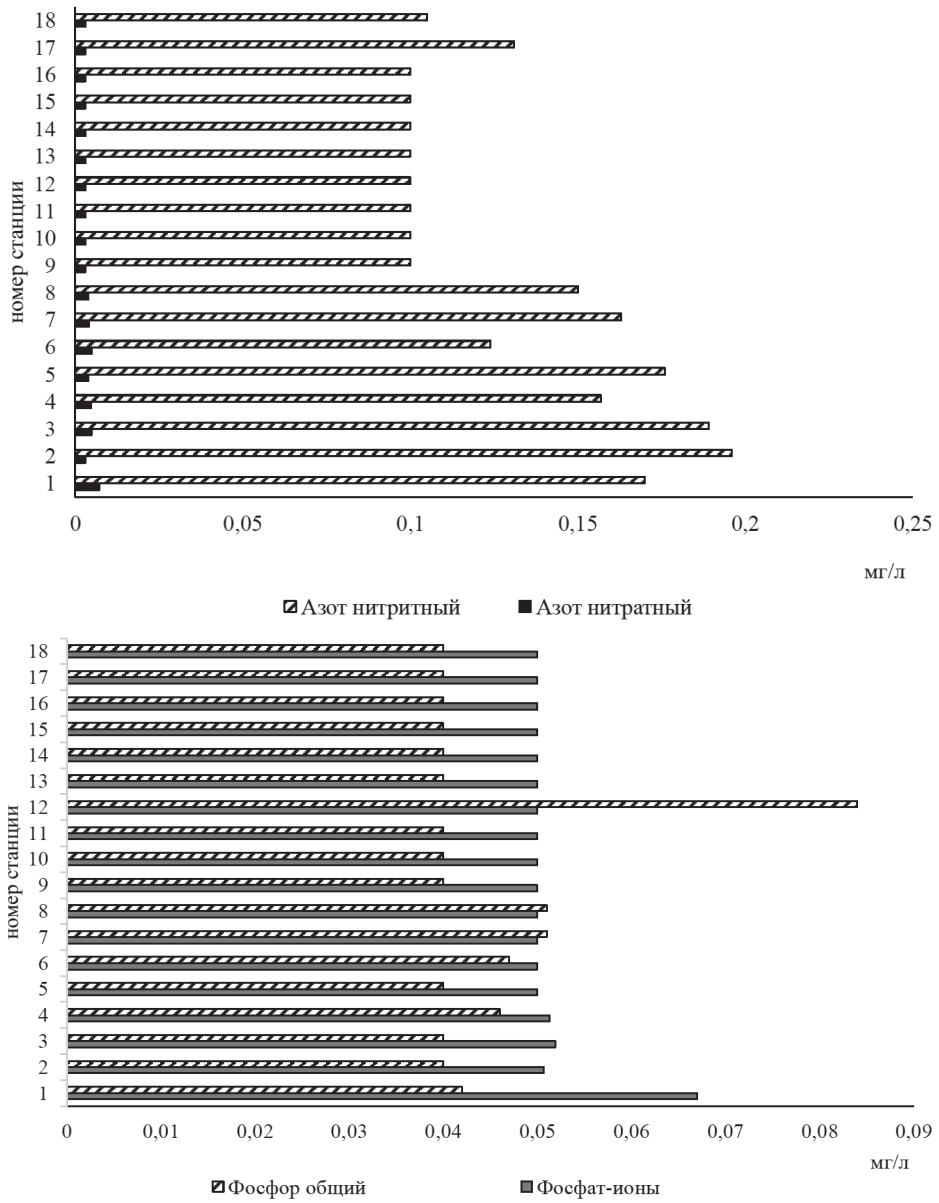


Рис. 3. Содержание биогенных элементов в Ижевском водохранилище в сентябре 2025 года

Табл 1.

Индексы ИЗВ и содержание нефтепродуктов в ДО Ижевского водохранилища осенью 2025 года

№ станции	Вода								Донные отложения	
	O_2	$БПК_5$	NNO^{3-}	NNO^{2-}	$P_{общ}$	НПР	ИЗВ	КК	НПР, мг/кг	Уровень НПР
1	0,63	1,07	0,0002	0,089	0,21	0,242	0,37	II	326	У
2	0,61	1,05	0,00007	0,039	0,2	0,296	0,37	II	222	У
3	0,68	0,72	0,0001	0,06	0,2	0,384	0,34	II	215	У
4	0,69	0,66	0,0001	0,058	0,23	0,234	0,31	II	341	У
5	0,68	0,72	0,00009	0,049	0,2	0,212	0,31	II	351	У
6	0,67	1,09	0,0001	0,061	0,24	0,164	0,37	II	248	У
7	0,75	1,33	0,0001	0,051	0,26	0,316	0,45	II	640	Э
8	0,64	0,99	0,00009	0,049	0,26	2,76	0,78	II	241	У
9	0,48	2,03	0,00008	0,038	0,2	0,154	0,48	II	550	Э
10	0,57	1,37	0,00008	0,038	0,2	0,192	0,39	II	184	У
11	0,50	1,69	0,00008	0,038	0,2	0,162	0,43	II	550	Э
12	0,43	1,82	0,00008	0,038	0,42	0,19	0,48	II	450	Э
13	0,59	1,17	0,00008	0,038	0,2	0,172	0,36	II	376	У
14	0,48	1,63	0,00008	0,038	0,2	0,176	0,42	II	550	Э
15	0,43	1,69	0,00008	0,038	0,2	0,192	0,43	II	460	Э
16	0,57	2,11	0,00008	0,038	0,2	0,208	0,52	II	199	У
17	0,54	1,56	0,00008	0,038	0,2	0,214	0,43	II	1560	Э
18	0,49	2,01	0,00008	0,038	0,2	0,146	0,48	II	243	У
ПДКрх	***6,0***	***2,1***	***40***	***0,02***	***0,2***	***0,05***			***<50 – загрязнение слабое; 50-400 – умеренное* (У); *>400 – экстремальное* (Э)**	

Примечания: НПР – нефтепродукты; КК – класс качества воды

Донные отложения

Поверхностные слои ДО в ИВХ на станциях 2, 3 и 16 представлены песком и детритом, а в остальных местах отбора проб – темноокрашенными илами с остатками детрита. По данным геолого-экологического обследования, проведенного ГГП «Волгагеология» в 1998–1999 годах[2], мощность донных отложений в акватории пруда изменяется от 0 до 1,2 м, увеличиваясь от берегов к центральной части.

В донных отложениях определяли валовое содержание микроэлементов – мышьяка, кадмия, хрома, меди, свинца, никеля, цинка, кобальта – и массовую долю нефтепродуктов. Содержание кадмия было существенно ниже $ПДУ_{до}$, а небольшое превышение концентрации мышьяка (1,1 $ПДУ_{до}$) отмечено локально лишь в среднем участке ИВХ на ст. 7 (табл. 2). Основными токсикантами неорганического происхождения, встречающимися почти на всех участках в концентрациях, превышающих $ПДУ_{до}$, являются хром, медь, свинец, никель, цинк и кобальт. Концентрации большинства перечисленных элементов постепенно возрастали от верхнего к нижнему участку: содержание меди от 58 до 94 мг/кг (до 3,0 $ПДУ_{до}$), свинца – от 21 до 42 мг/кг (до 2,4 $ПДУ_{до}$), никеля – от 92 до 120 мг/кг (до 2,3 $ПДУ_{до}$), цинка – от 125 до 241 мг/кг (до 2,3 $ПДУ_{до}$). Концентрация хрома и кобальта в ДО была минимальной на среднем участке (182 и 9,4 мг/кг соответственно), достигая максимума в приплотинном (246 и 14 мг/кг соответственно). У хрома было самое высокое среди всех токсикантов превышение $ПДУ_{до}$ – до 8,5-кратного. Сравнение указанных выше концентраций меди, никеля и цинка с данными, полученными в 2011–12 годах. [12], не выявило улучшения качества ДО Ижевского ВДХР в 2025 году.

Аккумуляция значительного количества загрязняющих веществ в ДО объясняется главным образом интенсивной геохимической техногенной аномалией на дне Ижевского пруда, расположенной в районе шлакоотвала ОАО «Ижсталь» г. Ижевска и характеризующейся содержанием ряда химических элементов (меди, никеля, хрома, марганца, олова и др.) в ДО, превышающих фоновые концентрации в десятки раз [12]. Кроме того, следует отметить, что высокие концентрации меди могут определяться региональными особенностями геохимической провинции Волго-Камского региона или быть характерными для илисто-глинистых типов донных отложений притоков р. Кама [19].

Табл. 2.

Концентрации тяжелых металлов (валовые формы, мг/кг) в донных отложениях разных участков ИВХ в сравнении с ПДУ$_{до}$. В числителе – min-max содержания элемента, в знаменателе – min-max превышения ПДУ$_{до}$ соответственно типу грунта на участке

Участок	*Мышьяк*	*Кадмий*	*Хром*	*Медь*	*Свинец*	*Никель*	*Цинк*	*Кобальт*
Верхний	5,1–14,1 –	0,05–0,15 –	156–308 4,2–8,3	17–58 1,3–1,8	0,48–21 1,01–1,2	52–92 1,1–1,7	38–125 1,03–1,2	9,3–16,5 1,2–2,7
Средний	4,5–20 1,1	0,05–0,16 –	88–267 2,4–7,2	2,1–67 1,7–2,1	6,7–29 1,1–1,6	30–104 1,5–2,0	56–160 1,1–1,5	3,3–12,3 –
Нижний	5,5–11,6 –	0,05–0,18 –	130–313 3,5–8,5	18–94 1,1–3,0	7,2–42 1,01–2,4	28–120 1,4–2,3	20–241 1,2–2,3	6,6–21,8 1,1–1,7
ПДУ$_{до}$, ил	18,3*	2,2	37	32	18	53	105	13
ПДУ$_{до}$, песок	18,3*	0,6	7	5	4,3	21	73	5

* расчетные уровни [20]

Сравнение концентраций металлов в ДО водохранилищ Волжского каскада (Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское, Волгоградское) [25] с данными, полученными для ИВХ, показало значительно более высокий уровень загрязнения последнего. Так, максимальные концентрации хрома в ДО ИВХ были выше наибольшего зарегистрированного показателя в Волжских водохранилищах в 2,7 раз, никеля – в 1,9 раз, меди – в 3,8 раз, цинка – в 2,7 раз, что можно объяснить 260-летним воздействием металлургического производства.

На всем протяжении водоема наблюдалось загрязнение грунтов нефтепродуктами, соответствующее умеренному и экстремальному уровням (табл. 1). Наибольшее их содержание выявлено в среднем и нижнем участках водохранилища (ст. 7, 9, 11, 12, 14, 15, 17), что объясняется нефтедобычей в верхнем течении р. Иж, стоками с водосборного бассейна, эксплуатацией моторных лодок и катеров.

Макрозообентос

В составе фауны макрозообентоса отмечено 36 видов и таксонов более высокого ранга, среди которых наиболее разнообразны хирономиды (13 видов) и олигохеты (11 видов) (табл. 3). Наибольшее число видов (16) зарегистрировано на ст. 1 верхнего участка ВДХР, где сохраняются проточные речные условия, и на ст. 16 нижнего участка (12 видов), характеризующихся небольшими глубинами (1,5 м). В остальных местах отбора проб таксономическое богатство находилось в пределах 2–7 видов с наименьшим разнообразием в русловой глубоководной зоне (ст. 14).

По данным 2025 года, для Ижевского водохранилища впервые указываются моллюски *Unio tumidus*, поденки *Cloeon bifidum*, хирономиды *Polypedilum exsectum,* ручейники *Ecnomus tenellus*.

Кроме перечисленных видов макрозообентоса в пробах отмечены мейобентосные олигохеты, ряд которых также указываются впервые: *Chaetogaster diastrophus* Gruithuisen, 1828; *Dero obtusa* d'Udekem, 1855; *Nais variabilis* Piguet, 1906; *Ophidonais serpentina* Müller, 1773; *Slavina appendiculata* d'Udekem, 1855.

В экологическом отношении сообщества гидробионтов представлены пелофильными и фитофильными видами, что характерно для большинства водохранилищ с низкой проточностью [14-15]. С частотой более 30% встречались олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri* (частота встречаемости 78%), хирономиды *Chironomus plumosus* (67%), *Fleuria lacustris* (39%), *Glyptotendipes glaucus* (39%) и *Endochironomus albipennis* (39%). Отмечено широкое распространение моллюсков-вселенцев *Dreissena polymorpha* (33%), единичные находки которых сделаны впервые в 2013 году локально – в нижнем бьефе ИВХ [23], что свидетельствует об активном расселении в водоеме одного из 100 наиболее опасных инвазионных видов России [6]. Олигохеты *L. hoffmeisteri*, хирономиды *Ch. plumosus* и моллюски *D. polymorpha* относятся к числу широко распространенных видов и в других равнинных водохранилищах [14, 22].

Наибольшим разнообразием (21 таксон) и представленностью таксономических групп (8 групп) отличался верхний участок водоема, наименьшим – средний (17 таксонов из 4 групп) (табл. 4). Представители отряда Ephemeroptera были найдены только на верхнем участке, отрядов Odonata и Trichoptera – в нижней части ВДХР, при этом по числу видов на всех участках преобладали хирономиды и олигохеты.

Численность макрозообентоса на разных станциях варьировала от 125 экз./м^2 (ст. 2) до 3892 экз./м^2 (ст. 18), биомасса с учетом крупных моллюсков – от 0,48 г/м^2 до 1469 г/м^2 соответственно, составляя в среднем по водоему 1264 экз./м^2 и 99,7 г/м^2 (табл. 4). Основной вклад в показатели общей численности донных сообществ вносили личинки хирономид (48%) и олигохеты (35%), а биомасса определялась моллюсками *D.*

Табл. 3.

Состав фауны макрозообентоса на русловых станциях ИВХ (сентябрь 2025 года)

Таксономическая группа	Таксон
Mollusca	*Valvata piscinalis* O.F. Müller 1774; *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), *Unio tumidus* (Philipsson in Retzius, 1788)*, *Lymnaea balthica* (L., 1758)
Oligochaeta	*Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862; *L. udekemianus* Claparede, 1862; *Lumbriculus variegatus* O.F. Müller, 1773; *Potamothrix hammoniensis* (Michaelsen, 1901); *Spirosperma ferox* Eisen, 1879; *Tubifex tubifex* O.F. Müller, 1773
Hirudinea	*Piscicola geometra* Linnaeus, 1761
Hydrachnidia	Hydrachnidia gen.
Ephemeroptera	*Cloeon* гр. *dipterum* L., 1758; *C. bifidum* Bengtsson, 1912*
Trichoptera	*Ecnomus tenellus* Rambur, 1842*
Odonata	*Erythromma najas* Hansermann, 1823; *Epitheca bimaculata* Charpentier, 1825
Diptera	*Chaoborus* sp. Lichtenstein, 1800; *Procladius choreus* Meigen, 1804; *P. ferrugineus* Kieffer, 1919; *Chironomus* sp. Meigen, 1803; *Ch. plumosus* (Linnaeus, 1758); *Corynoneura scutellata* Winnertz, 1846; *Cricotopus* gr. *sylvestris*; *Cryptochironomus* gr. *defectus*; *Dicrotendipes nervosus* Staeger, 1839; *Endochironomus albipennis* Meigen, 1830; *Glyptotendipes glaucus* Meigen, 1818; *Fleuria lacustris* Kieffer, 1924; *Polypedilum nubeculosum* Meigen, 1804; *Polypedilum exsectum* Kieffer in Thienemann, 1916*; *Sphaeromias pictus* Meigen, 1818

Примечания: «*» - впервые указываются для Ижевского водохранилища

Табл. 4.

Показатели числа видов (n), средней численности (N, экз./м^2) и средней биомассы (B, г/м^2) таксономических групп макрозообентоса на разных участках ИВХ в сентябре 2025 года.

Таксономическая группа	Верхний участок			Средний участок			Нижний участок			В среднем по ВДХР		
	n	N	B	n	N	B	n	N	B	n	N	B
Ephemeroptera	2	89	0,13	-	-	-	-	-	-	2	30	0,04
Trichoptera	-	-	-	-	-	-	1	25	0,02	1	8	0,005
Hirudinea	1	6	0,01	-	-	-	-	-	-	1	2	0,004
Odonata	-	-	-	-	-	-	2	8	0,72	2	3	0,24
Oligochaeta	6	320	1,6	4	515	1,39	7	515	0,6	10	447	1,2
Gastropoda	2	11	0,54	-	-	-	-	-	-	2	4	0,18
Bivalvia	1	6	2,66	1	28	12,9	2	358	264	2	132	93,1
Chironomidae	6	486	2,9	10	571	4,62	6	771	6,8	13	610	4,77
Diptera (прочие)	2	26	0,08	2	56	0,28	-	-	-	2	27	0,12
Hydrachnidia	1	6	0,006	-	-	-	-	-	-	1	2	0,002
Всего	21	945	7,93	17	1170	19,2	18	1677	272	36	1264	99,7
Мягкий (кормовой) бентос		939	5,27		1142	6,3		1319	8,14		1135	6,57

polymorpha и *U. tumidus* (74% от общей биомассы). В то же время биомасса мягкого (кормового) бентоса в среднем по водохранилищу составила 6,57 г/м^2 за счет развития личинок хирономид (73%) и олигохет (18%).

Так же, как в целом по водохранилищу, на отдельных его участках основную долю численности составляли личинки хирономид и малощетинковые черви, а долю биомассы – кроме указанных групп, двустворчатые моллюски. Следует отметить возрастание (на два порядка) биомассы двустворчатых моллюсков от верховьев к приплотинной части ВДХР преимущественно за счет развития *D. polymorpha*. Биомасса кормового зообентоса также увеличивалась от верхнего участка (5,27 г/м^2) к нижнему (6,57 г/м^2).

Сравнение полученных данных с результатами исследований, проведенных осенью 2004 года [9], показал резкое, в 4 раза (от 23,2 до 100,8 г/м^2), возрастание средней по ИВХ биомассы донных беспозвоночных в 2025 году, обусловленное активной экспансией моллюсков *D. polymorpha*. Биомасса кормового бентоса

Табл. 5.

Оценка качества воды Ижевского водохранилища по показателям макрозообентоса в сентябре 2025 года

№ ст.	Индекс Вудивисса		Индекс Шеннона		Индекс сапробности	
	Значение индекса, балл	Класс качества воды	Значение индекса, бит./экз.	Класс качества воды	Значение индекса	Зона сапробности, качество воды
1	7	чистая (II)	1,87	умеренно загрязненная (III)	2,35	β-мезосапробная, умеренно загрязненная
2	2	грязная (V)	1,33	загрязненная (IV)	2,93	α-мезосапробная, грязная
3	2	грязная (V)	1,29	загрязненная (IV)	2,81	α-мезосапробная, грязная
4	2	грязная (V)	0,45	очень грязная (VI)	3,6	полисапробная, сильно загрязненная
5	2	грязная (V)	0,87	грязная (V)	3,0	α-мезосапробная, грязная
6	2	грязная (V)	1,04	загрязненная (IV)	3,11	α-мезосапробная
7	2	грязная (V)	1,99	умеренно загрязненная (III)	2,95	α-мезосапробная, грязная
8	2	грязная (V)	1,22	загрязненная (IV)	2,65	α-мезосапробная ,грязная
9	2	грязная (V)	1,08	загрязненная (IV)	2,77	α-мезосапробная, грязная
10	2	грязная (V)	1.36	загрязненная (IV)	2,62	α-мезосапробная, грязная
11	2	грязная (V)	1,38	загрязненная (IV)	2,95	α-мезосапробная, грязная
12	2	грязная (V)	1,09	загрязненная (IV)	3,09	α-мезосапробная, грязная
13	2	грязная (V)	1,12	загрязненная (IV)	2,9	α-мезосапробная, грязная
14	2	грязная (V)	0,65	грязная (V)	3,31	α-мезосапробная, грязная
15	2	грязная (V)	1,27	загрязненная (IV)	3,25	α-мезосапробная, грязная
16	5	умеренно загрязненная (III)	2,03	чистая (II)	2,35	β-мезосапробная, умеренно загрязненная
17	2	грязная (V)	0,84	грязная (V)	3,34	α-мезосапробная
18	2	грязная (V)	1,14	загрязненная (IV)	2,26	β-мезосапробная, умеренно загрязненная

была близка к величинам, рассчитанным в среднем по водохранилищу осенью 2004 года (6,87 г/м^2) и установленным для русловой части водохранилища осенью 2012 году (7 г/м^2) [12], но была почти в два раза ниже средней биомассы кормовых организмов осенью 1960 году (11,25 г/м^2) [3].

Доминирующий комплекс видов мягкого бентоса Ижевского ВДХР по численности включал хирономид *Ch. plumosus* (D_i = 15,8) и олигохет *L. hoffmeisteri* (D_i = 10,1), по биомассе – хирономид *Ch. plumosus* (D_i = 36).

При оценке качества воды по показателям зообентоса на всем протяжении водохранилища значения индекса Вудивисса изменялись от 2 до 7 баллов (табл. 5).

Второй класс качества – вода «чистая» – был отмечен только на станции 1 верхнего участка, III класс – вода «умеренно загрязненная» - на мелководной станции 16 нижнего участка, тогда как остальные станции характеризовались V классом – вода «грязная». Показатели, полученные при расчете индекса видового разнообразия Шеннона (0,45-2,03 бит/экз.), который также используют при оценке качества воды [29], позволяют отнести большинство станций к «загрязненным» (IV класс) или «грязным» (V класс). Исключение составили станции 1, 7, где качество воды характеризовалось как «умеренно загрязненная» (III класс) и ст. 16 – как «чистая» (II класс). Индексы сапробности изменялись от 2,35 (β-мезосапробная зона, станции 1, 16) до 3,6 (полисапробная зона, станции 4, 18), остальные места отбора проб соответствовали α-мезосапробной зоне. Таким образом, рассчитанные индексы на большинстве обследованных станций изменялись в основном согласованно, оценивая качество воды как «загрязненная» и «грязная», за исключением станций 1 и 16, где согласно разным индексам качество воды изменялось от «чистой» до «умеренно загрязнен-

ной». Наиболее загрязненной по биотическим показателям была ст. 4, вода характеризовалась как «грязная» и «очень грязная», а зона сапробности – как «полисапробная», что обусловлено развитием олигохет тубифицидного комплекса и личинок мокрецов *Sphaeromias. pictus*. Наши результаты согласуются с данными оценки качества воды в 2004 г. [9], показавшими, что вся глубоководная зона, где происходит интенсивное накопление органического вещества, характеризуется как сильно загрязненная.

Принимая во внимание, что качество воды по гидрохимическим показателям в 2025 г. на всех станциях оценивалось II классом - «чистая», логично предположить, что на развитие макрозообентоса оказывает влияние загрязнение грунтов.

Для оценки связи между гидрохимическими показателями воды (O_2, $БПК_5$, формы азота, фосфат-ионы, общий фосфор, нефтепродукты), содержанием тяжелых металлов и нефтепродуктов в ДО с одной стороны и показателями биотических индексов – с другой, был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Индекс Шеннона реагирует снижением показателей в ответ на рост концентрации цинка (r_s = –0,49; $p < 0,05$), кобальта (r_s = –0,60; $p < 0,05$) и никеля (r_s = –0,54; $p < 0,05$) в ДО. Выявлена статистически значимая положительная связь между величиной индекса сапробности и концентрациями никеля (r_s = 0,61; $p < 0,01$), мышьяка (r_s = 0,60; $p < 0,01$), кобальта (r_s = 0,48; $p < 0,05$), кадмия (r_s = 0,54; $p < 0,05$), и цинка (r_s = 0,60; $p < 0,01$) в ДО. Показатели биотического индекса Вудивисса снижаются при росте концентрации цинка в ДО (r_s = –0,51; $p < 0,05$). Связь биотических индексов с остальными использованными для анализа показателями воды (O_2, БПК5, формы азота, фосфат-ионы, общий фосфор, нефтепродукты) и содержанием в ДО хрома, меди, свинца оказалась недостоверной.

Настоящее исследование, наряду с имеющимися [19, 30], в очередной раз подтверждают определенное несовершенство разработанных биологических показателей для оценки качества поверхностных вод, так как состояние донных сообществ, по-видимому, в большей степени зависит от загрязнения ДО.

В связи со стремительной индустриализацией и экономическим развитием регионов за последнее столетие загрязнение донных отложений тяжелыми металлами стало серьезной экологической проблемой из-за невозможности биологического разложения, стойкости, биоаккумуляции и токсического влияния на гидробионтов [25, 34-35, 38]. Кроме того, токсический эффект тяжелых металлов может усиливаться через пищевые цепи, что приводит к потенциально серьезным последствиям как для самых чувствительных звеньев пищевой цепи, так и, в конечном счете, для здоровья человека [31, 35].

Как отмечалось выше, в водоемы и водотоки бассейна ИВХ со сточными водами поступает большое количество нефтепродуктов [7]. Значительная часть углеводородов оседает на дно и сохраняется там в течение нескольких месяцев и даже лет. В литературном обзоре исследований о негативном влиянии нефти на макрозообентос показано, что ее седиментированные фракции вместе с различными примесями являются источником сильного токсического действия для донных организмов [24].

Таким образом, ДО в ИВХ, содержащие высокие концентрации поллютантов, могут быть источником вторичного загрязнения водной толщи.

Заключение

Качество воды ИВХ в осенний период 2025 года по гидрохимическим показателям оценивается II классом – «чистая», однако на всем протяжении водоема отмечается превышение предельно допустимых концентраций легко окисляемых органических соединений и, локально, нефтепродуктов. При этом в донных отложениях водоема аккумулировано значительное количество загрязняющих веществ. Приоритетными загрязнителями ДО являются тяжелые металлы (хром, медь, свинец, никель, цинк и кобальт), уровни которых в несколько раз превышают фоновые. Загрязнение ИВХ тяжелыми металлами существенно превышает таковые для ряда водохранилищ Волжского каскада. Почти за 20-летний период не отмечено улучшения качества воды ИВХ по содержанию тяжелых металлов в ДО и показателям макрозообентоса, но количественные характеристики кормовых объектов, потребляемых бентосоядными рыбами, остаются относительно стабильными. К проблеме загрязнения воды и ДО добавилась проблема массового расселения в водохранилище агрессивного инвазивного вида *D. polymorpha*, захватывающего свободные экологические ниши, что вызывает необходимость проведения дальнейших мониторинговых исследований водоема для оценки последствий влияния вселенца на аборигенные сообщества и состояние кормовой базы рыб.

Финансирование. *Работа выполнена при поддержке гранта Президентского фонда природы № ЭКО-25-2-002634 «Макрозообентос как важнейший комплекс организмов-биоиндикаторов для оценки и прогнозирования состояния экосистемы Ижевского водохранилища».*

Литература

1. Алексеев ВР, Цалолихин СЯ, ред. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Зообентос. М, СПб: КМК; 2016(2).
2. Бондаренко НА, Томберг ИВ, Пенькова ОГ, Шевелева НГ. Структурные перестройки фито- и зоопланктона под воздействием климатических изменений и антропогенной нагрузки (оз. Байкал, Россия). Биология внутренних вод. 2023;(6):727-739. DOI: 10.31857/S0320965223060050
3. Варфоломеев ВВ. Биология промысловых рыб прудов и водохранилищ Удмуртии. Ученые записки Перм. гос. пед. ин-та. Пермь. 1967;(41):46–149.
4. Гагарина ОВ, Прокашев ММ, Плеханова ВВ. О сезонных изменениях качества вод Ижевского пруда. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2018;28(2):147-155. URL: https://journals.udsu.ru/biology/article/view/2332?ysclid=ml71eekw1c128231190
5. Глушко ПА, Халиуллина ЛЮ. Особенности динамики фитопланктона и гидрохимических показателей воды Ижевского водохранилища в 2023-2024 гг. Наука Удмуртии. 2025;109(2):29-40. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63893856&ysclid=ml71ggce5x579476999
6. Дгебуадзе ЮЮ, Петросян ВГ, Хляп ЛА, ред. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100). Москва: КМК;2018. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37310782
7. Егоров ИЕ. Хозяйственная деятельность человека и источники загрязнения. В кн.: Ижевский пруд. Ижевск: Удмуртский университет»; 2002, С. 73-77. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25998391&ysclid=ml71krhk3s997779222
8. Захаров ВЮ. Многолетняя динамика состояния гидробионтов Ижевского водохранилища. В кн.: Материалы конференции «Седьмая научно-практическая конференция преподавателей и сотрудников УдГУ». Ижевск; 2005. Т. 2, С. 188-9.
9. Истомина АМ, Истомин СГ, Казакова НС, Поздеев ИВ, Селеткова ЕБ. Экологическое состояние Ижевского пруда. В кн.: Рыбные ресурсы Камско-Уральского региона и их рациональное использование. Пермь: Изд-во Пермского университета; 2008. С. 46-51.
10. Каргапольцева ИА. Фитофильные макробеспозвоночные устьевых областей малых рек Удмуртской Республики (на примере рек Березовка и Пазелинка). В кн.: Материалы конференции «Экология: факты, гипотезы, модели». Екатеринбург: ИЕРиЖ УрО РАН; 2016. С. :417. URL: http://ipae.uran.ru/library/publications_pdf/proceedings/youth_conference_in_ipae.
11. Королёв АН. Современное гидрохимическое состояние природных и антропогенных водоемов города Омска. Успехи современного естествознания. 2025;(9):75-81. DOI 10.17513/use.38431
12. Котегов БГ, Аксенова НП, Захаров ВЮ, Холмогорова НВ, Фефилова КК. Биологические и химические эффекты антропогенного эвтрофирования Ижевского водохранилища. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет»; 2013. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21995551
13. Крылов АВ, Барышев ИА, Безматерных ДМ и соавт. Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань; 2024. DOI 10.47021/monography_670cd0a47a4437.24064368
14. Курина ЕМ, Селезнев ДГ. Анализ закономерностей организации комплексов видов макрозообентоса понто-каспийского и понто-азовского происхождения в водохранилищах Средней и Нижней Волги. Экология. 2019;(1):62-71. DOI 10.1134/S0367059719010050
15. Курина ЕМ, Селезнев ДГ, Шерышева НГ. Зависимость распространения чужеродных видов макрозообентоса от типа и состава грунта в волжских и камских водохранилищах. Биология внутренних вод.2023;(2):243-51. DOI:10.31857/S032096522302016X
16. Наумов ВИ. Характеристика и охрана хозяйственно-питьевых вод Удмуртской АССР. Ижевск: Изд-во «Удмуртия», 1978.
17 Палий ВФ. О количественных показателях при обработке фаунистических материалов. Зоол журн. 1961:60(1):3-12.
18 Постевая МА, Даувальтер ВА, Слуковский ЗИ. Оценка качества вод городских озер по гидрохимическим индексам (на примере г. Мурманска). Российский журнал прикладной экологии. 2025(1):10-18. DOI 10.24852/2411-7374.2025.1.10.18
19. Степанова НЮ, Говоркова ЛК, Анохина ОК, Латыпова ВЗ. Оценка уровня загрязнения донных отложений Куйбышевского водохранилища в местах повышенного антропогенного пресса методом триады. В кн.: Актуальные проблемы водной токсикологии. Борок, 2004. С. 224-47.

20. Степанова НЮ, Латыпова ВЗ, Анохина ОК. Экологическое нормирование содержания загрязняющих веществ в донных отложениях. Методы экологических исследований. 2007;(4):42-9. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_11912664_47169167.pdf
21. Ившин ВН, Туганаев ВВ, ред. Удмуртская Республика: энциклопедия. Ижевск: Удмуртия, 2008.
22. Филинова ЕИ. Хирономиды в макрозообентосе Волгоградского водохранилища. Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье. 2020;(17):70-5.
23. Холмогорова НВ, Пушина ОА. Современное состояние макрозообентоса Ижевского водохранилища. Наука Удмуртии. 2023;(2):138-45. URL:https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59553444
24. Холмогорова НВ. Динамика структуры макрозообентоса в условиях нефтяного загрязнения донных отложений малых рек Удмуртии. Вестник Томского государственного университета. 2007;304:187-190. URL:https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12225151_76594674.pdf
25. Чуйко ГМ, Подгорная ВА, Томилина ИИ, Ложкина РА, Законнов ВВ, Гапеева МВ. Комплексная оценка экотоксикологического состояния водохранилищ Средней и Нижней Волги методами биодиагностики и анализа содержания тяжелых металлов в донных отложениях. Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 2022;100(103):89-96. DOI: 10.47021/0320-3557-2022-89-96
26. Цалолихин СЯ, ред. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 3. Паукообразные. Низшие насекомые. СПб.: ЗИН РАН; 1997.
27. Цалолихин СЯ, ред. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Высшие насекомые: Двукрылые. СПб.: ЗИН РАН; 1999.
28. Цалолихин СЯ, ред. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые: ручейники, чешуекрылые, жесткокрылые, сетчатокрылые, большекрылые, перепончатокрылые. СПб.: ЗИН РАН, 2001.
29. Шитиков ВК, Розенберг ГС, Зинченко ТД. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука; 2005. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19491217
30. Allan JD, Castillo MM. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Dordrecht: Springer; 2007. DOI:10.1007/978-1-4020-5583-6
31. Hammerschmidt CR, Fitzgerald WF. Bioaccumulation and trophic transfer of methylmercury in Long Island Sound. Arch Environ Contam Toxicol. 2006;51:416-24. DOI:10.1007/s00244-005-0265-7
32. Kholmogorova NV, Kargapoltseva IA. The species composition of macroinvertebrates and water quality **assessment using the macrozoobenthos organisms of the Izhevsk reservoir. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;321(1):4. DOI:10.1088/1755-1315/321/1/012061
33. Kownacki A. Taxocens of Chironomidae in streams of the Polish Hight Tarta Mts. Acta Hydrobiol. 1971;13(2):439-64. URL: https://scholar.google.com/citations?user=7tFNxhsAAAAJ&hl=en
34. Levit RL, Shigaeva TD, Kudryavtseva VA. Heavy metals in macrozoobenthos and sediments of the coastal zone of the eastern Gulf of Finland. Russ J Gen Chem. 2020;90(13):2700-7. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.06.011
35. Lim DI, Choi JW, Shin HH, Jeong DH, Jung HS. Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea. Marine Pollut Bull. 2013;73(1):362-8. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.05.037
36. Pantle R, Buck H. Die biologische Überwachung der Gewasser und die Darstellung der Ergebnisse. Gas Wasserfach. 1955;96(18).
37. Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. of Illinois Press; 1949.
38. Tam N, Wong Y. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. Enviorn Pollut. 2000;110:195-205. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00310-3.
39. Tamrakar RK, Butoliya S, Upadhyay K. Water pollution: sources, causes, and effects. In: Current Advancements in Nanomaterials for Wastewater Remediation. Elsevier; 2026. P. 31-50.
40. Woodiwiss FS. The biological system of stream classification used by the Trent river board. Chem Industry. 1964:443-7.

УДК 57.087 || EDN: ILCYRI
CC BY-NC 4.0 © А.Р. Каримов и соавт.; ФНИ «XXI век»

О ПЕРЕНОСЕ ВИРУСОВ АЭРОЗОЛЯМИ

А.Р. Каримов[1,2], М.А. Соломатин[1*], А.Н. Бочаров[2]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ и [2]Институт высоких температур РАН, Москва, Россия

**Эл. почта: mis4455@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 09.04.2026; принята к печати 12.05.2026

Рассмотрен механизм захвата вирионов заряженными аэрозольными частицами с образованием оболочки из полярных молекул, содержащей потенциально инфекционно значимое число вирионов. Реализация данного механизма предполагает наличие свободных заряженных частиц в среде, содержащей полярные молекулы и биочастицы. Поэтому в диффузном приближении была проведена оценка заряда больших атмосферных ионов, приобретающих заряд в нормальных атмосферных условиях вследствие различий в подвижности электронов и лёгких ионов, что позволило найти распределение заряженных аэрозолей в зависимости от их заряда и характерного размера в приземном слое. Также обсуждается механизм образования заряженных аэрозолей в дыхательных путях в результате развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в слое слизи, покрывающей поверхность биологических тканей. Проведены грубые оценки образования необходимых ионов в биохимических реакциях на границе раздела биологической ткани и слоя жидкости. Адсорбция полярных молекул к таким ионам рассмотрена в диффузном приближении при учете только собственного электрического поля ионов, что позволило найти распределение полярных молекул вокруг заряженных аэрозолей.

Ключевые слова: *Заряженные аэрозоли, электростатическое взаимодействие, вирионы*

ON TRANSFER OF VIRUSES BY AEROSOLS

A.R. Karimov[1,2], M.A. Solomatin[1*], A.N. Bocharov[2]

[1]National Nuclear Research University (MEPhI) and [2]Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

**Email: mis4455@yandex.ru*

The mechanism of capture of virions by charged aerosol particles resulting in the formation of an envelope comprised of polar molecules containing a potentially infectious number of virions is considered. The operation of this mechanism implies the presence of free charged particles in a medium containing polar molecules and bioparticles. Therefore, a diffuse approximation was used to assess the charge of large atmospheric ions that acquire their charge under normal atmospheric conditions due to differences in electron and light ion mobility. This made it possible to find the distribution of charged aerosols depending on their charge and characteristic size in the ground atmospheric layer. Also discussed is the mechanism for the formation of charged aerosols in the respiratory tract as a result of Kelvin-Helmholtz instability development within the mucus layer covering the surfaces of biological tissues. Rough estimates of the formation of appropriate ions in biochemical reactions at the boundary between the biological tissue and the liquid layer have been made. The adsorption of polar molecules to such ions is considered using the diffuse approximation, taking into account only the own electric field of ions, which allows finding the distribution of polar molecules around charged aerosols.

Keywords: *charged aerosols, electrostatic interaction, virions*

1. Введение

Аэрозоли, являющиеся неотъемлемой частью атмосферы Земли и дыхательного цикла человека, условно классифицируются по природе их происхождения. Биоаэрозоли образуются при охлаждении и последующей конденсации выдыхаемого воздуха, а также в результате механико-физиологических процессов в дыхательных путях. Наряду с этим аэрозольные частицы могут иметь атмосферное природное или техногенное происхождение. В этом случае ядрами конденсации могут служить как нейтральные, так и заряженные микрочастицы, а также продукты фотохимических и гетерогенных реакций в атмосфере [9, 13, 23, 30].

Независимо от происхождения, размеры аэрозольных частиц меняются в широком диапазоне (рис. 1), поэтому такие частицы могут оседать в разных частях дыхательной системы человека (рис. 2), где будет происходить их взаимодействие с окружающей биологической средой, состоящей из различных биологических макромолекул. Это особенно важно, поскольку вирионы, покидающие инфицированные клетки, в окружающей среде не существуют в виде свободных изолированных частиц. Они, как правило, оказываются включёнными в состав надмолекулярных образований [22, 31, 40].

Например, в зависимости от электрических свойств окружающей среды и аэрозольных частиц за счет

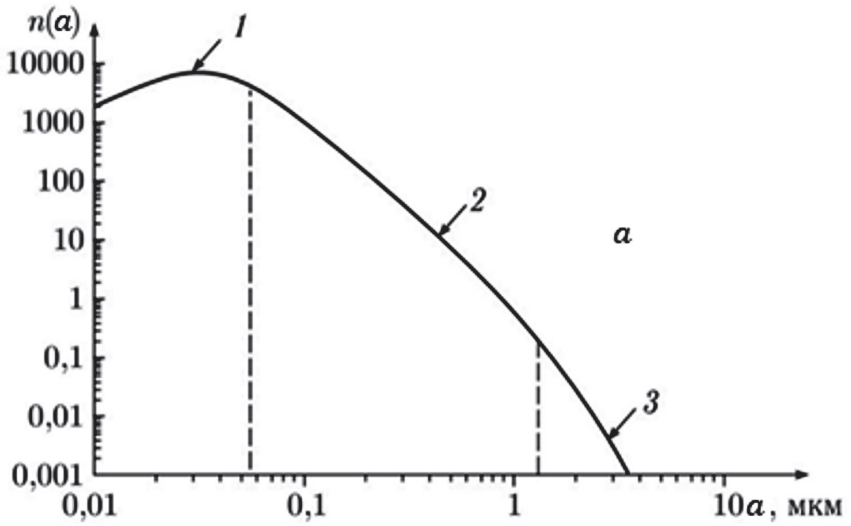


Рис. 1. Распределение аэрозольных частиц в атмосфере: 1 – частица Эйткена; 2 – частицы Юнге; 3 – гигантские частицы.

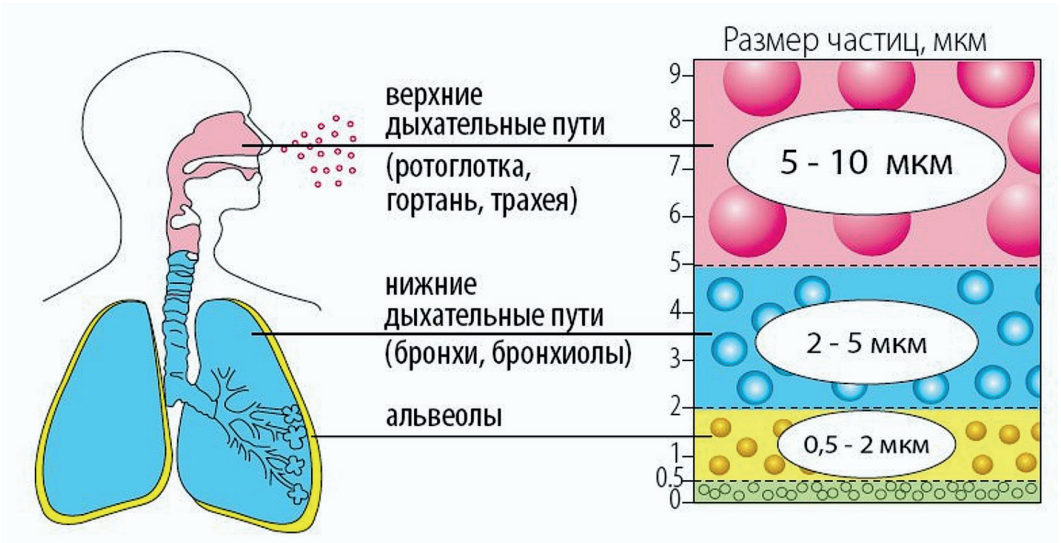


Рис. 2. Аэрозоли в дыхательной системе человека

электростатического притяжения вокруг аэрозоля может формироваться слой полярных молекул, включающий некоторое число вирионов. Сформированные таким образом частицы далее будем отождествлять с респираторными частицами, включенными в дыхательный цикл человека, что обеспечивает распространение различных воздушно-капельных инфекций в окружающей среде.

Однако образование респираторной частицы таким путем предполагает наличие в среде подходящих заряженных аэрозольных частиц, способных притянуть и удержать дипольные макромолекулы. Поэтому мы должны рассмотреть механизмы образования заряда у аэрозольных частиц в атмосферных условиях и дыхательных путях человека, а затем обсудить механизм захвата дипольных частиц отдельными зарядами. Правда, следует отдавать отчет, что такой электростатический захват является неединственным механизмом формирования подобных надмолекулярных структур.

2. Оценка инфицирующей дозы, переносимой аэрозольной частицей

Согласно последним исследованиям [2, 25], даже один вирион при определенных условиях способен инициировать развитие болезни. Однако вероятность заражения существенно возрастает с увеличением чи-

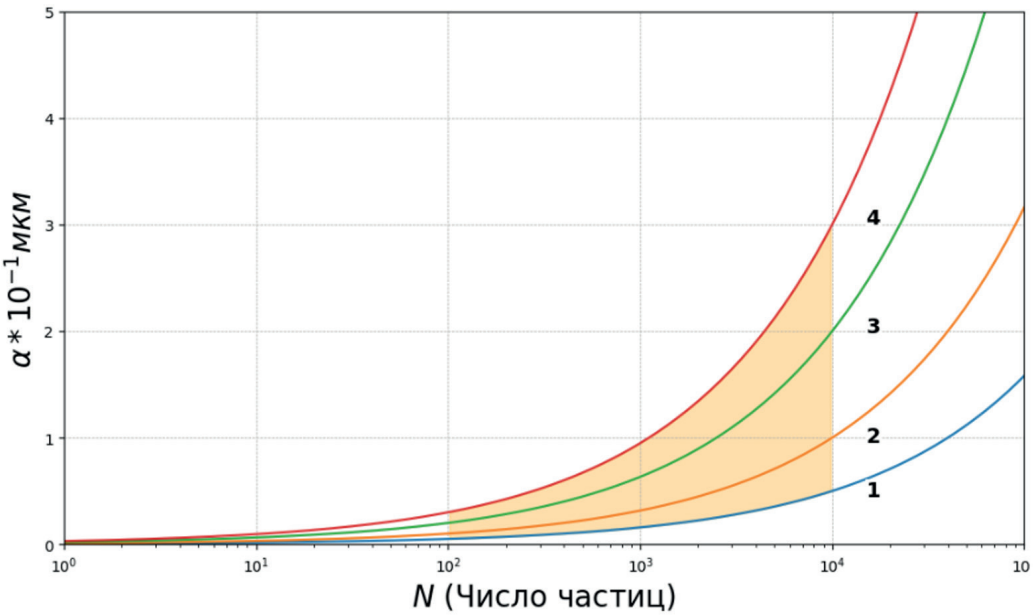


Рис. 3. Область наиболее опасных аэрозолей для различных l_c: кривая 1 отвечает условию l_c = 50 нм, 2 – l_c = 100 нм, 3 – l_c = 200 нм и 4 – l_c = 300 нм

сла вирионов, достигших организма восприимчивого хозяина, что определяется состоянием иммунитета и группой крови человека и вирулентностью патогена [2, 4, 25]. Так, считается, что для развития заболевания число вирусов в организме, чувствительных к данному патогену, должно преодолеть порог, называемый минимальной инфицирующей дозой N, которая варьируется в широких пределах для разных заболеваний. Например, для сезонного гриппа она варьируется от 90 до 1950 копий вирусной РНК [35], для SARS-CoV-2 находится в диапазоне от 500 до 3000 [33, 34]. Исходя из этих данных, будем считать, что характерная оценка числа вирионов, соответствующая существенной вероятности заражения для типичных респираторных заболеваний, лежит в диапазоне от 10^2 до 10^4.

Исходя из этих эмпирических данных для грубых оценок способности аэрозольных частиц нести N вирионов возьмем инфицирующую дозу для типичных респираторных заболеваний из диапазона $10^2 \leq N \leq 10^4$, что будет определять потенциальный инфицирующий эффект

Оценим способность аэрозольных частиц нести N вирионов. Как видно из графика на рис. 1, концентрация аэрозольных частиц существенно зависит от их диаметра α и может изменяться более чем на четыре порядка. При этом типичный размер вируса l_C составляет 50–300 нм, например, для коронавируса SARS-CoV-2 величина l_C составляет около 100 нм. Для простоты оценок далее будем считать, что аэрозольная частица и вирионы имеют сферическую форму. Согласно изопериметрическому неравенству (см. например [24, 37]), именно такого рода геометрические объекты при заданном объеме имеют минимальную площадь поверхности, то есть такая оценка будет давать представление о максимальном заполнении поверхности аэрозольной частицы, имеющей минимальный характерный размер. Тогда в рамках предельной геометрической оценки будем считать, что проекция вириона на поверхность аэрозольной частицы представляет собой круг, а сами вирусные частицы могут образовывать на этой поверхности только один монослой.

В этом случае уравнение (1) определяет диаметр a аэрозольной частицы, способной разместить N вирионов с диаметром l_C.

$$a = l_C \sqrt{N/2}. \quad (1)$$

Соответствующие зависимости $\alpha = \alpha(N)$ для допустимых l_C приведены на рис. 3. Сопоставляя графики на рис. 1 и 3, приходим к заключению, что единичная аэрозольная частица с $\alpha \geq 0{,}3$ мкм потенциально может переносить количество вирионов, сопоставимое с характерными оценками инфекционной дозы для большого набора респираторных инфекций. В случае же $\alpha < 0{,}3$ мкм необходимо анализировать соотношение между N и l_C и размером аэрозольной частицы, чтобы установить возможность переноса частицей необходимой инфицирующей дозы.

При этом следует иметь в виду, что соотношение (1) дает заведомо завышенную оценку по следующим причинам. В реальности на аэрозольную частицу помимо вирионов могут адсорбироваться также различные макромолекулы и компоненты респираторной жидкости, уменьшая доступное место для вирусов. С другой стороны, как будет показано далее, предположение об осаждении в один слой является

излишне жестким, заряженный аэрозоль может удерживать несколько слоев полярных компонентов, однако реальное содержание вирионов будет ограничено конкурирующей адсорбцией и кулоновским экранированием. Тем не менее, данную оценку следует трактовать как предварительную, указывающую только на то, что при определенных условиях даже одна аэрозольная частица, покрытая слоем жидкости, содержащей большое количество вирусных частиц, может рассматриваться как потенциальный переносчик инфекционной дозы.

3. Образование заряда у атмосферных и биологических аэрозолей

В вышеописанных условиях происхождение самой аэрозольной частицы как таковое не имеет никакого значения, то есть частица может попасть в дыхательные пути из атмосферы, либо сформироваться в результате физиологических процессов в организме. Однако представляется необходимым вкратце рассмотреть механизмы образования заряда у атмосферных и биологических аэрозолей, а также зависимость заряда от размера частицы, массы.

Заряженные аэрозольные частицы в атмосфере условно разделяют на два класса: большие ($3\times10^{-3} \leq \alpha \leq 5\times10^{-2}$ мкм) и легкие ($\alpha\sim3\times10^{-4}$ мкм) ионы, различающиеся подвижностью. Изначально легкие ионы, представляющие собой отдельные молекулы или фрагменты молекул с одним или несколькими элементарными зарядами. В данном случае ионизация атмосферных газов осуществляется космическим излучением, потоками частиц, земной радиацией, а также результатами столкновении падающих тяжелых частиц с неподвижными частицами, например, при столкновении частиц льда с аэрозолями, содержащими жидкую воду, то есть атмосфера Земли представляет собой слабо ионизированный газ, где постоянно идут кинетические процессы нуклеации и роста кластеров, определяющие массовый и зарядовый состав среды [10].

При нормальных атмосферных условиях (плотность воздуха $n=2{,}7\times10^{19}$ см$^{-3}$) динамика и кинетика аэрозолей будет проходить в диффузном режиме, если число Кнудсена

$$Kn=\lambda/a\ll1, \qquad (2)$$

где: λ – длина свободного пробега при столкновении частицы среды с аэрозолем.

Если α превышает диаметр окружающих частиц, то взяв в формуле $\lambda = (\sigma n)^{-1}$ в качестве сечения столкновения $\sigma = \pi a^2$, получаем из условия (2) оценку, при соблюдении которой реализуется диффузный режим:

$$20a^3\gg1, \qquad (3)$$

здесь α взято в мкм.

К тому же, согласно зависимостям, представленным на рис. 3, частицы таких размеров представляют наибольшую эпидемиологическую опасность.

В этом случае большие аэрозольные частицы приобретают заряд за счет разной подвижности легких ионов и свободных электронов, присутствующих в ионизированном воздухе. Тогда *s*-ая компонента потока зарядов q_s в сферической системе координат относительно аэрозоля определяется диффузией в воздухе и дрейфом в электрическом поле

$$\boldsymbol{E} = \frac{Ze}{\epsilon r^2}\boldsymbol{e}_r + \boldsymbol{E}_{out}, \qquad (4)$$

создаваемом аэрозолем с зарядом Ze в среде с диэлектрической проницаемостью ε, где приближение $\varepsilon \approx 1$ применимо только для сухого воздуха, тогда как для вирус-содержащих биоаэрозольных частиц следует использовать эффективную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{eff} > 1$, зависящую от содержания воды, белков, солей и других компонентов респираторной жидкости, и внешним полем $\boldsymbol{E}_{out}$, то есть

$$\boldsymbol{I}_s = 4\pi a^2 q_s D_s\left[\frac{q_s}{kT}n_s\boldsymbol{E} - \nabla n_s\right], \qquad (5)$$

где: q_s, n_s и D_s – заряд, плотность и коэффициент диффузии *s*-го компонента (здесь индекс $s = e$ относится к электронам, а $s = i$ – к ионам), T – температура среды. Причем внешнее поле $\boldsymbol{E}_{out}$ в общем случае может иметь как природное происхождение (например, это может быть естественное электрическое поле Земли), так и техногенное.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда $\boldsymbol{E}_{out} = 0$ и n_s зависят только от радиальной координаты. При этом уравнение (5) сведется к

$$I_s = -4\pi a^2 q_s D_s\left[\frac{dn_s}{dr} - \frac{Ze^2 n_s}{Tr^2}\right]. \qquad (6)$$

Если пренебречь для простоты плотностью тяжелых ионов и считать, что $n_e \approx n_i$, из условия $I_e = I_i$ следует [7, 26] оценка характерного заряда аэрозоля, приобретаемого в результате кинетических процессов:

$$Z = \frac{akT}{e^2}\ln\left(\frac{D_i}{D_e}\right). \qquad (7)$$

Поскольку в нормальных условиях $D_i/D_e = (m_e/m_i)^{3/2} \ll 1$, аэрозольные частицы в основном приобретают отрицательный заряд, растущий с увеличением размера аэрозоля a, что подтверждается наблюдениями за зарядовым составом атмосферных аэрозолей.

В качестве иллюстрации данной особенности оценим Z для типичных атмосферных условий, воспользовавшись справочными данными по соответствующим коэффициентам диффузии [17, 21, 27, 32, 36, 41]. Согласно этим данным при нормальных атмосферных условиях можно положить $D_e \approx 0{,}2$ *м²/с*. Коэффициент диффузии D_i определяется достаточно широким спек-

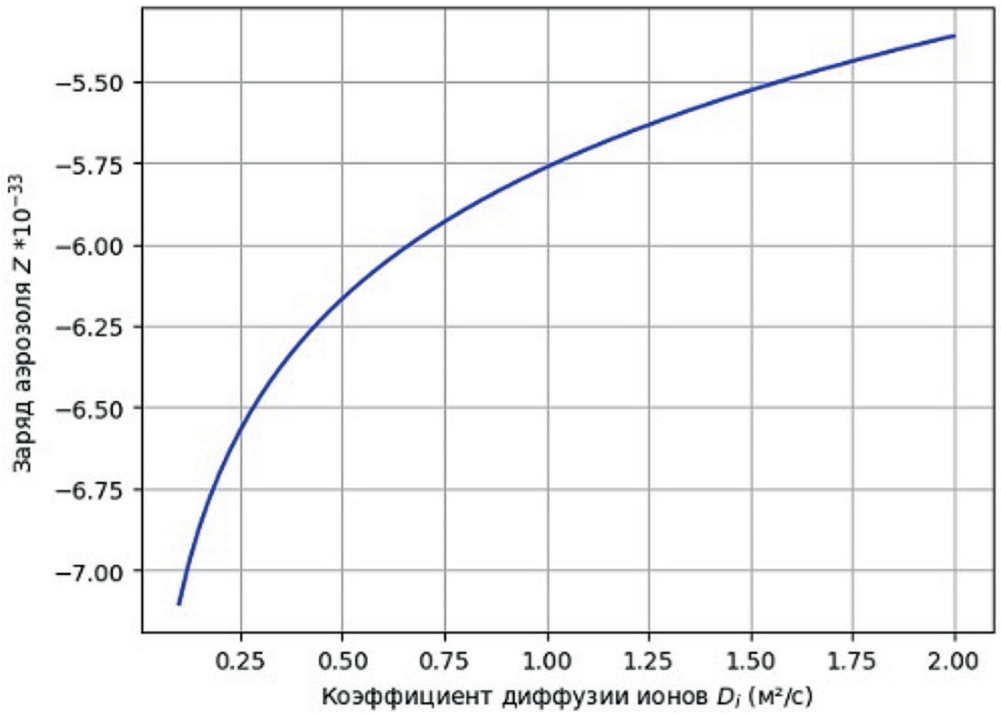


Рис. 4. Зависимость заряда от D_i при фиксированном $D_e \approx 0{,}2$ м²/с

тром ионов, присутствующих в воздухе при нормальных условиях: O_2^+, N_2^+, H_3O^+, CO_3^-, наличие воды в атмосфере приводит к образованию гидратированных ионов $H_3O^+ \cdot (H_2O)_n$. Для среды такого состава на рис. 4 приведена зависимость Z, рассчитанная при T = 300°

Правда, следует иметь в виду, что такая оценка заряда жидкой аэрозольной частицы по формуле (7) дает завышенное значение Z. Это связано с тем, что в случае жидкой заряженной сферической капли нарушение баланса между силой поверхностного натяжения и внутренними электростатическими силами может вызвать развитие неустойчивости Релея [8], приводящей к фрагментации капли. Чтобы оценить критические значения, при которых происходит деление капли, пренебрегая внутренним и атмосферным давлением, будем считать, что заряды равномерно распределены по поверхности капли. Тогда условие равновесия запишется как

$$\frac{(Z_* e)^2}{8\pi a^4} = \frac{2\sigma}{a}, \qquad (8)$$

где: σ – коэффициент поверхностного натяжения, откуда находим критическое значение Z_*:

$$Z_* e = \sqrt{16\pi\sigma a^3}\,. \qquad (9)$$

Если знать зависимость среднего заряда Z аэрозольных частиц от их характерного размера α, можно оценить характерную высоту концентрации заряженных больших аэрозольных частиц, что имеет принципиальное значение для реализации механизма переноса вирусов такими частицами. Поскольку Земля имеет отрицательный заряд, то отрицательные аэрозоли концентрируются на определенной высоте $z = h*$, определяемой из условия механического равновесия, записанного для простоты в приближении $\nabla \cdot p \approx 0$, где p – давление окружающей среды, и при пренебрежении турбулентным перемешиванием, в виде

$$m_a g - ZeE_\oplus = 0, \qquad (10)$$

где m_a – масса аэрозольной частицы, рассчитываемая по соотношению $m_a = 4\pi\rho a^3/3$.

Здесь и далее плотность аэрозоля составляет ρ = 1000 кг/м³ при молекулярной массе $\mu_a = 3 \cdot 10^{-26}$ кг, что соответствует таким биологическим жидкостям, как мокрота, слюна, включая фракцию PM2.5. Собственное поле Земли E_0 оценивается на основе модели «сферического конденсатора», в котором нижний электрод – поверхность Земли, а верхний электрод – верхние слои атмосферы. Причем в нормальных условиях вблизи поверхности Земли электрическое поле составляет $E_0 = -130$ В/м [11, 18, 39]. В отсутствие грозовых облаков и тому подобного напряженность электрического поля уменьшается с высотой и обращается в нуль на поверхности верхнего электрода. Для относительно небольшого высотного диапазона, в котором разность плотностей ионов и электронов постоянна и составляет $\delta n \approx 3$ см⁻³ [20], $E_\oplus$ определяется соотношением

$$E_{\oplus} = E_0\left(1 - \frac{z}{L}\right), \quad (11)$$

где: величина $L = |E_0|/(4\pi e \delta n)$ представляет собой эффективную высоту атмосферы в используемой модели конденсатора и составляет L ~ 5 км.

Тогда из (10) и (11) находим соотношение между равновесной высотой расположения аэрозоля h_* и его характеристиками:

$$h_* = L\left(1 - \frac{m_a g}{ZeE_0}\right).$$

Разрешив это соотношение относительно Ze/μ_a, получим

$$\frac{Ze}{\mu_a} = \frac{g}{E_0}\left(\frac{a}{r_w}\right)^3 \frac{1}{1-\xi}, \quad (12)$$

где для наглядности введены безразмерная высота $\xi = h^*/L$ и радиус Вигнера-Зейтца:

$$r_w = \left(\frac{3\mu_a}{4\pi\rho}\right)^{1/3}, \quad (13)$$

характеризующий объем, приходящийся на одну молекулу/атом аэрозольной частицы.

Поскольку с точки зрения переноса вирусов наибольший интерес представляет приземный слой атмосферы $\xi \ll 1$, то (12) удобно переписать в форме

$$\frac{Ze}{\mu_a} \approx \frac{g}{E_0}\left(\frac{a}{r_w}\right)^3 (1 + \xi). \quad (14)$$

явно демонстрирующей связь аэрозольных характеристик с ξ и E_0.

В частности, данное соотношение показывает, что удержание аэрозолей в электрическом поле Земли возможно только при значительной заряженности, особенно для тяжёлых частиц, и зависит от их химической природы.

По-видимому, респираторные частицы также могут приобретать заряд непосредственно в дыхательных путях, где происходит зарождение самих респираторных частиц при прохождении воздушного потока через трахеи и бронхи, покрытых слизистым секретом, а также в легких больного человека. С физической точки зрения в такой системе образование зарядов может происходить по двум механизмам.

Во-первых, на границе раздела воздушный поток-жидкость может развиться неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, которая может привести к отрыву жидкости от поверхности слоя слизи с последующим образованием капель [15, 29]. Характерные размеры образующихся капель α и их заряды задаются колебаниями давления и скорости воздуха в верхних частях дыхательных путей человека, а также толщиной слоя слизи h_s ($h_s \approx 70$ мкм). Следует иметь в виду, что в нормальных условиях толщина слоя слизи варьируется у разных людей и в разных частях дыхательных путей даже одного и того же человека [14, 40].

Второй механизм обусловлен постоянно идущими биохимическими реакциями на границе раздела биологической ткани со слоем жидкости, что определяет химический и зарядовый состав мокроты. Данный вопрос чрезвычайно сложен и выходит за рамки настоящей работы. Поэтому ограничимся грубым анализом состояния только водной фазы слизистого секрета, неизменно входящей в состав мокроты, поскольку при нормальных условиях мольная доля воды превышает 98% [22]. При этом следует иметь в виду, что часть примесей (~1%) – положительные и отрицательные ионы [31], способные выполнять роль центров притяжения.

При нормальных условиях вода представляет собой слабый электролит, где образование катионов и анионов происходит преимущественно по механизму

$$2H_2O \leftrightarrows H_3O^+ + OH^-, \quad (15)$$

когда за счет тепловых колебаний атом водорода, образующий водородную связь, может на мгновение занять промежуточное положение между атомами кислорода. Тогда из такой конфигурации водородной связи с равной вероятностью могут образоваться как исходные молекулы воды, связанные водородными связями, так и два иона, представленных в обратимой реакции (15). Данный процесс приводит к установлению в системе динамического равновесия, определяемого законом действующих масс. Если число диссоциированных молекул мало по сравнению с общим числом молекул, то, если считать концентрацию воды постоянной, условие равновесия удобно представить в виде

$$K_w = [H_3O^+][OH^-], \quad (16)$$

где: здесь $[H_3O^+]$ и $[OH^-]$ - концентрации ионов H_3O^+ и OH^- соответственно, K_w – константа автопротолиза воды.

Воспользовавшись условием электронейтральности среды $[H_3O^+] = [OH^-] = n$, из (16) получаем грубую оценку концентрации ионов:

$$n = \sqrt{K_w}, \quad (17)$$

которая дает представление о порядке концентрации носителей зарядов в слое слизистого секрета. Например, при температуре 37°C, характерной для дыхательных путей, $K_w = 2{,}5\cdot10^{-14}$ моль²/л², что соответствует $n = 1{,}6\cdot10^{-7}$ моль/л или $n = 10^{12}$ см$^{-3}$, а дебаевская длина $\lambda_D = \sqrt{(kT/(4\pi e^2 n))}$ при данной температуре составляет $\lambda_D = 119$ мкм, то есть $a, h_s \ll \lambda_D$. Это означает, что в слое слизи соблюдаются необходимые условия для образования заряженных частиц, которые могут выступать центрами притяжения частиц с ненулевым дипольным моментом, к числу которых могут относиться вирионы.

4. Осаждение вирионов на большие ионы

Полученные оценки указывают на потенциальную возможность участия как атмосферных заряженных аэрозольных частиц, так и биологических аэрозолей в захвате вирионов, которые для простоты далее будем рассматривать как полярные макромолекулы с дипольным моментом $d \sim q_0 l_0$ (здесь q_0 - эффективный заряд вирусной частицы. В этой связи еще раз подчеркнем, что в такой постановке нет разницы между вирионами и другими полярными молекулами. Поэтому, ограничиваясь рассмотрением осаждения только вирионов на заряженные аэрозоли, мы заведомо усиливаем потенциальный инфекционный эффект, которым может обладать сформированная таким образом респираторная частица.

Тогда при соблюдении условия (3) в случае шаровой симметрии распределение дипольных частиц формируется в результате диффузии и дрейфа в электрическом поле $\mathbf{E} = E(r)\mathbf{e}_r$, созданном неподвижными крупными заряженными аэрозольными частицами. В этом случае плотность n_C определяется уравнением

$$\frac{\partial n_c}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 j_c), \qquad (18)$$

в котором

$$j_c = D_c\left(-\frac{\partial n_c}{\partial r} + \frac{q_c l_c}{T} n_c \frac{\partial \mathrm{E}}{\partial r}\right), \qquad (19)$$

где: D_C– коэффициент диффузии вириона.
При записи (19) мы также исходили из того, что между коэффициентом диффузии и подвижностью зарядов b_C выполняется соотношение Эйнштейна:

$$b_c = D_c \frac{q_c l_c}{T}. \qquad (20)$$

Для определенности рассмотрим динамику вблизи аэрозольной частицы с отрицательным зарядом $-Ze$, когда влиянием окружающих зарядов на электрическое поле вблизи выделенного заряда можно пренебречь, что допустимо при

$$\alpha \ll \lambda_D \ll l_a. \qquad (21)$$

Здесь $l_a = n^{-1/3}$ – среднее расстояние между аэрозолями, входящими в рассматриваемую среду. Например, при характерной плотности аэрозолей в дыхательных путях $n \sim 10^3$–10^4 см$^{-3}$ [28, 38] l_a составляет 20-40 мкм, что значительно больше λ_D (~ 1) мкм. Следовательно, в подобных случаях взаимодействие носит локальный характер и реализуется только в непосредственной близости вирусной частицы к заряженному носителю, где электрическое поле определяется формулой (4) с $\boldsymbol{E}_{\mathrm{out}} = 0$. В этой формуле диэлектрическая проницаемость окружающей среды меняется в диапазоне $4 \le \varepsilon \le 80$: минимальное значение относится к проницаемости сухого белка, максимальное – к проницаемости воды. Для простоты оценок будем пренебрегать пространственной зависимостью диэлектрической проницаемости, положив $\partial\varepsilon/\partial \mathrm{r} = 0$. Тогда подстановка (4) в (19) приводит уравнение (18) к

$$\frac{\partial n_c}{\partial t} = \frac{D_c}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^2\frac{\partial n_c}{\partial r} - \frac{2Zeq_c l_c}{\varepsilon \mathrm{T}}\frac{1}{r} n_c\right], \qquad (22)$$

где величина параметра

$$\beta = \frac{Zeq_c l_c}{\varepsilon \mathrm{T}} \qquad (23)$$

задает условия, когда дипольный дрейф, обусловленный вторым слагаемым в правой части (22), будет превалирующим процессом. Такое состояние реализуется вблизи большого иона, что в свою очередь определяет динамику формирования слоя адсорбированных вирионов и требует отдельного обсуждения. Отметим, что аналогичное уравнение было получено в [19] для описания транспорта вирусов и биомолекул.

В настоящей работе ограничимся анализом стационарного решения уравнения (22), которое реализуется при выполнении соотношения

$$r^2\frac{\partial n_c}{\partial r} - 2\frac{\beta}{r} n_c = 0, \qquad (24)$$

откуда находим:

$$n_c = n_0 exp\left(-\frac{\beta}{r^2}\right), \qquad (25)$$

где n_0 – плотность вирионов в среде при $\mathrm{r} \to \infty$. В противоположном пределе $\mathrm{r} \to 0$ формула (25) дает $n_C \to 0$, что соответствует естественному граничному условию прилипания к поверхности коллоидной частицы.

Как видно из соотношения (25), величина $L\mathrm{D} = \sqrt{\beta}$ играет роль характерного пространственного размера слоя вирусных частиц, удерживаемого большим аэрозолем. С другой стороны, такая особенность предполагает, что характерный размер иона должен удовлетворять условию $a \le \sqrt{\beta}$. Таким образом, полученные соотношения (22) и (25) показывают, что даже в стационарном случае вокруг заряженной частицы может возникнуть слой полярных молекул ненулевой толщины.

5. Заключительные замечания

В настоящей работе обсужден механизм агрегации вирусных частиц крупными ионами с образованием частиц, покрытых слоем адсорбированных вирионов. По сути, такой процесс – разновидность сольватации или гидратации в растворах (см. например [1]). Каждая такая частица может нести достаточное число вирионов (см. рис. 3), чтобы стать переносчиком инфекции для многих заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем. При этом наиболее крупные частицы ($\alpha \ge 0.3$ мкм) способны нести необходимую инфицирующую дозу независимо от вида патогена и распространяться на значительно большие расстояния по сравнению с мелкими частицами [16, 42], то есть даже одна такая частица может переносить инфекционно значимое число вирионов.

Мы рассмотрели физико-химические процессы в атмосфере и дыхательных путях человека, ведущие к зарядке аэрозольных частиц с последующим захватом

окружающих вирусных частиц. Полученные соотношения (4), (7), (12), (15), (21) и (23) указывают на физическую реализуемость обсуждаемого механизма переноса вирионов и задают параметры, требующие экспериментальной проверки [3].

Однако следует отметить грубость приведенных оценок, где форма вирионов считается сферической, но при этом дипольный момент оценивается для линейной молекулы, что указывает на необходимость более полного анализа. Например, при определенных параметрах вирусных частиц и больших ионов будет выполняться соотношение $l_C \ll L_D$. Поэтому возможна ситуация, когда большой ион будет способен удерживать несколько слоев вирионов, а также на ионах могут адсорбироваться и другие полярные молекулы, то есть в результате вокруг большого иона будет формироваться некоторый объемный слой из полярных молекул, насыщенный вирионами.

Кроме того, в настоящих оценках мы проигнорировали техногенное электрическое поле, положив $\boldsymbol{E}_{out} = 0$, причем в общем случае $\boldsymbol{E}_{out}$ – нестационарное поле, имеющее как детерминированную составляющую, так и стохастическую. Все эти вопросы требуют отдельного рассмотрения и экспериментальной проверки. В частности, чтобы связать эмпирические данные по распространению инфекций с теоретическими зависимостями по эпидемиологическим константам скоростей инфицирования [5, 32], полученных в предположении переноса инфицирующей дозы одной аэрозольной частицей, необходим постоянный контроль плотности людей и распределения аэрозолей по размерам (аналог зависимости на рис. 1). Для этого предполагается воспользоваться устройством [12], разработанным для мониторинга параметров воздушной среды в замкнутых помещениях. Такое устройство способно осуществлять непрерывное измерение концентраций мелкодисперсных частиц фракции PM2.5, углекислого газа (CO_2), летучих органических соединений (VOC), а также температуры и влажности, опираясь на комбинацию ионно-электростатических и оптических методов детектирования. Благодаря своей чувствительности к аэрозольным компонентам и газовым маркерам человеческой активности, оно может служить основой для косвенной оценки накопления биоаэрозолей, включая потенциально вируссодержащие комплексы, способные длительно сохраняться во взвешенном состоянии и проникать в глубокие отделы респираторного тракта. Именно такие частицы, согласно нашей модели, представляют наибольшую эпидемиологическую опасность.

В настоящей работе оценка концентрации аэрозолей проводилась в приближении, соответствующем одному человеку. Однако в реальных условиях риск инфицирования определяется не столько индивидуальной экспозицией, сколько общей концентрацией биоаэрозолей в помещении, которая напрямую зависит от числа присутствующих людей. Для перехода от упрощённой «персонализированной» оценки к более реалистичной, учитывающей коллективное выделение аэрозолей в замкнутом объёме, необходимо модернизировать измерительную систему. В частности, целесообразно дополнить устройство [12] модулем учёта количества людей в помещении. Например, на входе в помещение может быть установлен блок из двух последовательно расположенных инфракрасных датчиков, позволяющий по временной последовательности срабатывания надёжно определять направление движения и, следовательно, динамически отслеживать количество присутствующих. Это даст возможность оценить удельную концентрацию мелкодисперсных аэрозолей как косвенного показателя возможного накопления биоаэрозолей, выделяемых находящимися в помещении людьми, и адаптивно корректировать пороговые значения PM2.5 и CO_2 в зависимости от реальной загрузки помещения.

Более того, сопоставление таких данных с концепцией Данбара об устойчивых социальных контактах может стать основой для моделирования перехода от локального накопления вируссодержащих частиц к оценке коллективного эпидемиологического риска [6]. Таким образом, гибридная система, объединяющая датчики качества воздуха и счётчик посетителей, могла бы стать эффективным инструментом для эмпирической проверки предложенной модели и формирования основы для интеллектуальных систем раннего предупреждения о риске передачи респираторных инфекций. Реализация и калибровка подобной расширенной системы будут предметом дальнейших работ.

Сведения о финансировании: Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-00270-26-00).

ЛИТЕРАТУРА

Список русскоязычной литературы

1. Давыдов АС. Биология и квантовая механика. Киев: Наукова думка; 1979.
2. Жуков ВА. Уравнение инфекционности и его использование для прогнозирования восприимчивости хозяина к вирусным инфекциям и в других задачах. В кн.: Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты: сборник научных трудов. Вып. 17. М.: РАЕН; 2007. С. 159-167.
3. Жуков ВА, Сафатов АС, Пьянков ОВ, Топорков ВС, Сергеев АА, Киселев СА, Яшин ВА, Беля-

ев НМ, Рябчикова ЕИ, Жуков АВ, Шишкина ЛН, Медведев АА, Петрищенко ВА, Сергеев АН, Воробьев АА. Новый комплекс для получения и изучения монодисперсных микробиологических аэрозолей в медико-биологических исследованиях. Вестник РАМН. 2004;(3):11-5.
4. Жуков ВА, Шишкина ЛН, Сергеев АА, Фанкин ИВ, Сметанникова МА, Пьянков ОВ, Петрищенко ВА, Сергеев АН, Воробьев АА. Изучение возможности прогнозирования чувствительности к гриппу различных отделов респираторного тракта хозяина. Вестник РАМН. 2007;(5):32-37.
5. Каримов АР, Соломатин МА, Валиуллин РА, Шарафутдинов РФ. Влияние скорости передачи инфекции на формирование эндемического равновесия в расширенной SEIR модели. Вестник Башкирского университета. 2024;29(4):202-12.
6. Каримов АР, Соломатин МА. Влияние социальных контактов на формирование эндемического равновесия в SEIS модели. Вестник НИЯУ МИФИ. 2025;14(3):225-239. doi:10.26583/vestnik.2025.3.5.
7. Кощеев ВА, Полуэктов ПП. Электрическая зарядка аэрозольных частиц под действием внешнего электрического поля в электронейтральной атмосфере. Журн техн физ. 1991;61(8):51-6.
8. Ландау ЛД, Лифшиц ЕМ. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука; 1992.
9. Пискунов ВН. Динамика аэрозолей. М.: Физматлит; 2010.
10. Смирнов БМ. Аэрозоли в газе и плазме. М.: Институт высоких температур; 1990.
11. Смирнов БМ. Электрический цикл в земной атмосфере. Усп физ наук. 2014;184(11):1153-76. doi:10.3367/UFNr.0184.201411a.1153.
12. Соломатин МА, Каримов АР, Малашин МВ, Валиуллин РА, Шарафутдинов РФ. Непрерывный мониторинг мелкодисперсных аэрозолей в техногенных условиях. Вестник Башкирского университета. 2025;30(4):204-15.

Общий список литературы / Reference List

1. Davydov AS. Biologiya i Kvantovaya Mekhanika. Kiev: Naukova Dumka; 1979. (In Russ.)
2. Zhukov VA. [The infectivity equation and its use for predicting host susceptibility to viral infections and in other problems]. In: Netraditsionnye Prirodnye Resursy, Innovatsionnye Tekhnologii i Produkty: Sbornik Nauchnykh Trudov. Issue 17. Moscow: RAEN; 2007. P. 159-67. (In Russ.)
3. Zhukov VA, Safatov AS, P'yankov OV, Toporkov VS, Sergeyev AA, Kiselev SA, Yashin VA, Beliayev NM, Ryabchikova EI, Zhukov AV, Shishkina LN, Medvedev AA, Petrishchenko VA, Sergeyev AN, Vorobyev AA. [A new installation for producing and studying monodisperse microbiological aerosols in biomedical research]. Vestnik Rossiiskoy Akademii Meditsynskikh Nauk. 2004;(3):11-5. (In Russ.)
4. Zhukov VA, Shishkina LN, Sergeyev AA, Fankin IV, Smetannikova MA, P'yankov OV, Petrishchenko VA, Sergeyev AN, Vorob'ev AA. [Study of the possibility of predicting susceptibility to influenza in different parts of the host respiratory tract]. Vestnik Rossiiskoy Akademii Meditsynskikh Nauk. 2007;(5):32-7. (In Russ.)
5. Karimov AR, Solomatin MA, Valiullin RA, Sharafutdinov RF. [Influence of infection transmission rate on the formation of endemic equilibrium in the extended SEIR model]. Vestnik Bashkirskogo Universiteta. 2024;29(4):202-12. (In Russ.)
6. Karimov AR, Solomatin MA. [Influence of social contacts on the formation of endemic equilibrium in the SEIS model]. Vestnik NIYaU MIFI. 2025;14(3):225-239. doi:10.26583/vestnik.2025.3.5. (In Russ.)
7. Koshcheyev VA, Poluektov PP. [Electric charging of aerosol particles under the action of an external electric field in an electroneutral atmosphere]. Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki. 1991;61(8):51-6. (In Russ.)
8. Landau LD, Lifshits EM. Elektrodinamika Sploshnykh Sred. Moscow: Nauka; 1992. (In Russ.)
9. Piskunov VN. Dinamika Aerozoley. Moscow: Fizmatlit; 2010. (In Russ.)
10. Smirnov BM. Aerozoli v Gaze i Plazme. Moscow: Institut Vysokikh Temperatur; 1990. (In Russ.)
11. Smirnov BM. [The electric cycle in the Earth's atmosphere]. Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2014;184(11):1153-76. doi:10.3367/UFNr.0184.201411a.1153. (In Russ.)
12. Solomatin MA, Karimov AR, Malashin MV, Valiullin RA, Sharafutdinov RF. [Continuous monitoring of fine aerosols under technogenic conditions]. Vestnik Bashkirskogo Universiteta. 2025;30(4):204-15. (In Russ.)
13. Agranovski I. Aerosols: Science and Technology. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons; 2011. doi:10.1002/9783527630134.
14. Atanasova KR, Reznikov LR. Strategies for measuring airway mucus and mucins. Respir Res. 2019;20(1):261. doi:10.1186/s12931-019-1239-z.
15. Bourouiba L, Dehandschoewercker E, Bush JWM. Violent expiratory events: On coughing and sneezing. J Fluid Mech. 2014;745:537-63. doi:10.1017/jfm.2014.88.
16. Bourouiba L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: Potential implications for reducing transmission of COVID-19. JAMA. 2020;324(12):1197-98. doi:10.1001/jama.2020.4756.
17. Cabane M, D'Angelo A, Baudin C, et al. Mobility spectra of ions created in gases under atmos-pheric

pressure. J Colloid Interface Sci. 1976;57(2):289-300. doi:10.1016/0021-9797(76)90204-6.
18. Rycroft MJ, Harrison RG, Nicoll KA, Mareev EA. An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity. Space Sci Rev. 2008;137:83-105. doi:10.1007/s11214-008-9368-6.
19. Chen Y-T, Lu C-L, Lu S-J, et al. Electrostatic precipitator design optimization for the removal of aerosol and airborne viruses. Sustainability. 2023;15(11):8432. doi:10.3390/su15108432.
20. Chin AWH, Chu JTS, Perera MRA, et al. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. Lancet Microbe. 2020;1(1):e10. doi:10.1016/S2666-5247(20)30003-3.
21. Clegg SL, Brimblecombe P. The kinetics of ion clustering and charge transfer in atmospheric aerosols. Atmos Environ. 2001;35(3):475-85. doi:10.1016/S1352-2310(00)00290-6.
22. Fahy JV, Dickey BF. Airway mucus function and dysfunction. N Engl J Med. 2010;363(23):2233-2247. doi:10.1056/NEJMra0910061.
23. Lushnikov, A.A. Introduction to aerosols. In: Agranovski I, ed. Aerosols: Science and Technology. Weinheim: Wiley-VCH; 2010 P. 1–41. doi:10.1002/9783527630134.ch1.
24. Garmann RF, Comas-Garcia M, Knobler CM, et al. Physical principles in the self-assembly of a simple spherical virus. Acc Chem Res. 2016;49(1):48-55. doi:10.1021/acs.accounts.5b00350.
25. Haas CN. Conditional dose-response relationships for microorganisms: development and application. Risk Anal. 2002;22(3):455-63. doi:10.1111/0272-4332.00035. doi:10.1111/0272-4332.00035.
26. Harrison RG, Carslaw KS. Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere. Rev Geophys. 2003;41(4):1012. doi:10.1029/2002RG000114.
27. Harrison RG, Nicoll KA. Atmospheric electricity: The global circuit and its role in cloud micro-physics. Rev Geophys. 2019;57(4):1123-67.
28. Heyder J, Gebhart J, Rudolf G, et al. Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005-15 μm. J Aerosol Sci. 1986;17(6):811-25. doi:10.1016/0021-8502(86)90035-2.
29. Hocking GC, Drazin PG. Kelvin-Helmholtz instability in a thin film flowing over a solid surface. J Fluid Mech. 1987;177:251-68.
30. Ivlev LS. Atmospheric aerosols. In: Agranovski I, ed. Aerosols: Science and Technology. Wein-heim: Wiley-VCH; 2010. p. 345-380.
31. Joris L, Dab I, Quinton PM. Elemental composition of human airway surface fluid in healthy and diseased airways. Am Rev Respir Dis. 1993;148(6):1633-7. doi:10.1164/ajrccm/148.6_Pt_1.1633.
32. Karimov AR, Solomatin MA, Bocharov AN. Influence of transfer epidemiological processes on the formation of endemic equilibria in the extended SEIS model. Mathematics. 2024;12:3585. doi:10.3390/math12223585.
33. Lee PC. Dose-Response and Viral Kinetics Analysis of SARS-CoV-1 in Non-Human Primates. PhD Theses. Los Angeles: University of California; 2023.
34. Li X, Lester D, Rosengarten G, Aboltins C, Patel M, Cole I. A spatiotemporally resolved infection risk model for airborne transmission of COVID-19 variants in indoor spaces. Sci Total Environ. 2022;812:152592. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152592.
35. Lowen AC, Mubareka S, Steel J, Palese P. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. PLoS Pathol. 2007;3(10):e151. doi:10.1371/journal.ppat.0030151.
36. Mohnen VA. Formation, nature and mobility of ions of atmospheric importance. In: Steinkopff D, ed. Electrical Processes in Atmospheres. Darmstadt: Steinkopff Verlag; 1977. P. 1-17.
37. Osserman R. The isoperimetric inequality. Bull Am Math Soc. 1978;84(6):1182-238. doi:10.1090/S0002-9904-1978-14553-4.
38. Papineni RS, Rosenthal FS. The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. J Aerosol Med. 1997;10(2):105-16. doi:10.1089/jam.1997.10.105.
39. Rycroft MJ, Israelsson S, Price C. The global atmospheric electrical circuit, solar activity and climate change. Surv Geophys. 2000;21(1):41-54. doi:10.1016/S1364-6826(00)00112-7.
40. Williams OW, Hoegh P, Sjöberg B, et al. Airway mucus: from production to secretion. Am J Respir Cell Mol Biol. 2006;34(5):527-36. doi:10.1165/rcmb.2005-0436SF.
41. Winkler H, Schmid H, Zdansky K, et al. Mobility and diffusion coefficients of small atmospheric ions. J Aerosol Sci. 1987;18(3):295-304.
42. Yang W, Elankumaran S, Marr LC. Concentrations and size distributions of airborne influenza A viruses measured indoors at a health centre, a day-care centre and on aeroplanes. J R Soc Interface. 2011;8(61):1176-84. doi:10.1098/rsif.2010.0686.

УДК 631.95 || EDN: XXHXQG
CC BY-NC 4.0
© А.А. Чибилев и соавт.; ФНИ «XXI век»

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ПОДХОДОВ К НОВОМУ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВУ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ

А.А. Чибилев, С.В. Левыкин, Ю.А. Гулянов, Г.В. Казачков, Н.С. Краснокутская, Ю.А. Падалко

[1]Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, г. Оренбург, Россия;
Эл. почта:orensteppe@mail.ru

В рамках проекта Российского научного фонда авторский коллектив предпринял попытку разработать принципиальные подходы к инновационному землеустройству и обоснованию экологической оптимизации ландшафтов степной зоны Европейской России в условиях современных климатических и антропогенных изменений. В условиях постцелинной трансформации степного природопользования возникла необходимость пересмотра оптимальной структуры сельхозугодий, выделения элитного земельного фонда, развития природоподобных технологий лесных и водных мелиораций, модернизации сети особо охраняемых природных территорий, создания природоохранных туристских зон. В качестве критериев нового землеустройства выбраны рентабельность растениеводства, степень сохранности ландшафтно-биологического разнообразия и историко-культурного наследия. Разработана примерная матрица распределения видов землепользования по категориям оптимизированной структуры земельного фонда. Особое внимание уделено анализу геоэкологических проблем постцелинных муниципальных образований степной зоны, отличительными особенностями которых являются резкое сокращение посевных площадей, значительная убыль населения, появление возможностей расширения особо охраняемых природных территорий. Предложенные подходы целесообразно использовать при разработке схем районного планирования муниципальных образований степных регионов степной и лесостепной зон РФ.

Ключевые слова: *степные ландшафты, биологическое разнообразие, постцелинное пространство, рентабельность полеводства, элитный земельный фонд, лесные и водные мелиорации, ООПТ.*

FUNDAMENTAL APPROACHES TO NEW LAND MANAGEMENT AND TO DEVELOPING OF PROJECTS FOR ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION OF STEPPE LANDSCAPES

A.A. Chibilev, S.V. Levykin, Yu.A. Gulyanov, G.V. Kazachkov, N.S. Krasnokutskaya, Yu.A. Padalko

[1]Institute of the Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia;
Email: orensteppe@mail.ru

Within the framework of a project of the Russian Scientific Foundation, the authors attempted to develop principles of approaches to innovative land management and to substantiate the ecological optimization of the landscapes of the steppe zone of European Russia in the context of modern climatic and anthropogenic changes. The principles suggested were applied to several municipal entities of the Russian Federation located within a range from the Tobol basin to the Don basin. In the context of the post-virgin transformation of steppe nature management, it has become necessary to revise the optimal structure of farmland, to allocate an elite land fund, to develop nature-like forest and water melioration technologies, to modernize the network of protected natural areas, and to establish nature-protected tourist zones. The criteria selected for new land management are crop profitability, conservation of landscape biological diversity and historical cultural heritage. An exemplary matrix of land use distribution by categories of optimized structure of land fund is suggests. Special attention is paid to the analysis of geoenvironmental problems at the sites that may be referred to as post-virgin municipal formations of the steppe zone, their distinctive features being a drastic reduction in acreage, significant population loss, and new opportunities to expand protected areas The proposed approaches may be useful in developing of local planning schemes for municipal entities of the steppe regions of steppe and forest-protected areas in Russia.

Keywords: *steppe landscapes, biological diversity, post-virgin lands, field management profitability, elite land fund, gorest and water amelioration, protected areas*

Введение

Степные ландшафты европейской части Евразии к концу XX века признавались практически утраченными. Вероятно поэтому на их восстановление и охрану выделялась незначительная часть глобальных природоохранных инвестиций, в том числе выделяемых в СССР. Однако по исследованиям Института степи УрО РАН, результаты которых подтверждены рядом экспертов, потенциал самовосстановления степей в постцелинный период оказался более высоким, чем признавалось. Существующий потенциал должен быть использован, включая проекты сохранения и восстановления степей, мотивированные сохранением и реставрацией природных ландшафтов.

В последнее десятилетие международное природоохранное движение обращает особое внимание на решение проблем устойчивого развития засушливых регионов планеты, прежде всего степных. Существует Конвенция ООН по борьбе с опустыниванием (КБО ООН), действует «Боннский вызов» – инициатива Международного союза охраны природы по глобальному восстановлению деградированных земель (Бонн, 02.09.2011), продолжается Десятилетие ООН по восстановлению экосистем (2021–2030), объявленное резолюцией Генеральной Ассамблеи 73/284 от 01.03.2019 г. В России действует Национальный комитет Десятилетия ООН по восстановлению экосистем под эгидой Общественной палаты РФ. В программу комитета внесены предложения Союза сельских лесоводов и предложения научного сообщества. Вместе с тем все предлагаемые концепции сохранения и восстановления природной среды далеки от практики и не реализуются на уровне муниципальных образований, например, районов, округов, субъектов РФ. В связи с этим возникла необходимость научной поддержки природоохранных инициатив в земледельческих регионах и поиске институциональных возможностей сохранения пространства для защиты и восстановления степного биома в ландшафтах будущего.

Представленная статья подготовлена по проекту РНФ «Разработка технологических схем экологической оптимизации ландшафтов степной зоны (принципиальные подходы и на примере модельных регионов)», целью которого по существу дела является развитие научных основ территориального планирования степных регионов на примере модельных и наиболее проблемных постцелинных районов. По мере распашки залежных земель, вторичных степей, да и последних участков целины эти районы и вместе с ними постцелинное пространство в целом, постепенно переходят в агроэкспортное пространство. При этом в отдельных районах еще сохраняются последние массивы вторичных степей, которые на основе новых фундаментальных подходов и корректировки проектов территориального планирования могут быть отведены под расширение степных особо охраняемых природных территорий (ООПТ), кормовые угодья, углеродные плантации и полигоны.

Реализация проекта основана на *комплексном подходе* к оптимизации степного природопользования, рассматривающем в единстве агроландшафт (структуру угодий), ресурсосберегающие и почвосберегающие природоподобные технологии степного земледелия и землепользования (агрономический аспект степеведения), лесные насаждения и лесомелиоративные комплексы, водную компоненту, систему ООПТ и степной туризм, охотничье хозяйство и т. д. В качестве механизма реализации новационного территориального планирования степных районов обосновывается идея формирования нового степного землеустройства и соответствующих структур, так как сейчас не разработана не только государственная земельная политика, особенно в сфере степного землепользования, но и отсутствует ранее существовавший государственный земельный орган с системой землеустроительных институтов [20].

Необходимо отметить, что существующие природоохранные программы и проекты в степной зоне очень сложно если не невозможно реализовать одновременно с Государственной программой эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации (утверждена Постановлением Правительства РФ от 14.05.2021 № 731), известной как Целина-2. Представленная статья направлена на организацию научного сопровождения и корректировку современной целинной кампании в плане более равномерного распределения вовлекаемых в пашню земель по всей стране вместо концентрации проекта в степной зоне. Последствия принципиального увеличения распашки степной зоны РФ, а в некоторых степных районах и регионах таковая уже превысила позднесоветский максимум, уже сказываются на водности крупных рек России, таких как Дон, Волга и др., повышается эмиссия углерода [19], ускоряется водная эрозия, приводящая к большим потерям почвенного гумуса. В статье излагаются некоторые подходы Института степи УрО РАН по поискам компромисса в современном степном природопользовании и содействию эффективности землепользования, включая проект «Целина-2».

В поисках компромисса и новой аргументации касательно восстановления степных экосистем следует обратить внимание на большие возможности экономии ресурсов и пространства, связанные с оптимизацией всей цепочки производства и потребления продовольствия, в частности, с развитием культуры потребления и разработкой эффективных аграрных технологий.

На основе российского опыта оптимизации степных агроландшафтов в Институте степи УрО РАН в самом начальном периоде его создания [22] разработан подход к экологической оптимизации структуры земельного фонда для степной зоны Евразии. Этот подход был развит авторами предложением рассматривать доисторические степи в качестве наиболее приемлемой степной экосистемы (или совокупности экосистем) или прототипа для сохранения ландшафтного и биологического разнообразия степной зоны в постцелинный период и для разработки современных природоподобных технологий в степном природопользовании [9].

Такой «оренбургский» подход сочетает конвергентную адаптивно-ландшафтную стратегию рационального степного землепользования [11] и принципиальную схему оптимизации структуры земельного фонда, реализующую принцип тройственной сути понятия пахотопригодности. Основным критерием в этой схеме является доля оптимальной пашни в соотношении с другими угодьями, о чем писали основатели российской агрономической науки в XVIII в. и наиболее четко заявил в конце XIX в. В.В. Докучаев.

Для объяснения оренбургского подхода и его практической реализации предлагается использовать такие понятия, как *нормы степного землепользования*, *оптимизация и сопутствующие ей мероприятия* (сооптимизация), *пищевой кластер*, *оптимальная структура земельного фонда*. По нашим представлениям, практическая реализация данного подхода позволит сохранить и восстановить степные ландшафты как необходимое условие устойчивого развития регионов, входящих в степной пояс Евразии, представленный субъектами РФ от Причерноморья до Забайкалья. Предлагаемый подход к экологической оптимизации степных ландшафтов позволит смягчить ожидаемые уже в XXI веке, возможно негативные, климатические и антропогенные изменения в степной Евразии

Настоящее и будущее в свете истории

Исследование выполнено на основе трансконтинентальных экспедиционных исследований и обобщения исторического опыта степного природопользования. Применялись методы картографического сравнительного геоэкологического анализа территорий. Использован опыт Института степи УрО РАН в разработке схем экологической оптимизации ландшафтов и территориального планирования ключевых районов степной зоны Оренбургской области и сопредельных регионов.

Оценивая реакцию степных экосистем на длительную земледельческую передышку, учитывая тенденции развития мирового агропромышленного комплекса (АПК), современную динамику экспорта продовольствия, масштабы потерь продуктов питания и пищевого сырья, возможности технологического роста АПК и потенциал новационных технологий производства продуктов питания, а также климатические изменения, выделяем следующие ***эколого-экономические условия оптимизации степного природопользования***:

1. Сохранение и восстановление степных экосистем на сельхозугодьях с переходом на устойчивое развитие степных регионов возможно при сокращении потерь продуктов питания и пищевого сырья (составляют не менее трети производимого), дальнейшем развитии технологий и повышении продуктивности земледелия до биоклиматического потенциала.
2. Агротехнологии XXI века, связанные с современной химизацией полеводства, необходимо изолировать от территорий, обеспечивающих сохранение титульной степной биоты на малопродуктивных землях сельхозназначения, а также земель природно-заповедного фонда.
3. С учетом свойственных XXI веку резких и быстрых изменений условий ведения сельского хозяйства (как природных, так и экономических) целесообразно перейти к сокращению пашни в степной зоне в пользу стабилизирующих элементов ландшафта, прежде всего травяных.
4. Необходимо преодолеть экстенсивную экспортную ориентацию степного растениеводства юга европейской России, которая не только способствует обмелению наших рек, но и приводит к экологической деградации аридных и семиаридных ландшафтов.
5. Ограничение распашки малопродуктивных угодий позволит преодолеть тенденцию так называемого опустынивания южных регионов России, которое происходит не столько из-за климатических изменений, сколько из-за антропогенного воздействия.

В глобальном масштабе, а сегодня агробизнес охватил практически всю Планету, оптимизация степных агроландшафтов возможна скорее на основе агрономических идей XVIII века, чем путем постоянного поиска оптимального соотношения угодий. Это наглядно показывает анализ современных изменений климата, динамики спроса и цен на основные коммерческие культуры, энергоносители, технологии и тому подобные значимые для сельского хозяйства позиции. Алгоритм эволюции изменений подходов к степному неистощительному землепользованию можно выразить в виде следующих шагов:

1) рост продуктивности за счет новационных технологий;

2) оптимизация всей цепи производства, хранения, транспортировки и потребления основных видов сельхозпродукции (имеющиеся возможности рассмотрены ниже в подпункте «Резервы сокращения посевных площадей»);
3) переход от представлений о степи как «огороде», к отношению к ней как к вмещающему «родительскому» ландшафту по [30].

Развитие данного подхода можно обосновать следующим историческим анализом изменений понимания рационального степного природопользования за последнее 250 лет.

История вопроса

Россия является пионером земледельческого освоения открытых степных пространств Северного полушария. Со второй половины XVIII века началась масштабная распашка целинных земель в разнотравно-злаковых и луговых степях европейской части России. Известные мыслители и энциклопедисты, практики землепользования того времени обратили внимание на стремительный рост пашни, опережающий возможности качественной обработки осваиваемых земель. Уже во второй половине XVIII века один из первых агрономов России А.Т. Болотов утверждал, что соблюдение должной пропорции между площадями под скотоводством и земледелием должно быть главным предметом внимания сельского хозяйства. Выдающийся полководец и землевладелец А.В. Суворов в наказе крестьянам писал: «Обилие полей приводит к лености, следствием которой станет бедность; а значит нужно разводить скот, навозом удобрять поля, пахать столько земли, на сколько хватит удобрения, остальную землю – под луга и пастбища – будет корм скоту» (цит. по [17]). **Так впервые был сформулирован принцип определения оптимального соотношения пашни и кормовых угодий, обоснованного возможностями качественной обработки и удобрения осваиваемой пашни** (Табл. 1). Этот основополагающий принцип лучше всего выразил отечественный агроном конца XVIII века И. М. Комов своим афоризмом: *«лучше с мала получить много, чем с много мало»* (цит. по [7]).

Передовые идеи землепользователей XVIII в. не получили достойного развития в XIX столетии, когда освоение новых земель в степных регионах юга Европейской России приобрело огромные масштабы. Результат известен: наступил первый агроэкологический кризис степей, сопровождавшийся серией засух, случаев эрозии почв и голода 1880-х и начала 1890-х годов. Справедливости ради необходимо отметить, что причины резкой аридизации степной зоны в конце XIX века не установлены со всей определенностью, скорее всего реализовался комплекс факторов, но значимость каждого из них сейчас сложно установить.

Совместными усилиями правительства, науки и общественных деятелей в процессе ответа на вызов голода зародилась научная школа оптимизации степного природопользования В.В. Докучаева, которая получила широкое развитие в СССР. **Идеи В.В. Докучаева близки к идеям классиков агрономии, но его труды не имеют фундаментальной опоры на них** и представляются не столько их развитием, сколько независимой новацией в виде идеи поиска оптималь-

Табл. 1.

Три исторических подхода к пониманию оптимальной структуры сельхозугодий в степной зоне

	1	2	3
Подходы	Ограничение пашни «разумными потребностями» (возможности сбыта и собственного потребления). Неистощительное землепользование, развиваемое основателями российской агрономической науки (П.И. Рычков, А.Т. Болотов, И.М. Комов).	Оптимальное соотношение видов угодий. (В.В. Докучаев)	Экстенсивное освоение земель. Целинное движение.
Сущность	1. Агротехнологии, направленные на реализацию биоклиматического потенциала. 2. Сокращение потерь в пищевом кластере.	Попытки найти оптимум: травопольная система, метод ПЭИ и его модернизации, энергетический подход и другие работы в системе РАСХН на рубеже XX и XXI веков	Растущая пашня – ведущий фактор трансформации степей, превративший степную зону в полеводческую
Перспективы	**ТРЕБУЕТ РАЗВИТИЯ**	**ПРИМЕНИМ** в пределах конкретных ландшафтных районов и типов местности	**РЕАЛИЗОВАН И ИСЧЕРПАН** во 2-й половине XX века.

ных параметров степного природопользования, соотношений поля, луга, воды и леса [4] (Табл. 1). При этом нахождение конкретных числовых значений В.В. Докучаев признавал делом будущего, а нам они представляются **землеустроительным аналогом классического «золотого сечения»**. Для степной зоны его пытались найти целые поколения исследователей от В.Р. Вильямса с его «агрофизикой» и травопольной системой земледелия [2] до авторов метода почвенно-экологического индекса (ПЭИ) и его вариантов [3, 10, 26].

Ближе всего к числовым значениям «золотого сечения» для степных агроландшафтов подошел Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАН путем разработки оригинального почвенно-экологического индекса (ПЭИ), математически сопоставляющего основные факторы почвообразования по В.В. Докучаеву, позволяющего формально оценить качество почв и разграничить угодья по потенциальному плодородию [26]. В конце XX века идея оптимального соотношения сельхозугодий стала актуальной и наиболее востребованной теорией, хотя на практике она не приобрела широкого распространения [25].

Идеи В.В. Докучаева развивались целым рядом научных учреждений сельскохозяйственного профиля, детально прорабатывавшим проблему оптимизации агроландшафтов и адаптивно-ландшафтных систем земледелия [12] и формировавшейся Оренбургской школой степеведения [22]. Отдельно отметим оригинальную методику определения оптимального соотношения земельных угодий для лесостепной подзоны, принимающую за оптимум равенство энергетических потенциалов дестабилизирующих (пашня) и стабилизирующих видов угодий (лес, луг) [3]. Эта методика весьма сложна и, на наш взгляд, не бесспорна, но позволяла обосновывать конкретные цифровые значения соотношения пашни и леса для отдельно взятой местности в лесостепной зоне. К сожалению, в XXI веке эта методика не получила дальнейшего развития.

В Институте степи УрО РАН были предприняты попытки найти оптимальное решение проблемы гармоничного соотношения сельхозугодий. Для этого принцип ПЭИ был апробирован на модельном хозяйстве, где баллы плодородия были монетизированы, и определена грань пахотопригодности при технологиях начала XXI века [6]. Впоследствии ПЭИ был модернизирован из мультипликативного в конъюнктивно-мультипликативный индекс – БПЗ (базовый показатель потенциала пахотных земель) [10].

Весь 250-летний период развития фундаментальных идей оптимизации структуры земельного фонда протекал на фоне антагонизма со своего рода «целинным движением», апогеем которого стала советская целинная кампания 1950-х [24]. При ее реализации расширяющаяся пашня и покрытие ею всей пахотопригодной площади принималось за оптимальное землепользование, причем пределы пахотопригодности расширялись, а изменение вида пользования, то есть исключение угодий и категории «пашня» затруднено по сей день (Табл. 1). Именно целинное движение, причем по всей Голарктике, привело к глубокому кризису титульной биоты грассландов Северного Полушария [1, 21, 23-25, 27].

Таким образом, на протяжении 250 лет передовая **отечественная агрономия и фундаментальная наука,** включая ландшафтоведение и степеведение, выступали за ограничение распашки степной зоны с расширением стабилизирующих элементов ландшафта (целина, залежь, многолетние травы, лес, воды), а на практике **пашня постоянно расширялась** за счет травяных экосистем и естественных лесов. На определенном этапе после докучаевских опытов стало развиваться полезащитное лесоразведение. Но оставался не решенным вопрос об оптимизации соотношения типов сельхозугодий. При этом следует признать, что такой «рецепт» не существует, поскольку природа степей столь разнообразна, что рекомендации могут быть даны только к конкретному физико-географическому району с учетом типов местности.

Резервы сокращения посевных площадей

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций, треть ежегодно производимого продовольствия, это 1,3 миллиарда тонн, теряется либо уходит в отходы. Только четверти этих потерь хватило бы на обеспечение 0,87 млрд человек. Согласно зарубежным источникам, потери и отходы составляют порядка 30% зерновых, до 50% корнеплодов, фруктов и овощей, 20% семян масличных культур, 20% мясных и молочных продуктов, 35% рыбы [29]. При этом потерянное пищевое сырье и отходы ежегодно выделяют 3,3 млрд тонн парниковых газов [31].

Земельный фонд степной зоны Евразии в основном сфокусирован на производстве коммерческих зерновых и масличных культур, в том числе экспортируемых. Соответственно, степи России глубоко интегрированы в мировой агробизнес (валовые сборы зерновых в последние годы держатся на уровне 130–150 млн т., экспорт составляет около 60 млн т.). Можно сделать вывод, что не менее 30% степной пашни «работает на свалку». Сокращение даже одной десятой посевных площадей позволило бы наконец-то создать необходимую территориальную базу для создания полноценной непрерывной сети ООПТ для восстановления и сохранения ландшафтного и биологического разнообразия степей.

На данном этапе развития современной цивилизации сохранение и экологическая оптимизация степ-

ных ландшафтов возможна только при сокращении потерь и отходов во всей продовольственной цепочке от АПК до конечного потребителя: 1) производство, 2) доработка и хранение, 3) транспортировка, 4) переработка, 5) розничная торговля, 6) конечные потребители, 7) резервирование (госрезервы). Эту цепочку обозначаем как **пищевой кластер**: совокупность разнородных, пространственно разобщенных систем и подсистем, функционально объединенных производством, движением и потреблением пищевой продукции в единое целое. Потери возникают во всех составляющих кластера. В странах со средним и высоким уровнем доходов свыше 40% отходов и потерь приходятся на розничную торговлю и потребителей (просроченный товар, потеря товарного вида). В развивающихся странах, особенно в Африке, основная масса потерь производимого и импортируемого продовольствия возникает вследствие отсутствия качественных средств хранения и охлаждения [29]. Усилия по сокращению потерь должны учитывать как единство кластера, так и специфику каждой его составляющей: от поля до домохозяйства, от развитых стран до развивающихся.

Не менее значимым резервом, позволяющим сократить пашню (начиная от наиболее рискованной богары) без ущерба глобальной продовольственной безопасности, является рост урожайности до биопотенциальной в целом ряде стран-производителей сельхозпродукции, в том числе в России. На огромные возможности такого роста указывал еще Д.Н. Прянишников, выступая за оптимальное пространственное распределение полеводческой нагрузки между природными зонами, за развитие земледелия в историческом центре России [16]. В мире 16 важнейших коммерческих культур занимают порядка 1,5 млрд га и дают 3,2 млрд т. продукции, то есть в среднем порядка 2 т/га [5]. Впервые в истории Россия не только вышла на среднемировой уровень, но и превысила его (2–2,5 т/га), тем не менее сохраняется потенциал роста в 1,5–2 раза. При сохранении существующей посевной площади повышение урожайности до биоклиматического потенциала неизбежно приведет к невостребованным валовым сборам. В связи с этим очевидна возможность сокращения посевных площадей и выхода на компромисс хозяйства и биосферы: стабилизация населения Земли, выход земледелия на уровень биопотенциальной урожайности, сокращение пашни за счет малопродуктивных земель и восстановление площади экосистем и природного разнообразия, необходимых для устойчивого экологического развития всего земледельческого пояса, в данном случае в Северной Евразии.

С учетом роста валовых сборов коммерческих культур в России при сокращении посевных площадей могут появиться высвобождающиеся земельные ресурсы. Это малопродуктивная пашня, расположенная в основном в подзоне каштановых почв, которая только в отдельные годы может оправдать вложения в интенсивные технологии. Основные землепользователи на этих землях продолжают вести так называемое ресурсосберегающее земледелие, минимизируя производственные затраты вплоть до принципа «посеял-убрал». На первый взгляд, эти примитивные технологии напоминают органическое земледелие отсутствием химизации. Но из-за малой продуктивности (менее 0,8 т/га) эти угодья являются потребителями степного пространства, приносящими меньше экономического эффекта и экосистемных услуг, чем бывшие травяные экосистемы на их месте [8]. Сравнивая социальный аспект такого степного землепользования (занятость, освоенность и каркасность пространства) и комплексное значение степных экосистем (противоэрозионное, кормовое, природоохранное), возможное на его месте, добавим, что в XXI в. не менее важен этический и нравственный подход к решению проблем землепользования – отношение к степи как к вмещающему ландшафту. Развитие современной цивилизации в значительной степени обязано открытым травяным ландшафтам, включая степи Северного полушария.

Обозначенные выше резервы сокращения потерь в пищевом кластере и повышения производственной урожайности позволяют вновь ставить вопрос о целенаправленном сокращении пашни благодаря консервации малопродуктивных земель. Для решения данной проблемы предлагается новационный подход к оптимизации структуры земельного фонда степной зоны, который может быть положен в основу природосберегающих технологий землепользования. Данный подход можно сформулировать как конвергентную адаптивно-ландшафтную стратегию рационального степного землепользования.

Стратегия рационального степного землепользования.

Земельный фонд оптимизируемой территории (например, степных регионов России) состоит из доминирующих междуречных (плакорных) и террасовых земель (пахотопригодные и условно пахотопригодные земли), внутризональных (литогенных) разновидностей степей (преимущественно малопродуктивные и непахотопригодные) и угодий, не подлежащих распашке (солонцы, пески, поймы, озера, леса и пр.). На основе проведенной дифференциации можно выделить шесть основных ландшафтных категорий, две из которых представляют собой противоположные полюса: ***природоохранный*** (существующие и потенциальные ООПТ, занимающие по регионам от 5 до 15% территории), и ***земледельческий*** (элитный земельный фонд). В промежуточном положении находятся четы-

ре категории: 1) зональные степи на малопродуктивных почвах за пределами плакоров (земли гибкого использования), 2) внутризональные разновидности степей (кормовые угодья), 3) интразональные ландшафты (кормовые угодья), 4) азональные и экстразональные ландшафты (стабилизирующие территории).

Для реализации данной стратегии рационального степного землепользования предложены институциональные основы оптимизации степного землепользования, в том числе в виде ее норм [28].

Нормы степного землепользования

Они должны определяться количественными и качественными показателями, которым пашня должна соответствовать, и не расширяться за их пределы. В современных условиях для разработки таких норм предлагается тройственная концепция пахотопригодности, которая опирается на физические свойства, климатические показатели и экономическую целесообразность. Основой является физическая пахотопригодность (по почвенным и геоморфологическим показателям). Физически пахотопригодные угодья оцениваются по климатическим показателям. Угодья, пахотопригодные в физическом и климатическом отношениях, должны сохраниться в составе пахотных и пройти экономическую оценку. На основании анализа перечисленных показателей выделяется элитный пахотный фонд, в пределах которого рентабельность поддерживается за счет естественного плодородия и запасов гумуса. Нередко экономическая пахотопригодность возникает при благоприятных рыночных условиях, когда подобные земли могут подлежать так называемому «гибкому использованию» в системе агроландшафтных оборотов.

На основании многолетнего опыта земледельцев степных регионов, элитные пахотопригодные земельные участки должны отвечать следующим условиям: 1) выровненный обширный компактный массив в пределах надпойменных террас, придолинных или водораздельных плакоров; 2) уклон до 5 градусов; 3) однородные контуры зональных полнопрофильных почв с долей солонцов не более 10%; 4) содержание гумуса не менее 3%; 5) мощность продуктивного почвенного слоя не менее 40 см.; 6) запасы гумуса не менее 100 т/га. Участок, не удовлетворяющий хотя бы одному из этих условий, должен остаться сельхозугодьем, но не должен распахиваться, особенно под пропашные культуры.

На климатической пахотопригодности не следует заострять внимание, потому что современный климат степной и лесостепной зон России пригоден для высокопродуктивного земледелия. Важнее учитывать биоклиматический потенциал земельных угодий.

Экономическая пахотопригодность – это способность физически и климатически пахотопригодного участка поддерживать рентабельность полеводства в современных экономических условиях. Эта способность является не природным свойством участка, а определяется такими экономическими показателями, как закупочная цена и погектарные затраты, которые зависят от спроса и предложения и подвержены значительным колебаниям. Экономическую пахотопригодность можно, например, рассчитать при помощи уравнения зависимости рентабельности (понимаемой как отношение дохода к затратам) от урожайности, закупочной цены и погектарных затрат. Приемлемая рентабельность при данной урожайности и данных экономических условиях и есть экономическая пахотопригодность. Ниже приводим уравнение рентабельности для модельных случаев продажи одного вида продукции по одной закупочной цене без учета дотаций и иных поддерживающих полеводство выплат:

$$R = \frac{Y \cdot C}{E}$$

где:

R – рентабельность (отношение дохода к затратам),

Y – урожайность по товарной продукции (т/га),

C – закупочная цена на товарную продукцию (руб/т),

E– погектарные затраты (руб/га).

Предлагаемая тройственная пахотопригодность может применяться и как методический подход по определению потенциальной продуктивности земель, и как фундаментальная основа агроэкологической экспертизы, например для финансовых учреждений, и как средство определения диапазона параметров оптимальной структуры земельного фонда, в зависимости от колебаний экономических и климатических условий.

Ограничение распашки дает возможность расширения важнейших эколого-стабилизирующих элементов ландшафта, высшей формой которого является ООПТ.

Особое значение для экологической оптимизации степного землепользования имеет формирование лесомелиоративного каркаса, который представляет собой гармоничную совокупность естественных и искусственных лесонасаждений [13]. При этом нормирование лесистости может быть рекомендовано только для элитного пахотного фонда, где при обязательном систематическом уходе за полезащитным лесным каркасом она может достигать 4%. Важнейшими условиями формирования лесомелиоративного каркаса степных регионов являются, во-первых, восстановление лесов в пределах их исторических ареалов и, во-вторых, использование географически местных древесных пород с исключение задействования таких экологически агрессивных видов, как клен ясенелистный [28].

Устойчивое экономическое развитие степных регионов невозможно без создания непрерывной сети ООПТ. При этом доля этих территорий в общем ба-

лансе земельных угодий не может строго нормироваться, потому что она зависит от ландшафтных особенностей регионов. Но очень важно, чтобы в составе ООПТ были репрезентативно представлены экосистемы зональных целинных степных плакоров, которые в среднем занимали бы до 50–60% зоны и должны сохранить такую же долю хотя бы от площади современных ООПТ степной зоны [28].

В настоящее время институционализировался несколько иной подход с приоритетом охраны интразональных элементов, мотивированный, с одной стороны, якобы монотонностью и невыразительностью выровненных травяных пространств, с другой стороны – их практически полной распаханностью. Эта проблема может быть решена в Европейской части России путем реставрации степных фитоценозов технологиями агростепей на постцелинном пространстве путем моратория на распашку вторичных степей и внедрения новационных форм территориальной охраны, не исключающих сельскохозяйственное использование. Основные сообщества степей, в первую очередь титульные биологические виды, должны сохраняться на оптимальном уровне на землях сельхозназначения в системе компенсационного агроландшафтного оборота [15].

Степной экологический оптимум

Развивая представления об эталонах степей, необходимо учитывать, что основным критерием для их существования является восстановленная полночленность экосистемы на площади, достаточной для устойчивого существования популяций титульных степных видов. На основе изучения процессов самовосстановления степных экосистем можно сделать вывод, что оптимумом сосуществования человека и степи, причем достижимым, является управляемая природно-антропогенная система, суть которой в высокой биопродуктивности как земледелия, так и степных природных и полуприродных экосистем. Основу должны составить популяции и сообщества титульных степных биологических видов, районированных, адаптированных культурных растений и пород сельскохозяйственных животных. Их сосуществование должно управляться при помощи природоподобных технологий и быть нацелено на поддержание наивысшей продуктивности. Таким образом, наше представление о степном оптимуме опирается на два основных подхода, географический и биологический [14], и приводит к пониманию степи как гармоничному сочетанию природных и культурных ландшафтов.

Табл. 2.

Примерная матрица распределения видов землепользования по основным категориям оптимизированной структуры земельного фонда

Деятельность	Структурная часть земельного фонда		
	Элитный пахотный фонд	***Земли гибкого использования***	***Непахотопригодные земли***
Полеводство	Развитие интенсивных технологий, при господдержке	Могут использоваться при благоприятной рыночной ситуации и в системе агроландшафтного оборота	Распашка и мелиорация запрещены, возможно огородничество и садоводство
Пастбищное животноводство	Только по отаве, включая зимний выпас по стерне	Необходимо развивать при благоприятной рыночной конъюнктуре в системе агроландшафтного оборота	Приоритет развития пастбищного животноводства при наличии рынка сбыта, не допуская ущерб биоразнообразию
Лесоразведение	Только полезащитное на условиях регулярного ухода	Сохранение объектов лесокультурного наследия и создание новых лесомелиоративных объектов	Сохранение и восстановление лесных урочищ в пределах восстановленного ареала
Водные мелиорации	Только для орошаемого земледелия	Только для пастбищного животноводства	Для рыборазведения и водных охотничьих угодий
Охота	Ограниченно, на стерне, на неубранных полях и в зимнее время	Временные охотничьи угодья и воспроизводственные участки	Создание охотхозяйств, воспроизводственных участков и регулирование численности охотничьих животных
Туризм	Агротуризм с созданием инфраструктуры на базе сельхозпредприятий	Агротуризм	Познавательный и экологический туризм, за исключением заповедных зон ООПТ

Экологическая оптимизация степных ландшафтов.

Изложенное выше представление о нормах и оптимуме сосуществования человека и степи позволяет предложить принцип организации структуры земельного фонда, прежде всего земель сельхозназначения, который должен предусматривать выделение ***элитного пахотного фонда*** и непахотопригодных земель как двух противоположных полюсных угодий. Угодья, находящиеся в промежуточном положении, могут использоваться в зависимости от складывающихся экономических условий. Элитный пахотный фонд формируется из лучшей пашни, отвечающей физическим, биоклиматическим и экономическим признакам пахотопригодности. Земли гибкого использования – это физически пахотопригодные угодья, на данный момент непахотопригодные в климатическом или экономическом отношении.

Предлагается следующая матрица оптимального пространственного распределения видов землепользования (Табл. 2).

Оптимизация землепользования в ее традиционном понимании, особенно в поисках оптимального соотношения земельных угодий, в какой-то степени стихийно осуществлялась в 1990-е годы, когда системный кризис степей достиг своего максимума. Однако в последующие три десятилетия сама природа восстановила стабилизирующие угодья в виде вторичных степей, саванноидов, облесенных залежей, в основном на постцелинном пространстве. В настоящее время на большей части степной зоны Европейской России пашни восстановлены, а на постцелинном пространстве еще сохраняются очаги вторичных степей и потенциал их развития.

Сохранение вторичных степей, возникших в постцелинный период, является важным обстоятельством для признания равноценности целинных и вторичных степей, а в конечном счете и признания степи такой же национальной ценностью, как и лес. Вторичные, самовосстановленные степи, несмотря на их отличие от коренных степных экосистем, являются важнейшим эколого-стабилизирующим условием развития современных ландшафтов. Данный процесс может рассматриваться как вторичная экологическая оптимизация степных ландшафтов (некоторые авторы [18] называют этот процесс «нивелирующей оптимизацией» или «сооптимизацией»). Практическая реализация этого процесса позволяет осуществить компенсационный агроландшафтный земельный оборот, способствующий созданию экологического резерва популяции коренных степных биологических видов [6]. В процессе корректировки структуры степных агроландшафтов

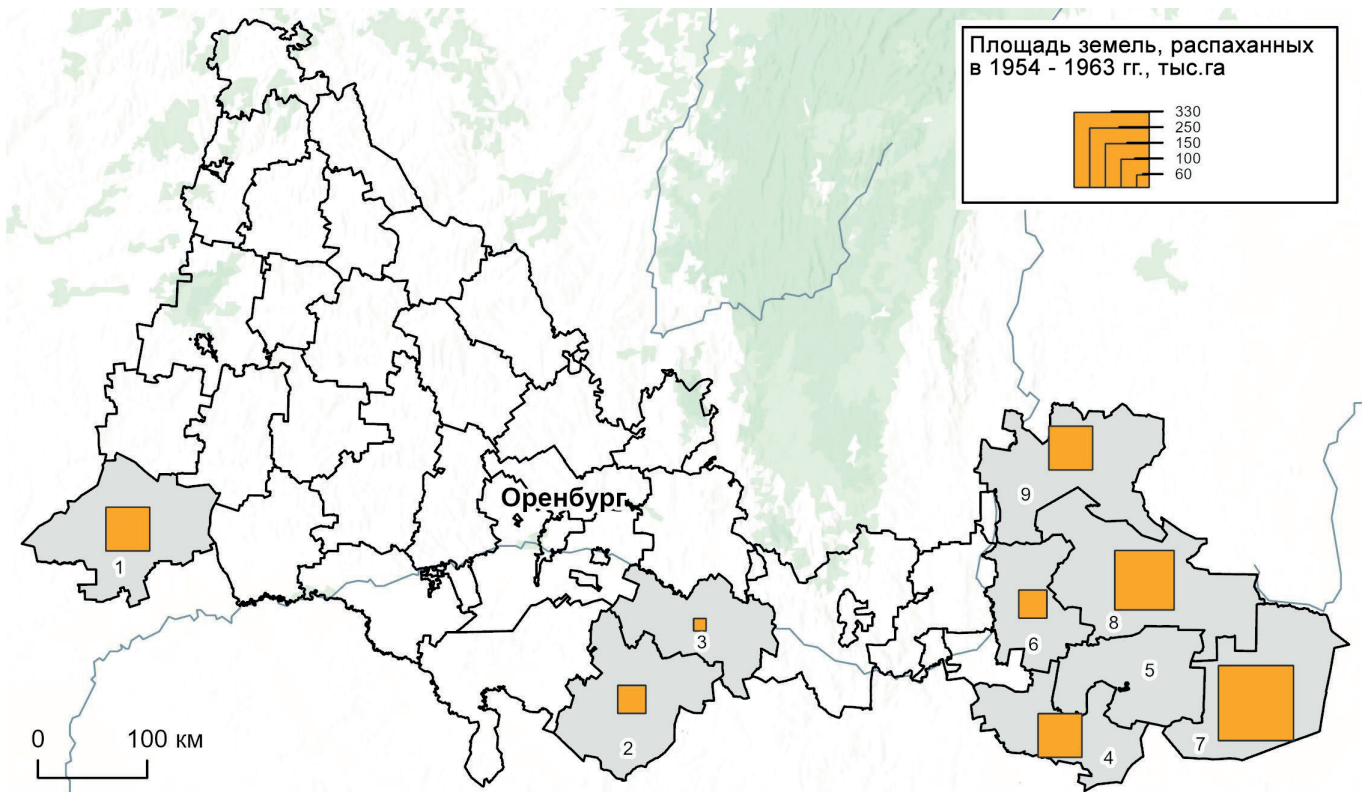


Рис. 1. Основные постцелинные районы Оренбургской области: 1 – Первомайский, 2 – Акбулакский, 3 – Беляевский, 4 – Домбаровский, 5 – Ясненский (городской округ)*, 6 – Новоорский, 7 – Светлинский, 8 – Адамовский, 9 – Кваркенский.
*Ясненский район образован в 1979 году после завершения целинной кампании

становится оправданным снижение доли пахотных угодий по мере сокращения биоклиматического потенциала. В этих условиях легче обосновать южную границу рентабельного богарного земледелия с выделением южнее ее так называемого «мясного пояса» с приоритетом пастбищного животноводства, адаптированного к кормовым ресурсам территории и их сезонной динамике.

Первоочередные территориальные единицы для экологической оптимизации степных ландшафтов

Административно-территориальное деление обычно не совпадает с физико-географическими рубежами. Поэтому наиболее целесообразной территориальной единицей на данном этапе представляется постцелинный административный район. Кроме того, именно муниципальное образование – район является минимальной единицей территориального планирования, а значит корректировку территориального планирования удобнее всего проводить по районам.

В данной работе авторами выбраны для разработки схем районной планировки так называемые «постцелинные» районы Оренбургской области – Первомайский, Акбулакский, Беляевский, Кваркенский, Домбаровский, Новоорский, Адамовский, Ясненский, Светлинский (рис. 1). Для них характерны следующие особенности:

а) во время целинной кампании 1950–1960-х годов на территории этих районов было распахано 60–100 тыс. га целинных и залежных земель и созданы новые сельхозпредприятия;

б) в этих районах биоклиматический потенциал полеводства близок к минимуму для степной зоны;

в) в пределах этих районов сосредоточены крупнейшие массивы малопродуктивной пашни и неудобий;

г) в постцелинный период (1990-е годы) произошло максимальное сокращение пашни;

д) сохранился потенциал самореабилитации степных экосистем, что сопровождалось образованием обширных участков целинных и вторичных степей;

е) достаточно большую площадь занимают территории сохранившегося биологического разнообразия, непригодные для распашки;

ж) наличие созданных на рубеже веков ООПТ разных категорий;

з) значительная убыль сельского населения (20% и более) за последние 35 лет.

Выводы

Проведенный анализ позволил разработать новые геоэкологические подходы к оценке современного состояния ландшафтов конкретных территорий на уровне районов – муниципальных образований степной зоны Российской Федерации – для совершенствования технологий составления схем территориального планирования (СТП). К сожалению, существующая практика подобных работ осуществляется по устаревшим шаблонам, как правило без участия специалистов в области ландшафтоведения. Многочисленные схемы территориального планирования, созданные за последние десятилетия для МО на уровне районов для всех субъектов РФ, сводятся к составлению проектов планировки территории, охватывающей современную хозяйственную, селитебную, транспортную инфраструктуру, объекты лесного и водного хозяйства, существующие ООПТ с учетом особенностей фонда земельных ресурсов сельскохозяйственного назначения. Существующие СТП регионов страны созданы как под копирку и отличаются друг от друга только по топографическим основам.

Данный анализ проведен на примере муниципальных образований Оренбургской области. Для межрегиональной интерпретации разработанных подходов выбраны ключевые районы Курганской (Целинный район), Волгоградской (Кумылженский) областей и Луганской Народной Республики (Беловодский). На основе исследований, проведенных в рамках проекта РНФ, сделаны следующие выводы:

Учитывая тот факт, что все модельные МО имеют аграрно-хозяйственную специфику, одним из главных критериев оценки территории является степень ***оптимальности структуры земельного фонда*** на основе анализа рентабельности сельского хозяйства. Сделан вывод о необходимости выделения ***элитного земельного фонда*** на лучших почвах, на которых необходимо сосредоточить технологическую нагрузку для достижения высокой продуктивности, освободив от нее малопродуктивные земли.

В связи с тем, что сельскохозяйственные угодья в степных МО занимают до 90%, а пашня – от 30 до 60% площади в СТП, для МО степных регионов необходимо расширять применение природоподобных ландшафтно-адаптивных технологий землепользования, сосредоточенных на элитном земельном фонде.

Важнейшую роль в устойчивом развитии конкретных МО играют элементы ***ландшафтно-экологического каркаса*** (ООПТ), ***лесомелиоративные комплексы*** (совокупность и сочетание естественных и культурных лесонасаждений), ландшафтно-гидрологические объекты (реки, озера, искусственные водоемы). Данные территории представляют особую ценность для ***сохранения ландшафтного и биологического разнообразия*** и развития охотничьих хозяйств.

Ландшафтно-экологический каркас МО не только определяет устойчивость территории и благоприятную среду жизни и деятельности населения, но и

создает условия для создания ***природоохранно-туристских зон*** (земельного фонда), в пределах которых необходимо планировать развитие рекреации, агроэкологического и познавательного туризма, охотничьего хозяйства, которые органично дополнят сельскохозяйственную специфику МО степных регионов.

На территории большинства МО степных регионов РФ сосредоточено большое число объектов историко-культурного наследия от археологических памятников бронзового века до архитектурных хозяйственно-промышленных строений и ансамблей XVI–XX веков разной степени сохранности. Объекты историко-культурного наследия в СТП позволяют повысить инвестиционную привлекательность территории и должны быть включены в туристские маршруты и музейные экспозиции.

Особое место в СТП должно быть уделено выработанным и действующим горнопромышленным антропогенным ландшафтам (рудникам, карьерно-отвальным комплексам и так далее). С одной стороны, это объекты повышенной экологической опасности, с другой – перспективные объекты обязательной рекультивации, в результате которой могут быть созданы своеобразные природно-техногенные комплексы со своим ландшафтным колоритом, биологическим разнообразием.

Современные тенденции убыли сельского населения, сохранения агрохозяйственных объектов в большинстве удаленных от региональных центров территорий степной зоны привели к образованию постселитебных и постаграрно-хозяйственных комплексов, находящихся на разных стадиях деградации. Безусловно, все они должны получить отражение на СТП муниципальных образований с отражением вектора их использования или перехода в иные категории угодий.

Завершающим этапом исследований по составлению СТП муниципальных образований степных регионов должна быть разработка свода картографической документации – своеобразного Атласа территории, отражающего природный и социально экономический потенциал для стратегии экологического развития муниципальных образований.

Финансирование. *Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00020, https://rscf.ru/project/25-17-00020*

Литература

1. Беннетт ХХ. Основы охраны почвы. М.: Изд-во иностранной литературы; 1958.
2. Вильямс ВР. Луговодство и кормовая площадь. М: Сельхозгиз; 1941.
3. Володин ВМ. Экологические основы оценки и использования плодородия почв. М.: ЦИНАО; 2000.
4. Докучаев ВВ. Наши степи прежде и теперь. СПб.: Тип. Е. Евдокимова; 1892.
5. Земельные ресурсы: всемирный обзор. Первое издание. Бонн: КБООН; 2017. URL: https://www.unccd.int/sites/default/files/2018-06/GLO%20Russian_Full_Report_rev1.pdf
6. Козлова ММ. Сергей Александрович Бутурлин. 1872-1938. М.: Наука; 2001.
7. Компанеец МК. Ученые-агрономы России (из истории агрономической науки). М.: Колос; 1971.
8. Левыкин СВ, Ахметов РШ, Петрищев ВП, Семенов АЕ, Жданов СИ, Грошев ИВ, Мостовенко ЕА. Земля: как оценить бесценное. Методические подходы к экономической оценке биопотенциала земельных ресурсов степной зоны. Новосибирск: Сибирский экологический центр; 2005.
9. Левыкин СВ, Казачков ГВ. Природоохранная специфика степей для земельной политики. Вестник Оренбургского государственного университета. 2009;6:585-8.
10. Левыкин СВ, Чибилев АА, Казачков ГВ. К разработке базового показателя потенциала пахотных земель. Проблемы региональной экологии. 2016;6:153-8.
11. Левыкин СВ, Чибилев АА, Казачков ГВ. Ландшафтно-экологические подходы к оптимизации степного природопользования на основе конвергентных и природоподобных технологий. В кн.: Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности. II Всероссийская научно-практическая конференция. Оренбург: ИП Востриков К «Полиарт»; 2020. С. 364-8.
12. Научно-технический бюллетень по проблеме «Оптимизация агроландшафтов и адаптивно-ландшафтных систем земледелия». Вып. 1 (70). Курск: РАСХН, ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии; 2002. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26018769
13. Чибилев АА, Левыкин СВ, Вельмовский ПВ, Чибилев-мл. АА, Казачков ГВ. Оптимизация

лесомелиоративного каркаса степных регионов. Оренбург: Институт степи УрО РАН; 2016.
14. Пилатов ПН. Степи СССР как условие материальной жизни общества: к проблеме – природа и человек. Ярославль: Верхневолжское книжное издательство; 1966.
15. Чибилев АА, Левыкин СВ, Петрищев ВП и соавт. Пространственное развитие степных и постцелинных регионов Европейской России. Т.1. Оренбург: ИС УрО РАН; 2018.
16. Прянишников ДН. Популярная агрохимия. М.: Наука; 1965.
17. Володин ВВ. Сеятели и хранители. В двух книгах. Кн.1. М.: Современник; 1992.
18. Скорупскас Р. Основные методологические аспекты оптимизации ландшафта. В кн.: Степи Северной Евразии: материалы VIII международного симпозиума. Оренбург: ИС УрО РАН; 2018. С. 112-115.
19. Тишков АА, Коронкевич НИ, Кашутина ЕА, Барабанова ЕА, Суховеева ОЭ. Новый взгляд на природный капитал России через призму трансграничных потерь воды, углерода и азота почв при экспорте пшеницы. Вестник РАН. 2026;96(2):122-133. DOI: 10.7868/S3034520026020028
20. Хлыстун ВН. Земельный потенциал России: состояние, использование, сохранение. Вестник РАН. 2026; 96(2):113-121. DOI: 10.7868/S3034520026020014
21. Чибилев АА. Лик степи (Эколого-географические заметки о степной зоне СССР). Л.: Гидрометеоиздат; 1990.
22. Чибилев АА. Экологическая оптимизация степных ландшафтов. Свердловск: Институт экологии растений и животных; 1992.
23. Чибилев АА, Левыкин СВ. Целина, разделенная океаном (актуальные заметки о судьбе степей Северного полушария). Степной бюллетень. 1998;1:3-9.
24. Чибилев АА. Уроки целины. Наука Общество Человек (Вестник УрО РАН). 2004;3:109-116.
25. Чибилев АА, Левыкин СВ, Казачков ГВ. Степное землепользование и перспективы его модернизации в современных условиях. В кн. Вызовы XXI века: природа, общество, пространство. Ответ географов стран СНГ. М.: КМК; 2012. С. 156-82.
26. Шишов ЛЛ, Дурманов ДН, Карманов ИИ, Ефремов ВВ. Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв М.: Агропромиздат; 1991.
27. Chibilev A., Levykin S. Virgin lands divided by an ocean: The fate of grasslands in the Northern Hemisphere. Nova Acta Leopoldina. 2013:114:91-103.
28. Chibilev AA, Levykin SV, Kazachkov GV. Developing institutional support for rational steppe land use. In: Maximova SG, Raikin RI, Chibilev AA, Silantyeva MM (eds). Advances in Natural, Human-Made, and Coupled Human-Natural Systems Research. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023;250:45-57
29. FAO. Key facts on food loss and waste you should know! https://twosides.info/includes/files/upload/files/UK/Myths_and_Facts_2016_Sources/18-19/Key_facts_on_food_loss_and_waste_you_should_know-FAO_2016.pdf
30. Levykin SV, Nurushev MZh, Kazachkov GV, Yakovlev IG. On the defining role of the steppe in the formation of humanity: stepnism as an innovative convergent doctrine. In: Ambarlı D. et al. (eds.) Asian Grassland Conference 19-21 April 2022 Virtual Conference. Book of Abstracts. Hohhot: 2022. P.60.
31. Lott MC. UN says that if food waste was a country, it'd be the #3 global greenhouse gas emitter. Scientific American Blog. 2013. https://www.scientificamerican.com/blog/plugged-in/un-says-that-if-food-waste-was-a-country-ite28099d-be-the-3-global-greenhouse-gas-emitter

УДК 349.6 + 581.527.7 || EDN: PNSTPJ
CC BY-NC 4.0
© А.С. Карпов и соавт.; ФНИ «XXI век»

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА СУБЪЕКТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В СФЕРЕ БОРЬБЫ С ИНВАЗИВНЫМИ ВИДАМИ РАСТЕНИЙ

А.С. Карпов[1], С.А. Сенатор[2]*, Ю.К. Виноградова[2], Д.О. Воронцов[3]

[1] Законодательное Собрание Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, Россия;
[2] Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия;
[3] Российский государственный университет правосудия, Москва, Россия.

Эл. почта: stsenator@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; принята к печати 05.05.2026

Рассмотрены современные правовые и организационные подходы к регулированию распространения инвазивных (чужеродных) видов растений в Российской Федерации. Проанализированы ключевые положения Федерального закона № 294-ФЗ от 31.07.2025, который закрепил понятийный аппарат и распределил полномочия между уровнями публичной власти в сфере противодействия опасным инвазивным растениям (ОИР). Рассмотрены изменения в смежных федеральных нормативных актах – Земельном, Лесном кодексах, законодательстве об охране окружающей среды и об ООПТ, а также выявлены ограничения и неопределённости в правовом регулировании. Особое внимание уделено возможностям правотворчества субъектов Российской Федерации. Показано, что региональные органы власти обладают значительной свободой в формировании перечней ОИР, установлении мер их выявления и уничтожения, а также в развитии инструментов экологического просвещения, включая «Чёрные книги флоры». Рассмотрены существующие региональные практики, их фрагментарность и различия в подходах к регулированию (от узкоцелевых мер борьбы с борщевиком Сосновского до комплексных программ управления инвазиями). Проанализированы модели регионального регулирования на примере некоторых субъектов РФ. Отмечается несогласованность терминологии, различия в уровне нормативной детализации и отсутствие единых критериев эффективности мер. Обоснована необходимость дальнейшей унификации понятийного аппарата, разработки измеримых целей регулирования и интеграции мер противодействия инвазивным видам в смежные отрасли законодательства.

Ключевые слова: *инвазивные виды растений, региональное законодательство, экологическое право, правовые механизмы.*

NEW OPPORTUNITIES FOR THE DEVELOPMENT OF LEGISLATION OF THE CONSTITUENT ENTITIES OF THE RUSSIAN FEDERATION IN THE FIELD OF COMBATING INVASIVE PLANT SPECIES

A.S. Karpov[1], S.A. Senator[2]*, Yu.K. Vinogradova[2], D.O. Vorontsov[3]

[1]Legislative Assembly of Saint. Petersburg, Saint Petersburg, Russia
[2]Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
[3]Russian State University of Justice, Moscow, Russia.

E-mail: stsenator@yandex.ru

The article examines current legal and organizational approaches to regulating the spread of invasive (alien) plant species in the Russian Federation. The key provisions of Federal Law No. 294-FZ of 31 July 2025 are analyzed; this law establishes the conceptual framework and distributes competencies among different levels of public authority in the field of controlling dangerous invasive plant species. Amendments to related federal legal acts are also considered, including the Land Code, the Forest Code, environmental protection legislation, and legislation on specially protected natural areas. Limitations and uncertainties in the legal regulation are identified. Particular attention is paid to the potential for law making at the level of the constituent entities of the Russian Federation. It is shown that regional authorities have considerable autonomy in compiling the lists of dangerous invasive plant species, establishing measures for their detection and eradication, and developing instruments of environmental education, including "Black Books of Flora". Existing regional practices are reviewed, highlighting their fragmentation and variation in regulatory approaches (ranging from narrowly targeted control measures against Heracleum sosnowskyi to comprehensive invasive species management programs). Regional regulatory models are analyzed using examples from selected federal subjects of the Russian Federation. The study identifies inconsistencies in terminology, differences in the level of regulatory detail, and the absence of unified criteria for evaluating the effectiveness of implemented measures. The need for further harmonization of the conceptual framework, development of measurable regulatory objectives, and integration of invasive species control measures into related branches of legislation is substantiated.

Keywords: *invasive alien plant species, regional legislation, environmental law, legal mechanisms, areas of joint jurisdiction.*

Введение

Распространение инвазивных видов растений представляет серьезную угрозу биологическому разнообразию и устойчивости естественных экологических систем, что в свою очередь влечет за собой существенные экономические издержки, а также негативные социокультурные последствия и ущерб благополучию человека [7, 11, 12]. Под термином «биологическая инвазия» в широком смысле обычно понимают возникновение самовоспроизводящейся (устойчивой) популяции какого-либо вида живых организмов за пределами его естественного (исторического) ареала [2, 4].

До недавнего времени правовое регулирование противодействия биологическим инвазиям в Российской Федерации отсутствовало [8]. Законодательство не определяло ни понятия – «чужеродный вид», «инвазивный чужеродный вид», «биологическая инвазия», ни правоотношения в сфере контроля за ввозом, использованием и распространением на территории России чужеродных видов [5]. Принятый 30.12.2020 Федеральный закон № 492-ФЗ[1], который устанавливает основы государственного регулирования в области обеспечения биологической безопасности в РФ, ориентирован на патогенные биологические агенты (микроорганизмы, вирусы, прионы, токсины) и не содержит положений о чужеродных растениях и животных. Налицо явный пробел права, поскольку биологические инвазии в науке рассматриваются как один из видов биологического загрязнения [8, 9].

Заметим, что законодательства, например в Республиках Молдова и Беларусь, оперируют понятием «инвазивные чужеродные виды растений», что соответствует установившейся международной практике в этой сфере [9]. Согласно Постановлению Кабинета Министров Республики Узбекистан[2], мониторинг растительного мира осуществляется в том числе, за инвазивными видами растений. Недавно принятый Закон Республики Казахстан[3] содержит понятие «чужеродный вид растений».

Поскольку законодательные акты обеспечивают правовую основу для эффективного управления биологическими инвазиями [9, 10, 14], отсутствие нормативно-правового регулирования является обстоятельством, способствующим распространению инвазивных видов [16].

В нормативных документах РФ понятие «инвазивное (чужеродное) растение» впервые появилось в 2020 году в Национальном стандарте (ГОСТ), посвященном «зеленым» крышам[4]. В 2024 году город федерального значения Москва включил термин «инвазивные растения» в закон субъекта РФ. Согласно пп. 20 п. 1 статьи 1 Закона города Москвы «Об охране и использовании зеленого фонда в городе Москве»[5] инвазивными являются «растения, находящиеся за пределами их естественного ареала, распространение и численность которых создают угрозу жизни или здоровью граждан, сохранению биологического разнообразия, функционированию экологических систем и причинения вреда отдельным отраслям экономики». Им противопоставлены (пп. 22 того же пункта) «нативные виды растений – местные виды растений, для которых средняя полоса России (зона смешанных и широколиственных лесов) является естественным ареалом». Отметим, что в первом случае речь идёт о растениях, а во втором – о видах, что существенным образом влияет на устанавливаемые правоотношения.

В других регионах до июля 2025 года регулирование растительных инвазий развивалось без использования специального термина и было сфокусировано на борьбе с борщевиком Сосновского. В двух субъектах Российской Федерации – Калужской[6] и Ленинградской[7] областях – были приняты специальные законы, комплексно регулирующие борьбу с этим видом. В Архангельской области отдельным законом были утверждены дополнительные вопросы осуществления местного самоуправления и меры господдержки мероприятий по борьбе с борщевиком.[8] В Московской области борьба с борщевиком была законодательно отнесена к вопросам благоустройства[9], подлежащим

[1] Федеральный закон от 30.12.2020 г. № 492-ФЗ «О биологической безопасности в Российской Федерации» (ред. от 23.07.2025)

[2] Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 05.09.2019 г. № 737 «О совершенствовании системы мониторинга окружающей природной среды в Республики Узбекистан»

[3] Закон Республики Казахстан от 02.01.2023 г. № 183-VII «О растительном мире» (с изменениями по состоянию на 13.08.2025 г.)

[4] ГОСТ Р 58875-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. «Зеленые» стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования : государственный стандарт Российской Федерации : принят и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 мая 2020 г. № 245-ст : введен впервые : дата введения 2020-06-01

[5] Закон г. Москвы от 13.11.2024 г. № 27 «Об охране и использовании зеленого фонда в городе Москве»

[6] Закон Калужской области от 23.03.2020 № 574-ОЗ «О регулировании отдельных правоотношений в сфере предотвращения распространения сорного растения борщевик Сосновского на территории Калужской области»

[7] Областной закон Ленинградской области от 27.06.2023 г № 76-оз «Об организации деятельности по борьбе с борщевиком Сосновского на территории Ленинградской области и о внесении изменений в областной закон «Об административных правонарушениях»

[8] Областной закон Архангельской области от 27 апреля 2020 № 252-16-ОЗ «О внесении изменений в областной закон «О реализации государственных полномочий Архангельской области в сфере правового регулирования организации и осуществления местного самоуправления» и областной закон «О государственной поддержке сельского хозяйства в Архангельской области и разграничении полномочий органов государственной власти Архангельской области по регулированию отношений в сфере рыболовства и аквакультуры (рыбоводства)»

[9] Закон Московской области от 30.12.2014 г. № 191/2014-ОЗ «О ре-

регулированию на местном уровне, а в Вологодской и Ивановской областях непринятие мер по борьбе с борщевиком, предусмотренных муниципальными правовыми актами, было выделено в отдельные составы административных правонарушений[10]. В ряде других регионов нормативными правовыми актами исполнительной власти были утверждены программы субсидирования мероприятий по борьбе с борщевиком для муниципалитетов, юридических и физических лиц.

Принятие Федерального закона от 31.07.2025 № 294-ФЗ «О внесении изменений в Земельный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации», вступившего в силу с 1 марта 2026 года, ознаменовало собой новый этап развития данной области права. Этим законом был установлен единый понятийный аппарат, закреплены полномочия различных уровней публичной власти. Целью данной статьи является анализ возможностей для правотворчества субъектов Российской Федерации, появившихся после принятия данного федерального закона, и предварительное исследование их использования в региональной практике.

1. Новации федерального законодательства

Федеральный закон № 294-ФЗ внёс системные изменения в несколько основополагающих законодательных актов:

– В Федеральный закон «Об охране окружающей среды» введено определение «опасных видов инвазивных (чужеродных) растений» (ОИР) как «жизнеспособных растений любых видов, сортов или биологических типов, обитающих за пределами своего естественного ареала, распространение которых создает угрозу окружающей среде, жизни или здоровью граждан, биологическому разнообразию и отраслям экономики». Новая статья 50.1 закрепляет обязанности владельцев земельных участков по борьбе с ОИР и полномочия субъектов РФ по утверждению региональных перечней ОИР «в отношении которых должны приниматься меры по их выявлению, предотвращению их распространения и их уничтожению». Таким образом, сформирована связка между внесением вида в перечень и обязанностями неопределённого круга лиц по реализации мер противодействия. При этом содержание понятий «выявление», «предотвращение распространения» и «уничтожение» не раскрыто.

– В Федеральный закон «Об особо охраняемых природных территориях» включена статья 35.1, которая устанавливает требования по борьбе с ОИР на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Перечни ОИР для ООПТ федерального значения утверждаются федеральным органом исполнительной власти в области охраны окружающей среды, которым в настоящее время является Минприроды России, а для ООПТ регионального и местного значения – субъектом РФ.

– Лесной кодекс Российской Федерации[11] закрепляет меры по защите лесных экосистем от ОИР, которые способны нанести вред лесам как экологической системе и лесным ресурсам (но не здоровью человека), включая возможность расторжения договоров пользования за неисполнение предписанных мер. Перечни ОИР по лесным районам[12] устанавливаются Федеральным агентством лесного хозяйства.

– В Земельном кодексе Российской Федерации[13] закреплены обязанности владельцев земельных участков по защите земель от распространения ОИР и их уничтожению. Предусмотрена возможность принудительного прекращения права постоянного пользования или пожизненного наследуемого владения за невыполнение этих обязанностей, но изъятие частной собственности не предусмотрено. При этом Федеральный закон «Об обороте земель сельскохозяйственного назначения» допускает принудительное изъятие таких земель по решению суда.

– В Федеральном законе «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами» расширено понятие пестицидов, в него включены вещества, воздействующие на ОИР.

Довольно скупые положения Федерального закона № 294-ФЗ в отношении полномочий субъектов РФ формируют и правовой фундамент, и ограничивающие рамки для регионального правотворчества.

2. Доступные меры регионального нормативного регулирования

Свобода правотворчества субъекты РФ ограничена Конституцией РФ и нормами федерального законодательства. Поэтому при проектировании путей развития регионального законодательства необходимо акцентировать то, что федеральный законодатель отнёс противодействие ОИР к предметам совместного ведения Российской Федерации и субъектов РФ: природопользование; сельское хозяйство; охрана окружающей

гулировании дополнительных вопросов в сфере благоустройства в Московской области» (ред. от 09.07.2024 г)

[10] Закон Вологодской области от 11.04.2024 г № 5583-ОЗ «О внесении изменения в статью 3.1(1) закона области «Об административных правонарушениях в Вологодской области» и Закон Ивановской области от 07.03.2024 г. № 2-ОЗ «О внесении изменений в Закон Ивановской области «Об административных правонарушениях в Ивановской области»

[11] Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ (ред. от 29.12.2025 г.)

[12] Приказ Минприроды России от 18.08.2014 г. № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации»

[13] Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 г. № 136-ФЗ (ред. от 29.12.2025 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2026 г.)

среды и обеспечение экологической безопасности; особо охраняемые природные территории, земельное, лесное законодательство[14]. Благодаря этому, субъекты РФ вправе не только утверждать перечни ОИР, но и устанавливать иные нормы, регулирующие борьбу с ОИР, – оставаясь в пределах своих полномочий в соответствии с Земельным и Лесным кодексами, Федеральным законом «Об охране окружающей среды» и так далее.

Тем не менее, само понятие «перечень» не подлежит расширительному толкованию и не позволяет превратить нормативно утверждаемые списки ОИР в аналоги «Красных книг», привычных и специалистам, и общественности. Между тем, издание «Черных книг флоры» является важным инструментом реализации региональной политики противодействия ОИР [1, 15]. В настоящее время в РФ опубликовано 12 «Черных книг флоры» – Средней России, Сибири, Дальнего Востока, Белгородской, Калужской, Нижегородской, Самарской, Тверской областей, республик Башкортостан, Кабардино-Балкария и Карелия, Удмуртской Республики, однако такая деятельность не носит системного характера.

Несмотря на отсутствие соответствующих положений в Федеральном законе № 294-ФЗ, состав и порядок подготовки «Чёрных книг флоры» могут быть урегулированы в региональном законодательстве в рамках имеющихся полномочий субъектов РФ по осуществлению экологического просвещения[15]. Как инструмент экологического просвещения «Чёрная книга флоры», не будучи нормативным актом, получает статус официального источника подробной и систематизированной информации о видах, включённых в утверждённые нормативно правовыми актами перечни ОИР и потенциальных «кандидатах» в перечни, рекомендациях и обязательных мерах по борьбе с такими видами.

Для осуществления ряда превентивных мер субъект может, помимо регулирования состава правил благоустройства, использовать полномочия по охране зеленого фонда городских и сельских населенных пунктов, предоставленные ст. 61 Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Установленный федеральным законом запрет хозяйственной и иной деятельности, оказывающей негативное воздействие на территории, находящиеся в составе зеленого фонда, и препятствующей осуществлению ими функций экологического, санитарно-гигиенического и рекреационного назначения, позволяет регулировать видовой состав растений, используемых в озеленении, и устанавливать требования к грунтам и саженцам на предмет отсутствия в них семян ОИР. При этом открывается возможность внедрить систему мер в зависимости от статуса вида:

– для ОИР: активное выявление и обязательное уничтожение без необходимости получения порубочного билета и оплаты восстановительной стоимости;

– для «кандидатов» в перечень и иных нежелательных видов: ограничение применения в озеленении и сокращение численности.

За нарушение указанных требований закон субъекта РФ может предусматривать административную ответственность.

Также важной частью правового инструментария является разделение полномочий по борьбе с ОИР между субъектом, муниципальными образованиями и землепользователями – при одновременной координации и синхронизации времени и технологий производства мероприятий.

3. Целеполагание и модели регулирования борьбы с опасными инвазивными видами

Анализ накопленного до 2025 года опыта регионов по нормативному оформлению борьбы с борщевиком Сосновского показывает применение ограниченного спектра правоотношений для указанных целей:

– меры финансовой поддержки и экономического стимулирования правообладателей земельных участков к уничтожению ими вегетативных и генеративных побегов растений[16], отнесённых к ОИР;

– внедрение требований по борьбе с растениями, отнесёнными к ОИР, в правила благоустройства населённых пунктов;

– разработка и утверждение методических рекомендаций по уничтожению растений, отнесённых к ОИР;

– административные штрафы за неисполнение установленных требований.

По сути, региональное законодательство развивалось на базе концепции «найди и уничтожь растение» (или «уничтожь, если заметишь»). Хотя в большинстве региональных актов упоминается «предотвращение распространения», собственно пути распространения борщевика оставались вне фокуса внимания и регулируемых правоотношений.

С принятием Федерального закона 294-ФЗ данный подход принципиально не изменился, поскольку федеральный законодатель также установил «уничтожение растений» в качестве единственной конкретно поименованной меры по охране окружающей среды от распространения ОИР. Иные меры только подразумеваются и должны быть разработаны.

При этом особенности биологии ОИР делают полное уничтожение растений таких видов, включая се-

[14] Статья 72 Конституции Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993 г. с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020 г.)

[15] Статья 74 Федерального закона от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»

[16] Далее, если иное специально не оговаривается, термином «растение» мы будем обозначать только его видимую часть.

мена в почве и части, способные к вегетативному размножению, достаточно сложной задачей, выполнение которой во многих случаях невозможно проконтролировать. Это разрушает правовую определённость, необходимую для административного производства по делам о неисполнении обязательных требований, и стимулирует движение контрольно-надзорных мероприятий от сущностных критериев («растения уничтожены») к процедурным («мероприятия по уничтожению проведены»).

В то же время Федеральный закон № 294-ФЗ не закрепил обязанность субъектов РФ и иных субъектов правоотношений устанавливать конкретные сроки и критерии достижения целей по борьбе с инвазивными видами.

При отсутствии измеряемой конечной цели региональной политики, такой например, как «полное уничтожение вида на определённой территории» или «отсутствие новых мест произрастания на протяжении nn лет», борьба с ОИР неизбежно превращается в борьбу за увеличение бюджетов на соответствующие программы.

На основании международного опыта можно говорить, что концепция *борьбы с растениями* на земельных участках по мере их появления в настоящее время заменяется концепцией *противодействия расселению биологических видов*[17] *растений*. Под расселением мы понимаем такие способы переноса, попадания в почву, в поверхностные водные объекты и прорастания семян или иных обладающих способностью к возобновлению частей растений, отнесённых к ОИР, которые обеспечивают освоение ими новых территорий и местообитаний. Первая концепция неизбежно опирается на земельные правоотношения, тогда как вторая является комплексной и должна включать регулирование хозяйственной и иной деятельности, которая может приводить к переносу растений, их семян или частей.

Выбор субъектом РФ той или иной концепции и вытекающей из неё системы целей отражается в системе правовых понятий, закрепляемых в региональных нормативных правовых актах.

Отсутствие специального понятийного аппарата права влечёт бытовое понимание терминов: «уничтожение растений» будет пониматься как ликвидация жизнеспособной надземной части и, возможно, повреждение коревой системы. «Выявление» будет пониматься просто как находка, обнаружение.

В рамках концепции борьбы с распространением инвазивного вида понятия «выявление», «распространение», «предотвращение распространения» и «уничтожение» ОИР должны быть конкретизированы, исходя из понимания биологического содержания регулируемых правоотношений. Например, под «уничтожением опасного вида» может пониматься как устойчивое во времени прекращение возобновления популяции, так и создание условий, когда наличие растений не представляет угрозы, из-за которой вид был включён в перечень. То есть «уничтожение вида» на определённой территории не сводится к уничтожению отдельных экземпляров растений. «Выявление» в системе мер по предотвращению распространения ОИР должно включать картографирование и документирование находок в государственных или муниципальных информационных системах.

Таким образом, понятийный аппарат законодательства в сфере борьбы с ОИР определяется принимаемой регионом концепцией и может различаться по субъектам РФ.

Также отметим, что в Глобальной рамочной программе в области биоразнообразия на период после 2020 года определен более широкий круг понятий, формирующих концепцию управления инвазиями, таких как предотвращение, раннее обнаружение, быстрое реагирование, долгосрочное управление[18].

Важным фактором выбора концепции регулирования становится то, что региональные перечни ОИР являются еще и основанием для выделения бюджетного финансирования на осуществление мероприятий по выявлению и уничтожению растений таких видов. Поскольку борьба с ОИР является расходным обязательством бюджета, вопрос о формировании перечней становится полем столкновения различных экономических интересов, зачастую далёких от интересов охраны окружающей среды. Поэтому необходимо с особой тщательностью подходить к процедуре подготовки списков ОИР с особым вниманием к аргументированности решений и точности юридических формулировок.

Критерии для отнесения вида к инвазивным и структура материалов, обосновывающих такое отнесение, в целом уже устоялись в научной литературе [3, 6]. Однако Федеральным законом № 294-ФЗ установлены иные – правовые – критерии для отнесения инвазивных видов к «опасным». При этом, как показывает наш опыт обсуждения данного вопроса, то, что критерии включены непосредственно в определение ОИР, затрудняет их восприятие в качестве таковых.

Мы полагаем, что для целей правоприменительной практики установленные федеральным законодателем критерии неизбежно придётся конкретизировать в законах субъектов РФ, чтобы избежать необоснованно широких пределов усмотрения или возможности необоснованного применения исключений из об-

[17] В некоторых случаях инвазионными свойствами обладает не весь вид, а отдельные подвиды или даже генотипы

[18] Предлагаемые основные индикаторы механизма мониторинга для Глобальной рамочной программы в области биоразнообразия на период после 2020 года. 2021. Электронный ресурс. https://www.cbd.int/doc/c/b6e5/72cb/6288a66de0436e5456620727/wg2 020-03-03-add1-ru.pdf

щих правил[19] при формировании перечней ОИР. При этом возможно различное толкование формулировок федерального закона. Например, предметом дискуссии может быть понятие «чужеродности» («обитают за пределами своего естественного ареала»): требует ли оно признания инвазивными давно натурализовавшихся видов или допускает возможность установить «сроки давности» для расширения ареала, в том числе, с участием человека.

Более или менее жёстко также может быть истолковано понятие «угрозы окружающей среде, сохранению естественных экологических систем, биологического разнообразия»: доказательством угрозы можно считать биологические свойства вида на основании данных научной литературы или только подтверждение причинения вреда в конкретном регионе.

Даже понятия «распространение и численность» (которые создают угрозу) могут трактоваться поразному: вид может быть признан ОИР, если может появиться на территории региона в соответствии с тенденциями его распространения, или если уже обнаружен в регионе, или если демонстрировал быстрое увеличение численности и площади произрастания в регионе на протяжении последних лет наблюдений.

Федеральное законодательство не указывает прямо, но и не запрещает структурировать перечни ОИР. В частности, ОИР могут быть разбиты на группы по приоритетности мер противодействия их распространению – в целях повышения эффективности управления, либо по территориальному признаку – для учёта внутрирегиональных биогеографических особенностей.

Также целесообразно регламентировать процедуру формирования перечня. Возможные компоненты процедуры:

– основания для решения о включении (данные натурных наблюдений и оценки потенциальных угроз, данные научной литературы) и порядок доступа к обосновывающим материалам;

– основания для исключения вида из перечня;

– комиссионный порядок обсуждения с вынесением рекомендаций для уполномоченного органа, утверждающего перечень;

– порядок актуализации перечня (например, периодический на основании плановых работ или постоянный на основании поступающих предложений о включении/исключении видов).

Баланс природоохранных, экономических, управленческих и общественных интересов при формировании перечней может быть обеспечен созданием «комиссии по инвазивным видам растений» при органе власти, уполномоченном на утверждение перечня. К участию в такой комиссии могут быть приглашены представители исполнительных органов государственной власти, депутаты регионального парламента и местных советов, научные работники из профильных организаций. С учетом важности того, что эффективная политика в отношении инвазивных видов должна быть основана на понимании путей их проникновения [13], также можно пригласить к участию представителей исполнительной власти соседних субъектов. Комиссии может быть поручена подготовка «Черной книги флоры» региона.

Эффективность мероприятий по ограничению распространения ОИР и определённость обязанностей землепользователей обеспечиваются, в том числе, точной идентификацией целевых видов или биологических типов. Признаки, обеспечивающие их надежную идентификацию (научное название, морфологические признаки, фотографии, карты распространения), могут быть указаны либо в самом правовом акте, утверждающем перечень, либо в официальных методических рекомендациях.

4. Текущее состояние регионального законодательства

На дату готовности настоящей статьи общие региональные перечни ОИР утверждены в 35 субъектах РФ, перечни ОИР, подлежащих выявлению и уничтожению на ООПТ регионального и местного значения – в 30[20]. Суммарно один или оба перечня утверждены в 41 регионе. Во всех случаях нормативно-правовые акты изданы исполнительными органами государственной власти.

Более интересным для целей настоящей статьи является анализ региональных законов, принятых в целях реализации положений Федерального закона № 294-ФЗ в период с августа 2025 года по апрель 2026 года (включительно). Нам удалось выявить 20 таких законов. Из них 18 вносят изменение в действующие законы в области охраны окружающей среды и содержат исключительно положения о наделении исполнительных органов власти субъекта полномочиями по утверждению перечней ОИР.

В Нижегородской области идентичный по содержанию закон[21] принят в «расширенном формате»: в нем дословно повторены отдельные положения Федерального закона № 294-ФЗ. Отметим, что дублирование норм федерального закона, в случае изменения последних, приводит к несоответствию законодательст-

[19] Постановление Правительства РФ от 26.02.2010 г. № 96 «Об антикоррупционной экспертизе нормативных правовых актов и проектов нормативных правовых актов» (ред. от 20.04.2024 г.)

[20] Поиск нормативных правовых актов субъектов РФ проводился в государственной информационной системе «Официальное опубликование правовых актов» (http://publication.pravo.gov.ru/) с дополнительной проверкой в сервисах предоставления правовой информации «Консультант» и «Гарант».

[21] Закон Нижегородской области от 11.03.2026 № 35-З «О внесении изменений в отдельные законы Нижегородской области в части регулирования отдельных правоотношений по предотвращению распространения опасных видов инвазивных (чужеродных) растений»

ва субъекта РФ федеральному законодательству, что, в свою очередь, противоречит принципам, установленным в статье 76 Конституции РФ. Вопрос об утверждении обязательных или хотя бы рекомендуемых мер по борьбе с инвазивными видами в Нижегородской области, как и в 18 других регионах, не решён.

Более комплексный подход реализован в Законе Архангельской области[22], где на момент принятия федерального закона уже существовала система разнообразных мер по борьбе с борщевиком Сосновского, закреплённая в нескольких региональных законах. Однако и в этом случае изменения сводятся к замене терминов в целях приведения регионального законодательства в соответствие в федеральным. При этом необходимо подчеркнуть, что замена «борщевика Сосновского» на термин «опасные виды инвазивных растений» не произведена, а в утверждённый Правительством Архангельской области перечень ОИР входит только один вид: Элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx). Можно предполагать, что власти Архангельской области сочли комплекс мер по борьбе с борщевиком Сосновского, обеспечиваемый региональными законами, более эффективным, чем возможности, предоставленные регионам после принятия Федерального закона № 294-ФЗ. Вместе с тем неясно, кто и в каком порядке должен утвердить меры по противодействию распространению элодеи. Однако это не повлечёт никаких последствий, поскольку обязанности по уничтожению ОИР возложены на землепользователей, а не на водопользователей.

В Калужской области утверждены перечни ОИР, подлежащих уничтожению и на территории региона, и на ООПТ регионального и местного значения. В оба перечня включён борщевик Сосновского. При этом в областной закон от 23.03.2020 № 574-ОЗ «О регулировании отдельных правоотношений в сфере предотвращения распространения сорного растения борщевик Сосновского на территории Калужской области» изменения не вносились. Как и в остальных случаях, какая-либо концепция того, как будет достигнуто уничтожение иных, кроме борщевика, ОИР, отсутствует.

В Ленинградской области изменения в областной закон от 27.06.2023 г № 76-оз также не вносились, перечни ОИР пока не утверждены.

Совершенно иной подход к использованию новых полномочий демонстрирует город федерального значения Москва. Поскольку, как было указано выше, понятие «инвазивных видов» уже включено в законодательство субъекта, новые возможности были реализованы в Постановлении Правительства Москвы от 3 марта 2026 года № 369-ПП «О мерах по регулированию распространения и численности инвазивных растений на территории города Москвы». Указанным постановлением, помимо утверждения перечня инвазивных видов растений, установлен порядок осуществления мер по регулированию их распространения и численности, внесены изменения в некоторые нормативно-правовые акты, касающиеся порядка озеленения города Москвы и положения о Департаменте природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. Указаны и конкретные агротехнологии, которые позволять сокращать численность вида, и сроки достижения целей по их уничтожению и (или) замещению.

Однако при этом используемый в постановлении понятийный аппарат не совпадает с терминологией, установленной федеральным законом: в постановлении не упоминаются «опасные виды инвазивных растений», вместо «мер по их выявлению, предотвращению их распространения и их уничтожению» установлены «меры по регулированию распространения и численности». Таким образом, и в этом случае регион, имеющий историю формирования законодательства в данной области, предпочёл развивать его, а не пользоваться понятиями, предложенными Федеральным законом № 294-ФЗ.

Заключение

Принятие в 2025 году Федерального закона № 294-ФЗ стало ключевым этапом в формировании национальной правовой базы для противодействия биологическим инвазиям. Закон определил понятийный аппарат и создал базовые правовые инструменты для регионов. Его рамочный характер открывает перед субъектами Российской Федерации пространство для нормотворчества и выстраивания системной политики по борьбе с растительными инвазиями. Для того, чтобы не попасть в ловушку постоянного роста бюджетных расходов на борьбу с ОИР, регионам необходимо определять достижимые цели, в том числе, через рациональный подход к формированию перечней ОИР, и интегрировать меры по борьбе с такими видами в смежные сферы права: благоустройство, охрану зеленого фонда, экологическое просвещение и межрегиональное взаимодействие. Вместе с тем 7 месяцев отлагательного строка вступления Федерального закона № 294-ФЗ в силу оказались недостаточными для проработки таких комплексных подходов. В настоящее время регионы ориентированы на формальное исполнение новых полномочий. Субъекты РФ, которые имеют собственную историю формирования законодательства в данной сфере, не спешат от него отказываться ради использования предоставленных им возможностей, что может свидетельствовать как об инерции, так и о критическом восприятии законодательных новаций.

[22] Областной закон Архангельской области от 22.12.2025 № 309-22-ОЗ «О внесении изменений в отдельные областные законы в части выявления, предотвращения распространения и уничтожения опасных видов инвазивных (чужеродных) растений на территории Архангельской области»

Статья выполнена в рамках темы государственного задания ГБС РАН № 126020216354-6 «Устойчивость естественных экосистем, сообществ и видов к биологическим инвазиям: индикаторы инвазионной активности и меры контроля расселения чужеродных видов растений».

Литература

1. Алимов АФ, Богуцкая НГ, ред. Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. М.: КМК, 2004.
2. Баранова ОГ, Щербаков АВ, Сенатор СА, Панасенко НН, Сагалаев ВА, Саксонов СВ. Основные термины и понятия, используемые при изучении чужеродной и синантропной флоры. Фиторазнообразие Восточной Европы. 2018;XII(4):4-22. DOI: 10.24411/2072-8816-2018-10031
3. Виноградова ЮК, Майоров СР, Хорун ЛВ. Чёрная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: ГЕОС; 2010.
4. Дгебуадзе ЮЮ. Биологические инвазии чужеродных видов – глобальный вызов последних десятилетий. Вестник Российской академии наук. 2023;93(9):814-823. DOI: 10.31857/S0869587323090050, EDN: XMYMQO
5. Нецветова ЕВ. О необходимости юридического закрепления в РФ понятий используемых по поводу отношений, связанных с инвазивными чужеродными видами. В кн.: Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов: материалы национальной конференции с международным участием в рамках XI международной научно-практической конференции «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии». Молодежный: Издательство Иркутский ГАУ; 2022. С. 92-9.
6. Нотов АА, Виноградова ЮК, Майоров СР. О проблеме разработки и ведения региональных Чёрных книг. Российский журнал биологических инвазий. 2010;(4):54-68.
7. Сенатор СА, Розенберг АГ. Эколого-экономическая оценка от ущерба инвазионных видов растений. Успехи современной биологии. 2016;136(6):531-8.
8. Сенатор СА, Виноградова ЮК. Инвазионные растения России: результаты инвентаризации, особенности распространения и вопросы управления. Успехи современной биологии. 2023;143(4):393-402. DOI: 10.31857/S0042132423040099
9. Тулина ЭЕ. Правовое регулирование инвазивных чужеродных видов растений по законодательству Молдовы, Беларуси и Украины (сравнительный анализ). Legea şi Viaţa. 2019;1/2(325):126-30.
10. Baquero RA, Ayllón D, Nicola GG. Are the EU biosecurity legislative frameworks sufficiently effective to prevent biological invasions in the Natura 2000 network? – A case study in Mediterranean Europe. Environ Sci Policy. 2021;(120):21-8. DOI:10.1016/j.envsci.2021.02.007
11. Courchamp F, Fournier A, Bellard C, Bertelsmeier C, Bonnaud E, Jeschke JM, Russell JC. Invasion biology: specific problems and possible solutions. Trends Ecol Evolut. 2017;(32):13-22.
12. Haubrock PJ, Everts T, Abreo NAS, Bojko J, Deklerck V, Dickey JWE, Franco ACS, García-Berthou E, Katsanevakis S, Kirichenko NI, Mammola S, Nuñez MA, Parker B, Scalera R, Soto I, Strubbe D, Tarkan AS, Vilizzi L, Adriaens T, Balzani P, Błońska D, Briski E, Brys R, Burgess AL, Byers JE, Cano-Barbacil C, Castaldelli G, Dick JTA, Dominguez Almela V, Dimarco RD, Florencio M, Kouba A, Kourantidou M, Kurtul I, Martín-Forés I, Morissette O, Olden JD, Soares BE, Truszkowski J, Verreycken H, Kenis M, Sousa R, Britton JR. The impacts of biological invasions. Biol Rev Camb Phil Soc. 2025. DOI: 10.1002/brv.70124.
13. Hulme PE, Bacher S, Kenis M, Klotz S, Kühn I, Minchin D, Nentwig W, Olenin S, Panov V, Pergl J, Pysek P, Roques A, Sol D, Solarz, Vilà M. Grasping at the routes of biological invasions: a framework for integrating pathways into policy. J Appl Ecol. 2008;(45):403-414.
14. Lodge DM, Williams S, MacIsaac HJ, Hayes KR, Leung B, Reichard S, Mack RN, Moyle PB, Smith M, Andow DA, Carlton JT, McMichael A. Biological invasions: recommendations for U.S. policy and management. Ecol Appl. 2006 Dec;16(6):2035-54. DOIi: 10.1890/1051-0761(2006)016[2035:birfup]2.0.co;2
15. Petrosyan V., Khlyap LA, Reshetnikov AN, Krivosheina MG, Morozova OV, Dergunova NN, Osipov FA, Dgebuadze YY. Alien species in the Holarctic. Russ J Biol Invasions. 2018;(9):374-81.
16. Richardson DM, Cambray JA, Chapman RA, Dean WRJ, Griffiths CL, Le Maitre DC, Newton DJ, Winstaniey TJ. Vectors and pathways of biological invasions in South Africa – past, present, and future. Chapter 12. In: Ruiz GM, Carlton JT, Eds. Pathways of Invasions: Strategies for Management Across Space and Time. Washington, DC: Island Press; 2003. P. 292-349.

УДК: 581.5 || EDN: GTFIBB
CC BY-NC 4.0
© П.С. Широких и соавт.; ФНИ «XXI век»

ВЛИЯНИЕ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В ПОСТАГРОГЕННЫХ БЕРЕЗОВЫХ ЛЕСАХ

П.С. Широких[1,2*], С.Н. Жигунова[1,2], В.Д. Гимазетдинов[1,2], И.Р. Туктамышев[1,2], Э.З. Баишева[1], И.Г. Бикбаев[1,2], В.Б. Мартыненко[1], Д.М. Гулов[1,2], Д.Т. Габбасова[1,2], М.Р. Ахметова[1], Белан Л.Н.[2], Д.Р. Харисов[1,2]

[1]Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН и [2]Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

[*]Эл. почта: shirpa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; принята к печати 20.04.2026

Заброшенные сельскохозяйственные земли (залежи) — важный резерв увеличения углеродного потенциала экосистем за счет депонирования углерода в древостое. Влияние лесохозяйственных мероприятий на углеродный баланс таких экосистем изучено недостаточно. Целью работы была оценка влияния прореживания древостоя на эмиссию CO_2 в почвенно-приземном комплексе (совокупность почвы, подстилки и травяного яруса, включая корни всех растений, находящиеся в этом слое) в молодом березняке на постагрогенной залежи. Исследования проведены в широколиственно-лесной зоне Республики Башкортостан в вегетационный сезон 2025 года на следующих пробных площадях: контроль (число деревьев — 3607 шт./га) и два варианта опыта (прореживание до целевой плотности 1000 и 800 шт./га, по три пробных площади в каждом варианте). Потоки CO_2 измерялись статическим камерным методом с использованием портативных газоанализаторов (Li-Cor 7810). Значения чистого экосистемного обмена (NEE — Net Ecosystem Exchange) и дыхания экосистемы (Reco — Respiration of Ecosystem) во всех вариантах были положительными на протяжении всего периода наблюдений, что свидетельствует о доминировании эмиссии CO_2 над его поглощением в напочвенном покрове. Прореживание древостоя до 1000 шт./га привело к наиболее существенному (в 2–4 раза) снижению удельных потоков CO_2 по сравнению с контролем, что связано с развитием фотосинтетически активного травяного яруса (проективное покрытие увеличилось с 1-5 до 50%). Суммарный нетто-экосистемный обмен CO_2 (NEE) за период май–октябрь на контрольной пробной площади составил 689 $гС \cdot м^{-2}$, на пробных площадях при прореживании до 1000 шт./га — 281 $гС \cdot м^{-2}$, до 800 шт./га — 490 $гС \cdot м^{-2}$. Сезонные значения дыхания экосистемы (Reco) достигали 832 $гС \cdot м^{-2}$ на контроле и снижались до 517 и 635 $гС \cdot м^{-2}$ при прореживании до 1000 и 800 шт./га, что указывает на максимальное сокращение эмиссии при умеренном прореживании. Полученные результаты показывают, что умеренное прореживание (до 1000 шт./га) является эффективным инструментом краткосрочного управления углеродным балансом напочвенного покрова в молодых березняках на залежах и может быть рекомендовано при проектировании и оптимизации функционирования карбоновых ферм.

Ключевые слова: залежные земли, береза повислая, напочвенный покров, потоки CO_2, Республика Башкортостан.

INFLUENCE OF SILVICULTURAL PRACTICES ON THE CARBON BALANCE OF THE FOREST FLOOR IN POST-AGRICULTURAL BIRCH FORESTS

P.S. Shirokikh[1,2], S.N. Zhigunova[1,2], V.D. Gimazetdinov[1,2], I.R. Tuktamyshev[1,2], E.Z. Baisheva[1], I.G. Bikbaev[1,2], V.B. Martynenko[1], D.M. Gulov[1,2], D.T. Gabbasova[1,2], M.R. Akhmetova[1], L.N. Belan[2], D.R. Kharisov[1,2]

[1]Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences and [2]Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

[*]Email: shirpa@mail.ru

Abandoned agricultural lands are an important reserve for increasing the carbon sequestration potential of ecosystems, primarily through carbon storage in tree biomass. The impact of silvicultural practices on the carbon balance of such ecosystems is insufficiently studied. The aim of this study was to assess the effect of stand thinning on CO_2 emissions from the forest floor (the combination of soil, litter, and herb layer, including the roots of all plants located in this layer) in a young silver birch stand on post-agricultural land. The research was carried out on abandoned fields in the broad-leaved forest zone of the Republic of Bashkortostan during the 2025 vegetation season using three regimens: control (3607 trees ha^{-1}) and thinning to target densities of 1000 and 800 trees ha^{-1}. CO_2 fluxes were measured using the static chamber method with a portable gas analyzer (Li-Cor 7810). Under all regimens, NEE (Net Ecosystem Exchange) and ecosystem respiration (Reco — Respiration of Ecosystem) remained positive throughout the observation period, indicating dominance of CO_2 emissions over its uptake at the forest floor level. Thinning to 1000 trees ha^{-1} led to the strongest reduction (by a factor of 2—4) in CO_2 flux densities vs. control, which was associated with the development of a photosynthetically active herb layer (projective cover increased from 1-5 to 50%). NEE in May—October was 689 g C m^{-2} in the control, 281 g C m^{-2} at 1000 trees ha^{-1}, and 490 g C m^{-2} at 800 trees ha^{-1}. Seasonal Reco reached 832 g C m^{-2} in the control and decreased to 517 and 635 g C m^{-2} at 1000 and 800 trees ha^{-1}, respectively, indicating the greatest emission reduction under moderate thinning. These results show that moderate thinning (down to 1000 trees ha^{-1}) is an effective short-term tool for managing the carbon balance of the forest floor in young birch stands on abandoned agricultural land and can be recommended for designing and optimizing carbon farm operation.

Keywords*: abandoned agricultural land, silver birch, forest floor, CO_2 fluxes, Republic of Bashkortostan*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема управления заброшенными сельскохозяйственными землями (залежами) приобретает всё большую актуальность в контексте изменения климата и необходимости повышения углеродного потенциала экосистем. Согласно докладу о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения[1], площадь учтённых залежных земель в России составляет 4,4 млн га, что соответствует 1,17% земель сельхозназначения. Естественное зарастание залежей древесной растительностью, прежде всего такими быстрорастущими породами, как берёза (*Betula pendula* Roth), является распространённым процессом в лесостепных и лесных регионах [10-11, 13]. Формирующиеся на залежах молодые лесные насаждения рассматриваются как перспективные объекты для секвестрации атмосферного углерода [12, 22], что соответствует глобальной роли восстанавливающихся лесов в смягчении климатических изменений [21, 27; 29].

Исследования показывают, что динамика углеродного баланса в постагрогенных экосистемах носит сложный характер и зависит от множества факторов: возраста насаждений [5, 9], породного состава [31], климатических условий [17], типа почв [25] и проводимых лесохозяйственных мероприятий [18]. В частности, прореживание является ключевым инструментом управления структурой и продуктивностью молодняков. Однако его влияние на углеродный цикл неоднозначно. В краткосрочной перспективе прореживание закономерно снижает чистую продукцию экосистемы (NEP) и общие запасы надземного углерода из-за прямого удаления части биомассы деревьев [16, 28]. В то же время, в долгосрочной перспективе (от 10 лет и более) прореживание создает условия для ускоренного роста оставшихся деревьев и способствует перераспределению углерода в более стабильные пулы [24, 32].

Важным компонентом углеродного обмена в лесных экосистемах является почвенное дыхание (эмиссия CO_2 из почвы), на которое существенно влияют температура и влажность почвы [3, 6]. При этом травяной ярус под пологом леса может выступать как дополнительный сток углерода в результате фотосинтеза.

Несмотря на значительное число работ, посвящённых общей динамике углерода на залежах [9, 22, 35] и влиянию отдельных факторов на нее [4, 20], все еще недостаточно комплексных исследований, оценивающих синхронную реакцию таких экосистемных показателей, как ростовые процессы древостоя, динамика нижних ярусов и почвенно-атмосферный газообмен, на лесохозяйственные мероприятия в молодых березняках на залежах. Особую актуальность приобретают исследования с применением современных методов мониторинга, таких как высокочастотные измерения потоков парниковых газов, позволяющие получить детальную количественную оценку процессов.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния лесохозяйственных мероприятий на газообмен CO_2 в почвенно-приземном комплексе в условиях молодого березняка, сформировавшегося на залежи в широколиственно-лесной зоне. В задачи работы входили анализ сезонной динамики потоков CO_2 (чистого экосистемного обмена и дыхания экосистемы) камерным методом и сравнительная оценка эффективности различных вариантов прореживания с точки зрения эмиссии углекислого газа.

Полученные результаты позволят усовершенствовать рекомендации по лесохозяйственному управлению залежными землями для повышения их климатического потенциала.

[1] Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2024 году. Москва: ФГБНУ «Росинформагротех»; 2025: 384 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа проводилась на участке «Мишкино» Евразийского карбонового полигона, расположенного в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья. Район исследования находится на границе Прибельской увалисто-волнистой равнины и Уфимского плато (рис. 1а). Климат территории умеренно континентальный. Среднегодовая температура воздуха +0,2°С, средняя месячная температура самого холодного месяца (январь) –20,9°С, самого тёплого (июль) +25°С. Рельеф участка выровненный, максимальный перепад высот составляет 16 м (235–251 м над уровнем моря), угол склона – 0,4°. Почвы преимущественно тёмно-серые среднесуглинистые среднемощные.

Преобладающий тип растительности на территории карбоновой фермы – длительно-производные березовые молодые леса из берёзы повислой (*Betula pendula* Roth) с небольшой примесью других древесных пород в подросте. В ноябре 2023 года в западной части участка было заложено 7 круговых пробных площадей диаметром 30 м, включая контроль.

На предварительном этапе на всех пробных площадях были рассчитаны таксационные характеристики древостоя березы: проведен полный перечёт живого древостоя и сухостоя по ступеням толщины деревьев на уровне груди (1,3 м) с градацией 2 см. Средняя высота берёзового древостоя в 2023 года составляла 16,3 м, средний диаметр стволов – 8–12 см, возраст по данным дендрохронологического анализа – 23–25 лет. Древостой характеризовался высокой густотой: число сухостоя составляло от 20 до 40%, а плотность живых деревьев – от 2300 до 3700 шт./га. Расположение опытных площадок представлено на рис. 1б.

Опыт включал изучение влияния прореживания древостоя на динамику эмиссии и поглощения CO_2 в почвенно-приземном комплексе, включающую суммарный поток CO_2 от поверхности: поглощение CO_2 в процессе фотосинтеза травянистого яруса, дыхание почвенных микроорганизмов и разложение подстилки (гетеротрофное дыхание), а также дыхание корней травянистых растений и древесного яруса, пронизывающих верхний слой почвы. Чистый экосистемный обмен (NEE) в нашем случае относится только к этому компоненту, а не ко всей лесной экосистеме, так как фотосинтез и дыхание крон деревьев не учитывались.

Схема опытов по прореживанию включала два варианта целевой плотности древостоя: 800 и 1000 шт./га (табл. 1). При проведении рубок ухода в первую очередь удалялся сухостой и живые деревья диаметром менее 12 см, затем проводилось дополнительное изреживание до заданной густоты. Срубленная древесина убиралась за пределы площадок. Состояние напочвенного покрова на опытных участках в 2025 году показано на рис. 2. За два года в зависимости от степени прореживания древостоя отмечено развитие травяного яруса и увеличение его проективного покрытия с 1-5 до 25-50% (табл. 1).

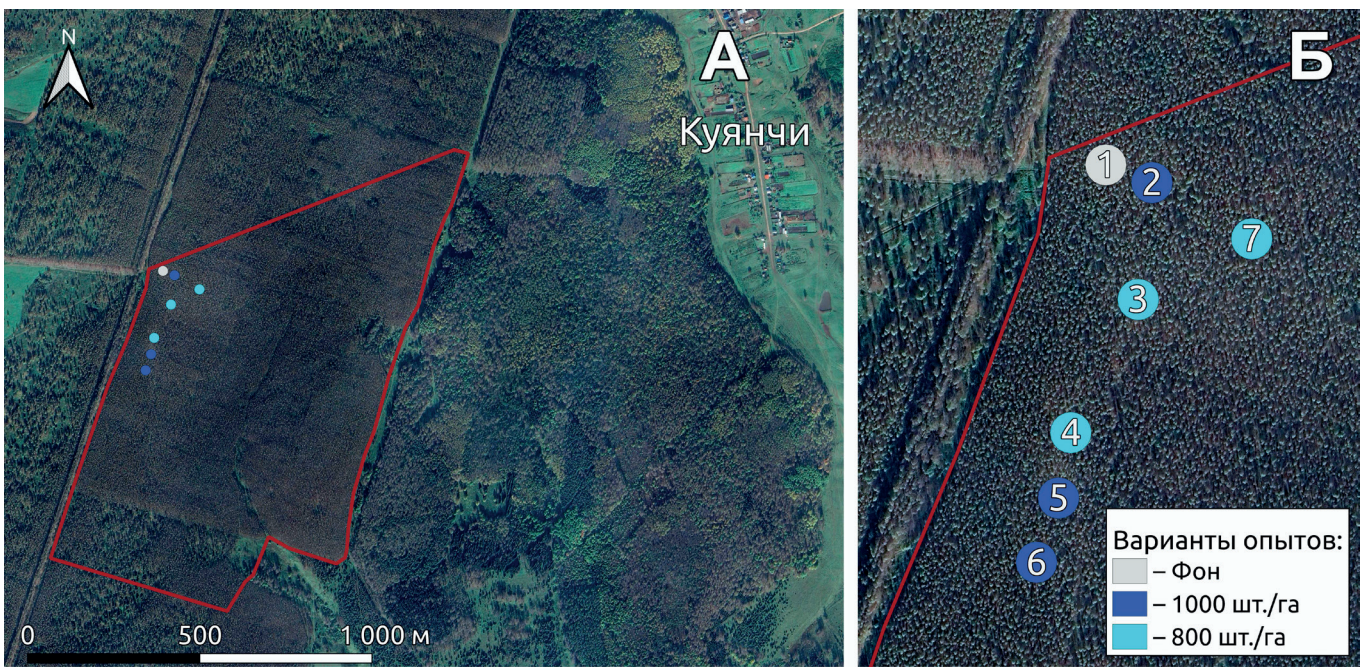


Рис. 1. Участок карбонового полигона «Мишкино»: А – местонахождение участка; Б - размещение круговых пробных площадей на территории участка. 1 – контроль; 2, 5, 6 – вариант опыта с количеством деревьев после прореживания до 1000 шт./га; 3, 4, 7 – вариант опыта с количеством деревьев после прореживания до 800 шт./га (Google satellite 2023)

Табл. 1.

Характеристики вариантов опытов по прореживанию древостоя на круговых пробных площадках

№ пробной площади	Характеристика древостоя			Характеристики травяного яруса (2025 год	
	Численность живых деревьев, шт./га		Проективное покрытие древостоя, %	Проективное покрытие, %	Основные доминанты
	В пересчете на 1 га	На пробной площади			
1 (Контроль)	3607	255	85	1–5	*Fragaria vesca, Pyrola minor*
Вариант опыта с численностью деревьев 1000 шт./га после прореживания					
2	1000	71	70	35	*Calamagrostis arundinacea, Fragaria vesca, Galium odoratum, Poa pratensis*
5	1000	71	70	25	
6	1000	71	65	30	
Вариант опыта с численностью деревьев 800 шт./га после прореживания					
3	800	57	50	55	*Fragaria vesca, Stellaria holostea, Calamagrostis arundinacea, Galium album, Geum urbanum, Galium odoratum*
4	800	57	55	50	



Рис. 2. Состояние напочвенного покрова на пробных площадях в 2025 г.: А – контроль, Б – вариант с прореживанием до 1000 шт./га, В – вариант с прореживанием до 800 шт./га.

Измерения потоков диоксида углерода проводились с апреля по сентябрь 2025 года сотрудниками УИБ УФИЦ РАН и УГНТУ. Измерения проводились при помощи статического камерного метода с использованием портативного газоанализатора Li-Cor 7810 (Los Gatos Research, США, точность измерения концентрации 2 ppb по CH_4, CO_2 – 1,5 ppm, H_2O – 20 ppm). Частота измерения концентраций – 1 раз в секунду, продолжительность экспозиции – от 2 до 4 мин. в зависимости от величины потока. Для оценки скорости dc/dt (мг/кг $ч^{-1}$) изменения концентрации CO_2 и CH_4 в камере использовали метод наименьших квадратов, исходя из допущения о стационарности этого показателя в течение экспозиции. Поток (E, мгС $м^{-2}$ $ч^{-1}$) рассчитывали по формуле $E = (dc/dt \times V \times 12 \times 22.4^{-1})/s$, где V – объем воздуха в камере ($м^3$), s – площадь горизонтального сечения камеры ($м^2$) [1, 2]. Для определения средних величин потока с учетом их погрешностей применяли метод бутстрэпа [19]. Далее были рассчитаны среднее арифметическое и стандартное отклонение величин среднего, полученных в отдельных повторениях. Для выполнения расчетов использовали программный пакет MATLAB R2023a.

Измерения проводились прозрачными камерами и светонепроницаемыми – закрытыми чехлами из фольгированного пенополиэтилена, который дополнительно снижал их нагрев. Прозрачные камеры использовались для измерения чистого обмена диоксида углерода между экосистемой и атмосферой (NEE) – дневные потоки, непрозрачные для измерения ночного дыхания экосистемы (Reco). Камеры устанавливали на квадратные металлические основания площадью 0,16 $м^2$ с глубиной врезки в почву 10 см и площадью 0,36 $м^2$. В желоб основания, функционирующий как гидрозатвор, наливали отстоянную колодезную воду.

Всего обработано 826 измерений потоков CO_2 камерным методом, равномерно распределенных по типам экосистем (контрольные и опытные участки с прореживанием) и времени суток. Параллельно фик-

Табл. 2.

Число дневных и ночных часов, рассчитанных по данным ERA5-Land

Месяц	Дневных часов	Ночных часов	Всего часов
Май	416	328	744
Июнь	420	300	720
Июль	433	311	744
Август	380	364	744
Сентябрь	304	416	720
Октябрь	233	487	720
ИТОГО	2186	2206	4392

сировались метеорологические (солнечная радиация, температура и влажность воздуха) и почвенные (температура и влажность на глубине 5–10 см) параметры с помощью портативной метеостанции CAM-У и PWS800 для расчета удельных потоков. Для расчета среднемесячных дневных (NEE) и ночных (Reco) потоков в течении вегетационного сезона (с 1 мая по 30 октября) были рассчитаны количество дневных и ночных часов за каждый месяц. За данный период также были обработаны данные ERA5-Land hourly (Copernicus Climate Change Service, 2025) по солнечной радиации (surface_solar_radiation_downwards) с учетом облачности (табл. 2). Потоки считались ночными при солнечной радиации < 20 Вт/м², что соответствует условиям низкой освещённости, когда фотосинтез практически прекращается [30].

Дневные потоки CO_2 интерпретировались как чистый обмен экосистемы, принимающий как отрицательные (поглощение), так и положительные (эмиссия) значения, а ночные – исключительно как дыхание экосистемы (Reco) с положительными значениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период наблюдений (с мая по октябрь 2025 года) погодные условия обеспечивали широкий диапазон температур и увлажнения, в котором формировались потоки CO_2. Среднемесячная температура воздуха под пологом древостоя возрастала от 6,6°С в мае до максимума 18,3°С в июле, после чего постепенно снижалась до 1,8°С в октябре (рис. 3).

Температура почвы повторяла этот тренд с несколько меньшей амплитудой: от 4,1°С в мае до 18,5°С в июле–августе. Наиболее тёплым и влажным оказался период июнь–август, когда сумма осадков достигала 105–113 мм/мес. при среднемесячных температурах воздуха 17,6°С–18,3°С, что создавало благоприятные условия для высокой биологической активности почвы. В июле и октябре, напротив, наблюдался дефицит увлажнения (30 мм/мес.) на фоне умеренных температур, что ограничивало интенсивность эмиссии. Влагоемкость почвы (SWC – Soil Water Content) на протяжении вегетационного периода (с апреля по октябрь) оставалась в диапазоне 0,39–0,40 м³/м³ с кратковременными просадками в июле (до ~0,385) – в период дефицита осадков. Осенью значения стабилизировались на уровне 0,39–0,40 м³/м³. Общий диапазон изменений невелик (~0,05 м³/м³), что свидетельствует о хорошей буферной ёмкости почвы на участке (рис. 3). Таким образом, сезонная динамика температуры и влажности формировала широкий диапазон абиотических условий, определявший сезонную изменчивость потоков CO_2 во всех вариантах опыта.

Значения чистого обмена CO_2 между экосистемой и атмосферой в светлое время суток (NEE) и дыхания экосистемы в ночное время (Reco) сильно варьировали между пробными площадями и в течение вегетационного сезона. Значение чистого обмена CO_2 (NEE) – это результат баланса двух противоположных процессов: поглощения CO_2 в процессе фотосинтеза (GPP – Gross Primary Production, валовая первичная продукция) и эмиссии CO_2 при дыхании самих растений (автотрофное дыхание) и почвы (гетеротрофное дыхание, в основном, разлагающих органику микроорганизмов). Анализ потоков CO_2 в почвенно-приземном комплексе под пологом древостоя во всех случаях показал постоянную эмиссию CO_2 вне зависимости от месяца и времени суток (табл. 3).

Тем не менее значения чистого обмена CO_2 между экосистемой и атмосферой (NEE) и дыхания экосистемы (Reco) значительно варьировали между вариантами опыта и месяцами (табл. 3, 4). Во всех вариантах NEE были положительными на протяжении всего вегетационного периода, что свидетельствует о доминировании дыхания в почвенно-приземном комплексе над поглощением CO_2. Минимальные значения NEE и Reco фиксировались в мае и октябре, когда температура воздуха и почвы была наименьшей, а фотосинтетическая активность травостоя невысока (рис. 4, 5). Максимумы приходились на середину сезона, совпадая с периодом наибольшего прогрева почвы и благоприятного увлажнения (июль–август), что согласуется с литературными данными [14].

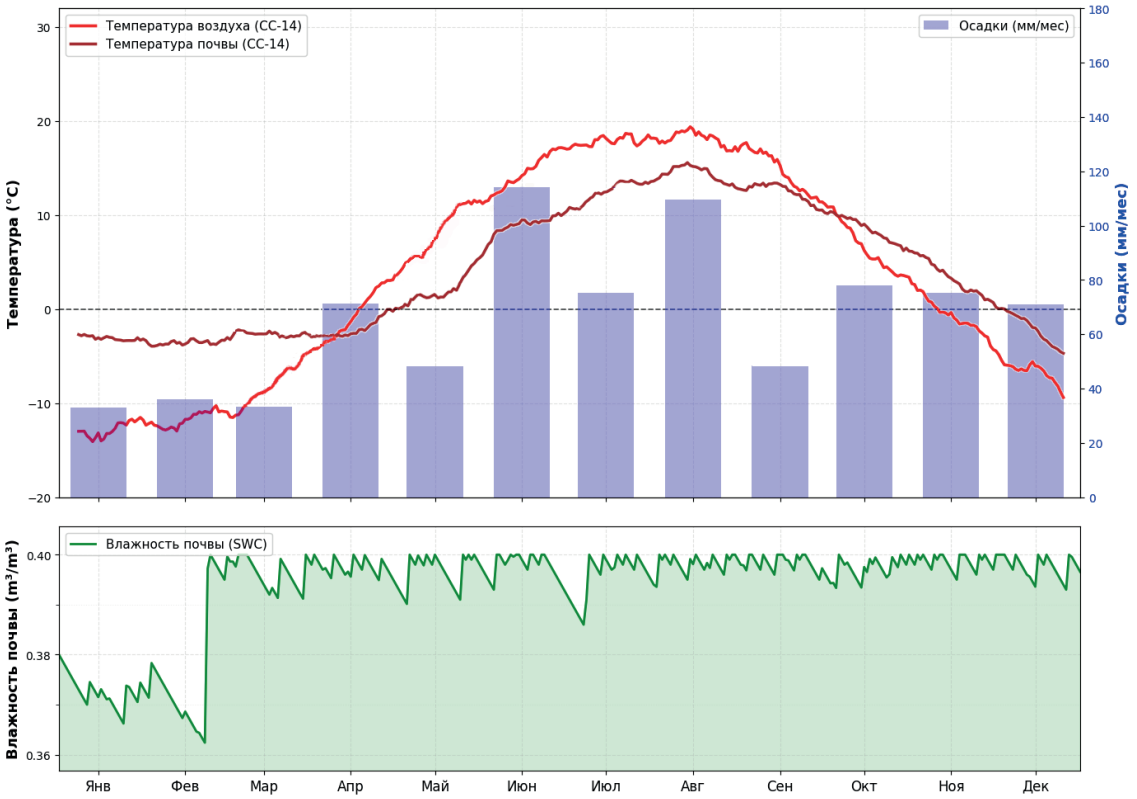


Рис. 3. Сезонный ход климатических и почвенных параметров на исследованной постагрогенной залежи с берёзовым древостоем в 2025 году.

Табл. 3.

Средние удельные потоки углекислого газа на зарастающих березой залежах, (мгС·м⁻² ч⁻¹) ± SD

Условия	Показатель	Месяц						Среднее
		Май	*Июнь*	*Июль*	*Август*	*Сентябрь*	*Октябрь*	
Контроль	NEE	70±18	305±57	541±97	470±88	297±56	124±25	367±68
	Reco	285±51	430±78	575±104	529±100	356±68	184±35	454±83
Прореживание древостоя до 1000 шт./га	NEE	76±23	245±52	174±44	102±36	73±28	44±21	147±38
	Reco	259±53	381±72	285±60	189±47	181±41	174±35	281±57
Прореживание древостоя до 800 шт./га	NEE	120±23	270±49	120±23	477±85	266±49	55±13	274±50
	Reco	199±36	340±63	398±74	455±85	287±55	120±24	330±62

Табл. 4.

Суммарные потоки углекислого газа за месяц на зарастающих березой залежах в различных вариантах опытов, (гС·м⁻² месяц⁻¹) ± SD

Условия	Показатель	Месяц					
		Май	*Июнь*	*Июль*	*Август*	*Сентябрь*	*Октябрь*
Контроль	NEE	29±7	128±24	234±42	179±33	90±17	29±6
	Reco	93±17	129±23	179±32	193±36	148±28	90±17
Прореживание древостоя до 1000 шт./га	NEE	32±10	103±22	75±19	39±14	22±9	10±5
	Reco	85±17	114±22	89±19	69±17	75±17	85±17
Прореживание древостоя до 800 шт./га	NEE	50±10	113±21	52±10	181±32	81±15	13±3
	Reco	65±12	102±19	124±23	166±31	119±23	58±12

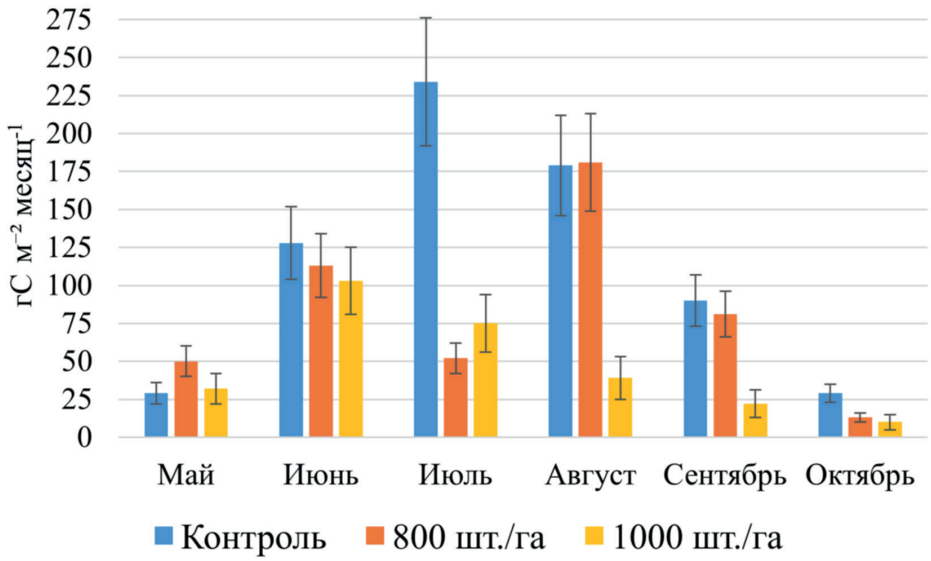


Рис. 4. Суммарные потоки углекислого газа за месяц в дневную фазу (NEE) на зарастающих березой залежах в различных вариантах опыта, (гС·м$^{-2}$ месяц$^{-1}$± SD).

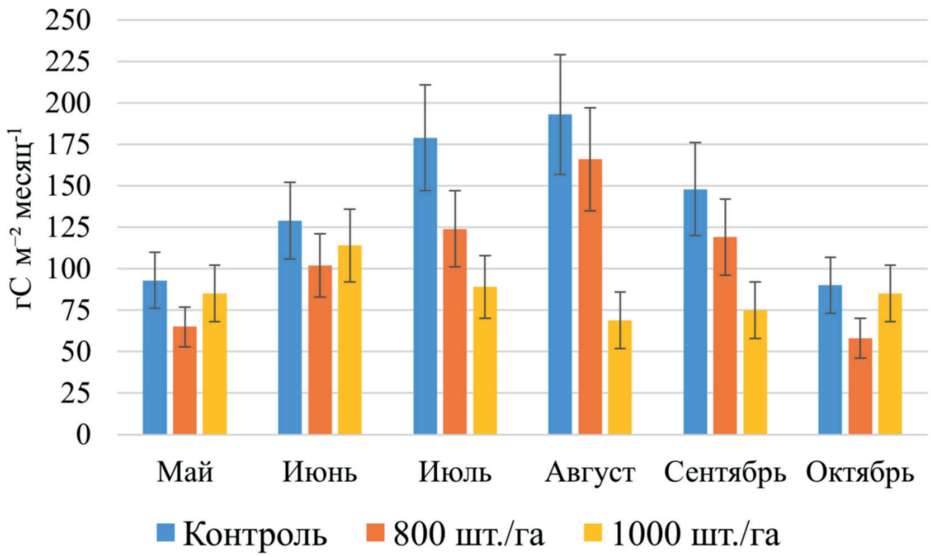


Рис. 5. Суммарные потоки углекислого газа за месяц в ночную фазу (Reco) на зарастающих березой залежах в различных вариантах опыта, (гС·м$^{-2}$ месяц$^{-1}$± SD).

Табл. 5.

Суммарный поток CO_2 за вегетационный сезон 2025 года в почвенно-приземном комплексе на зарастающих березой залежах в различных вариантах опыта

Условия	Показатель	Суммарный поток CO_2 за май–октябрь, гСм$^{-2}$	Суммарный нетто-экосистемный обмен за май–октябрь, гСм$^{-2}$
Контроль	NEE	689	1521
	Reco	832	
Прореживание древостоя до 1000 шт./га	NEE	281	798
	Reco	517	
Прореживание древостоя до 800 шт./га	NEE	490	1125
	Reco	635	

Примечание. NEE – дневные потоки, Reco – ночные потоки.

Контрольный участок демонстрировал высокие значения Reco летом, достигая максимума в июле, что отражает интенсивное дыхание почвенно-приземного комплекса в условиях максимального прогрева, достаточного увлажнения и практически полного отсутствия травяного яруса (рис. 4, 5). Прореживание древостоя приводило к снижению удельных потоков. По сравнению с контролем, вариант с плотностью древостоя 1000 шт./га характеризовался почти 2-4-кратным снижением NEE и Reco с июля по сентябрь, тогда как в варианте 800 шт./га уменьшение потоков было более умеренным (рис. 4, 5, табл. 3, 4), особенно в ночное время, что свидетельствует об усилении дыхания вследствие изменения структуры древостоя и увеличения количества легкоразлагаемого органического вещества.

Суммарный нетто-экосистемный обмен CO_2 в почвенно-приземном комплексе за период наблюдений (май–октябрь) во всех вариантах опыта ниже, чем в контроле (табл. 5). Опыт с прореживанием древостоя демонстрируют снижение суммарных потоков в 1,5-2 раза (табл. 5), что связано с развитием травяного покрова (табл. 1, рис. 2) в напочвенном покрове и увеличением фотосинтетической активности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевым результатом настоящей работы является выявление значимого влияния прореживания древостоя на удельные и суммарные потоки CO_2 в почвенно-приземном комплексе при близких климатических условиях. На контрольной площадке с березняком мертвопокровным, характеризующейся высокой сомкнутостью полога (≈85%) и практически отсутствующим травяным ярусом, удельные потоки NEE и Reco были максимальными (суммарный нетто-экосистемный обмен CO_2 в почвенно-приземном комплексе за май-октябрь достигал 689 гС·м$^{-2}$сезон$^{-1}$, ночное дыхание – 832 гС·м$^{-2}$сезон$^{-1}$). Это указывает на устойчивую роль гетеротрофного дыхания, активного разложения растительных остатков как источника CO_2 [15, 33] в условиях высокой плотности древостоя и практически полного отсутствия травяного покрова.

Прореживание древостоя до 1000 шт./га сопровождалось наиболее заметным снижением потоков: сезонный NEE уменьшался почти в 2–4 раза, а суммарные дневные и ночные потоки за летний период – в среднем на 50% по сравнению с контролем (рис. 4). При этом метеорологические условия в разных вариантах опыта были сходными: максимальные температуры воздуха и почвы приходились на июнь–август (≈18 °C), а суммарные осадки и почвенная влагоёмкость демонстрировали близкие величины на всех площадках. Следовательно, различия в газообмене обусловлены изменением структуры растительности.

Механизмом снижения NEE в варианте 1000 шт./га является активное развитие фотосинтетически активного травяного яруса под разреженным пологом при сохранении относительно высокой древесной составляющей, даже после прореживания. Увеличение проективного покрытия трав и их листовой поверхности на хорошо освещённых участках приводит к увеличению поглощения CO_2 в дневное время, тогда как снижение плотности деревьев и частичное уменьшение толщины подстилки ограничивает объём дыхания субстрата. В результате при тех же температурах почвы и сходной влагоёмкости (≈0,39–0,40 м^3/м^3) суммарный нетто-экосистемный обмен CO_2 в почвенно-приземном комплексе оказывается минимальной.

Данный вывод согласуется с результатами исследований в сосновых лесах Китая, где умеренное прореживание способствовало увеличению биомассы не только верхнего, но и нижнего яруса за счёт улучшения светового режима и почвенных условий [26]. Авторы отмечают, что увеличение освещённости и разнообразия подлеска являются ключевыми факторами, стимулирующими продуктивность нижних ярусов.

В варианте с более сильным прореживанием (800 шт./га) реакция была более сложной. Удельные потоки NEE и Reco в среднем снижались относительно контроля, однако летом фиксировались высокие положительные значения NEE, сопоставимые с контролем, прежде всего в августе (477±85 мгС·м$^{-2}$·ч$^{-1}$). Подобное увеличение эмиссии можно объяснить благоприятным сочетанием абиотических факторов: август характеризовался относительно обильными осадками сезона (113 мм/мес.) при высокой температуре почвы (≈18 °C) и влажностью почвы 0,39-0,40 м^3/м^3, оптимальными для микробной активности. В этот же период происходит отмирание надземной части травяного покрова, обильно развившегося под пологом разреженного древостоя, что обеспечивало дополнительный приток свежего лабильного органического вещества в верхние горизонты почвы и подстилку. В таких условиях поступление большого количества легкоразлагаемого растительного материала могло стимулировать гетеротрофное дыхание микроорганизмов и усиливать эмиссию CO_2, частично компенсируя эффект повышения фотосинтеза трав. Подобный кратковременный всплеск эмиссии после нарушения древостоя описан и в других исследованиях по березовым и хвойным молоднякам [16, 28]. Однако, как показывают долгосрочные исследования, в перспективе (10 лет и более) прореживание способствует перераспределению углерода в более стабильные пулы и может повысить общий секвестрационный потенциал насаждения [32].

Связь потоков CO_2 с температурой и увлажнением хорошо согласуется с результатами многолетних работ по почвенному дыханию в умеренном климате. Максимумы Reco и NEE во всех вариантах приходят-

ся на период сочетания высоких температур воздуха и почвы (≈18°C) и достаточного увлажнения почвы, когда отсутствует дефицит влаги. Весной и осенью снижение потоков сопровождается понижением температуры и, в меньшей степени, уменьшением доступной влаги. При этом межвариантные различия по NEE и Reco сохраняются на протяжении всего сезона, что позволяет рассматривать структуру насаждения и развитие травяного яруса как доминирующий фактор регулирования газообмена на временном горизонте первых лет после прореживания.

Полученные значения NEE в почвенно-приземном комплексе сопоставимы с данными по другим постагрогенным березнякам, где при низком проективном покрытии трав NEE устойчиво положителен, а по мере развития травяного яруса возможен переход к околонулевому или слабостоковому режиму [23, 34]. При увеличении проективного покрытия травяного яруса (в нашем случае – за счет инсоляции) возможны околонулевые или слабоотрицательные значения NEE. Осенью же может наблюдаться положительный рост NEE, связанный с разложением свежего опада и усилением гетеротрофного дыхания [7].

В нашем случае контрольная площадка с минимальным травостоем демонстрировала максимальную эмиссию CO_2, тогда как умеренное прореживание до 1000 шт./га переводило систему в состояние заметно меньшего источника углерода при сохранении функций древесного яруса.

Важно отметить, что NEE, измеренное камерным методом в данном исследовании, не эквивалентно чистой экосистемной продуктивности всей экосистемы, поскольку учитывает только травяной ярус и почвенно-подстилочный комплекс, но не включает фотосинтез древесного яруса. По данным Кургановой и др. [8], эмиссия CO_2 из почвы под древесной растительностью за летний сезон составила 268–282 гСм$^{-2}$, в то время как чистая экосистемная продуктивность (NEE), измеренная методом турбулентных пульсаций в разнотравном березняке летом 2024 г., была отрицательной и составила -2,14 гСм$^{-2}$, а общий сток углерода за июнь–август 2024 г. оценивался в 160–180 гСм$^{-2}$. Эти данные подтверждают, что зарастающие березой бывшие пахотные земли являются устойчивым стоком углерода, способствуя снижению парникового эффекта [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа, выполненная в контексте актуальной проблемы повышения углеродного потенциала экосистем заброшенных сельскохозяйственных земель, подтвердила, что управление их структурой через прореживание является эффективным инструментом воздействия на углеродный баланс. В связи с поставленной целью оценки влияния прореживания на нетто-экосистемный обмен CO_2 установлено, что прореживание древостоя до целевой плотности 1000 шт./га способствует наиболее существенному снижению удельных потоков углекислого газа в почвенно-приземном комплексе по сравнению с контролем, что объясняется развитием фотосинтетически активного травяного яруса. В то же время, прореживание до 800 шт./га в летний период может приводить к относительно высоким значениям чистого экосистемного обмена, вероятно, из-за усиления дыхательных процессов на фоне накопления легкоразлагаемой органики.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке природно-климатических проектов. Однако, учитывая длительность экосистемных откликов, для выявления устойчивых закономерностей и оптимизации режимов ухода необходим более продолжительный цикл наблюдений.

Финансирование. *Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на тему «Оценка объёма эмиссии и поглощения парниковых газов репрезентативными типами экосистем на участках Евразийского карбонового полигона и поиск оптимальных технологических решений для декарбонизации Республики Башкортостан» (Номер для публикаций: FEUR-2024-0007).*

ЛИТЕРАТУРА

Список русскоязычной литературы

1. Глаголев МВ, Сабреков АФ, Казанцев ВС. Измерение газообмена на границе почва/атмосфера. Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета; 2010.
2. Глаголев МВ, Филиппов ИВ. Измерение потоков парниковых газов в болотных экосистемах. Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет; 2011.
3. Дёмин ЕА, Миллер СС. Влияние температуры и влажности почвы на продуцирование диоксида углерода под действием различных способов основной обработки в условиях Зауралья. Зерновое хозяйство России. 2025;17(1):98-105. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-98-105.

4. Дубровина ИА, Мошкина ЕВ, Туюнен АВ, Геникова НВ, Карпечко АЮ, Медведева МВ. Динамика свойств почв и экосистемные запасы углерода при разных типах землепользования (средняя тайга Карелии). Почвоведение. 2022;(9):1112-1125. DOI: 10.31857/S0032180X22090052.
5. Карелин ДВ, Люри ДИ, Горячкин СВ, Лунин ВН, Кудиков АВ. Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи. Почвоведение. 2015;(11):1354. DOI: 10.7868/S0032180X1511009X.
6. Курганова ИН, Лопес де Гереню ВО, Мякшина ТН, Сапронов ДВ, Хорошаев ДА, Аблеева ВА. Температурная чувствительность дыхания почв луговых ценозов в зоне умеренно-континентального климата: анализ данных 25-летнего мониторинга. Почвоведение. 2023;(9):1059-1076. DOI: 10.31857/S0032180X23600476.
7. Курганова ИН, Лопес Де Гереню ВО, Хорошаев ДА, Мякшина ТН, Сапронов ДВ, Жмурин ВА, Кудеяров ВН. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-Террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов. Почвоведение. 2020; (10):1220-1236. DOI 10.31857/S0032180X20100111.
8. Курганова ИН, Маханцева ВА, Лебедева ТН, Лопес Де Гереню ВО, Кивалов СН, Волкова ТЮ, Ходжаева АК, Сапронов ДВ, Хорошаев ДА, Соколов ДА, Зинякова НБ, Митрохина ЕС, Личко ВИ, Семенов ВМ. Оценка основных пулов и потоков углерода в экосистеме постагрогенного березового леса на эколого-климатической станции «Пущино». Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.А. Ковды, г. Пущино. 2024:17-19.
9. Наквасина ЕН, Шумилова ЮН. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях. Изв. вузов. Лесн. журн. 2021;(1):46-59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.
10. Перепечина ЮИ, Глушенков ОИ, Корсиков РС. Оценка лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения в Брянской области. Лесотехнический журнал. 2015;5(1):74-84. DOI 10.12737/11265.
11. Терехин ЭА. Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022;86(4):594-604. DOI: 10.31857/S2587556622040112.
12. Туктамышев ИР, Федорова ЮА, Федоров НИ, Широких ПС. Закономерности современного использования заброшенных сельскохозяйственных земель в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Республики Башкортостан. Экобиотех. 2022;5(3):152-160. DOI: 10.31163/2618-964X-2022-5-3-152-160.
13. Халилов ИИ, Хуснутдинов ИИ, Мирсияпов НИ, Гайсин РХ, Мухаметшина АР, Мусин ХГ. Изучение произрастания основных лесообразующих пород на неиспользуемых землях сельскохозяйственного назначения Республики Татарстан в контексте лесомелиорации и лесоразведения. International agricultural journal. 2025;68(2):679-700. DOI: 10.55186/25880209_2025_9_2_21.
14. Чумбаев АС, Прохорова НА, Миллер ГФ, Шарков ИН. Эмиссия CO2 из почв репрезентативных экосистем лесостепи Западной Сибири. Материалы международной конференции «Enviromis 2024». Томск. 2024:115-118.

Общий список литературы/Reference List

1. Glagolev MV, Sabrekov AF, Kazantsev VS. [Measuring gas exchange at the soil/atmosphere interface]. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta; 2010.
2. Glagolev MV, Filippov IV. [Measuring greenhouse gas fluxes in wetland ecosystems]. Khanty-Mansiysk: Yugorskiy gosudarstvennyy universitet; 2011.
3. Demin EA, Miller SS. [The influence of soil temperature and moisture on carbon dioxide production under various primary tillage methods in the Trans-Urals region]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2025;17(1):98-105. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-96-1-98-105.
4. Dubrovina IA, Moshkina EV, Tuyunen AV, Genikova NV, Karpechko AYu, Medvedeva MV. [Dynamics of soil properties and ecosystem carbon stocks under different types of land use (middle taiga of Karelia)]. Pochvovedenie. 2022;(9):1112-1125. DOI: 10.31857/S0032180X22090052.
5. Karelin DV, Lyuri DI, Goryachkin SV, Lunin VN, Kudikov AV. [Changes in soil carbon dioxide emission during post-agrogenic succession in the chernozem forest-steppe]. Pochvovedenie. 2015;(11):1354. DOI: 10.7868/S0032180X1511009X.
6. Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO, Myakshina TN, Sapronov DV, Khoroshev DA, Ableeva VA. [Temperature sensitivity of soil respiration in meadow communities in the temperate continental climate zone: analysis of 25-year monitoring data]. Pochvovedenie. 2023;(9):1059-1076. DOI: 10.31857/S0032180X23600476.

7. Kurganova IN, Lopes De Gerenyu VO, Khoroshev DA, Myakshina TN, Sapronov DV, Zhmurin VA, Kudeyarov VN. [Analysis of long-term dynamics of soil respiration in forest and meadow communities of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in light of modern climate trends]. Pochvovedenie. 2020;(10):1220-1236. DOI 10.31857/S0032180X20100111.
8. Kurganova IN, Makhantseva VA, Lebedeva TN, Lopes De Gerenyu VO, Kivalov SN, Volkova TYu, Khodzhaeva AK, Sapronov DV, Khoroshev DA, Sokolov DA, Zinyakova NB, Mitrokhina ES, Lichko VI, Semenov VM. [Assessment of the main carbon pools and fluxes in the ecosystem of post-agrogenic birch forest at the Pushchino ecological and climatic station]. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya chl.-korr. AN SSSR V.A. Kovdy, g. Pushchino. 2024;17-19.
9. Nakvasina EN, Shumilova YuN. [Dynamics of carbon stocks during forest formation on post-agrogenic lands]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 2021;(1):46-59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.
10. Perepechina YuI, Glushenkov OI, Korsikov RS. [Assessment of forests located on agricultural lands in the Bryansk region]. Lesotekhnicheskiy zhurnal. 2015;5(1):74-84. DOI 10.12737/11265.
11. Terekhin EA. [Features of reforestation on fallow lands of the Central Russian forest-steppe]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2022;86(4):594-604. DOI: 10.31857/S2587556622040112.
12. Tuktamyshev IR, Fedorova YuA, Fedorov NI, Shirokikh PS. [Patterns of modern use of abandoned agricultural lands in the broadleaf forest and forest-steppe zones of the Republic of Bashkortostan]. Ekobiotekh. 2022;5(3):152-160. DOI: 10.31163/2618-964X-2022-5-3-152-160.
13. Khalilov II, Khusnutdinov II, Mirsiyapov NI, Gaysin RKh, Mukhametshina AR, Musin KhG. [Study of the growth of the main forest-forming species on unused agricultural lands of the Republic of Tatarstan in the context of forest reclamation and afforestation]. International agricultural journal. 2025;68(2):679-700. DOI: 10.55186/25880209_2025_9_2_21.
14. Chumbaev AS, Prokhorova NA, Miller GF, Sharkov IN. [CO2 emission from soils of representative forest-steppe ecosystems of Western Siberia]. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Enviromis 2024». Tomsk. 2024:115-118.
15. Angst G, Pokorný J, Mueller CW, Prater I, Preusser S, Kandeler E, Meador T, Straková P, Hájek T, van Buiten G, Angst Š. Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation. Soil Biology and Biochemistry. 2021;159:108302. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108302.
16. Aun K, Kukumägi M, Varik M, Becker H, Aosaar J, Uri M, Buht M, Uri V. Short-term effect of thinning on the carbon budget of young and middle-aged silver birch (Betula pendula Roth) stands. Forest Ecology and Management. 2021;480:118660. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118660.
17. Chen Z, Yu G, Wang Q. Effects of climate and forest age on the ecosystem carbon exchange of afforestation. J. For. Res. 2020;31:365-374. DOI: 10.1007/s11676-019-00946-5.
18. Cojzer M, Diaci J, Brus R. Tending of Young Forests in Secondary Succession on Abandoned Agricultural Lands: An Experimental Study. Forests. 2014;5(11):2658-2678. DOI: 10.3390/f5112658.
19. Davison AC, Hinkley DV. Bootstrap methods and their application. Cambridge: Cambridge University Press; 1997. 582 p.
20. Dłużewski P, Wiatrowska K, Kuśmierz S. The Role of Stand Age in Soil Carbon Dynamics in Afforested Post-Agricultural Ecosystems: The Case of Scots Pine Forests in Dfb-Climate Zone. Forests. 2024;15(12):2127. DOI: 10.3390/f15122127.
21. Fayet CMJ, Reilly KH, Van Ham C, Verburg PH. What is the future of abandoned agricultural lands? A systematic review of alternative trajectories in Europe. Land Use Policy. 2022;112:105833. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105833.
22. Fedorov N, Shirokikh P, Zhigunova S, Baisheva E, Tuktamyshev I, Bikbaev I, Urazgildin R, Kulagin A, Suleymanov R, Gabbasova D, Muldashev A, Maksyutov S. Dynamics of Biomass and Carbon Stocks during Reforestation on Abandoned Agricultural Lands in Southern Ural Region. Agriculture. 2023;13(7):1427. DOI: 10.3390/agriculture13071427.
23. Gawęda T, Błońska E, Małek S. Soil Organic Carbon Accumulation in Post-Agricultural Soils under the Influence Birch Stands. Sustainability. 2019;11(16):4300. DOI: 10.3390/su11164300.
24. Gong C, Tan Q, Liu G, Xu M. Forest thinning increases soil carbon stocks in China. Forest Ecology and Management. 2021;482:118812. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118812.
25. Lagomarsino A, Elio Agnelli A. Influence of vegetation cover and soil features on CO2, CH4 and N2O fluxes in northern Finnish Lapland. Polar Science. 2020;24:100531. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100531.
26. Liu F, Liu X, Zeng M, Li J, Tan C. Thinning Effects on Aboveground Biomass Increments in Both the

Overstory and Understory of Masson Pine Forests. Forests. 2024;15(7):1080. DOI: 10.3390/f15071080.
27. McGunnigle NK, Bardsley DK, Nuberg IK. Re-wilding in the developing world as an alternative development pathway: The example of forest regeneration in the middle hills of Nepal. Environmental Development. 2025;55:101225. DOI: 10.1016/j.envdev.2025.101225.
28. Meng Y, Zhang Y, Li C, Wang Z, Li Y. The Effect of Thinning Management on the Carbon Density of the Tree Layers in Larch--Birch Mixed Natural Secondary Forests of the Greater Khingan Range, Northeastern China. Forests. 2022;13(7):1035. DOI: 10.3390/f13071035.
29. Pan Y, Birdsey RA, Phillips OL, Houghton RA, Fang J, Kauppi PE, Keith H, Kurz WA, Ito A, Lewis SL, Nabuurs G, Shvidenko A, Hashimoto S, Lerink B, Schepaschenko D, Castanho A, Murdiyarso D. The enduring world forest carbon sink. Nature. 2024;631:563-569. DOI: 10.1038/s41586-024-07602-x.
30. Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havránková K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. Global Change Biology. 2005;11:1424-1439.
31. Rytter RM, Rytter L. Carbon sequestration at land use conversion – Early changes in total carbon stocks for six tree species grown on former agricultural land. Forest Ecology and Management. 2020;466:118129. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118129.
32. Sandim A, Lopes D, Louzada JL, Silva ME. Influence of Thinning on Carbon Balance in Natural Regeneration of Pinus pinaster in Portugal. Land. 2025;14(3):493. DOI: 10.3390/land14030493.
33. Skovsgaard JP, Johansson U, Holmström E, Tune RM, Ols C, Attocchi G. Effects of Thinning Practice, High Pruning and Slash Management on Crop Tree and Stand Growth in Young Even-Aged Stands of Planted Silver Birch (Betula pendula Roth). Forests. 2021;12(2):225. DOI: 10.3390/f12020225.
34. Varik M, Kukumägi M, Aosaar J, Becker H, Ostonen I, Lõhmus K, Uri V. Carbon budgets in fertile silver birch (Betula pendula Roth) chronosequence stands. Ecological Engineering. 2015;77:284-296. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.041.
35. Voicu M, Shaw C, Kurz W, Huffman T, Liu J, Fellows M. Carbon dynamics on agricultural land reverting to woody land in Ontario, Canada. Journal of Environmental Management. 2017;193:318-325. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.019.



УДК 504.75 || EDN UFAFAU
CC BY-NC 4.0
© А.М. Жамбиков; ФНИ «XXI век»

ПРОБЛЕМЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ В НИГЕРИИ

А.М. Жамбиков
Институт Африки РАН, Москва, Россия
Эл. почта: aleksandrzhambikov@gmail.com
Статья поступила в редакцию 27.03.2026; принята к печати 04.05.2026

Нигерия является крупнейшей по численности населения страной Африки и обладает богатыми водными ресурсами, однако на данный момент не обеспечивает очищенной водой часть своих жителей. Водные ресурсы распределены по территории страны неравномерно, влажные южные штаты обеспечены водой намного лучше полуаридных или аридных северных. В городах Нигерии имеются водоочистные станции, которые испытывают ряд проблем, включая регулярные отключения электроэнергии, повреждения водопровода, несоответствие мощностей станций растущим потребностям городов, необходимость ремонта и модернизации оборудования, а также повышения квалификации персонала. В сельской местности часть населения не имеет доступа к чистой воде, что требует самостоятельной очистки воды домохозяйствами. Для этого в воду добавляют квасцы или хлорные соединения, используют кипячение, фильтрацию через ткань или фильтры, а также отстаивание и осаживание воды. Вопрос очистки воды имеет социально-экономический аспект, поскольку очищать воду могут себе позволить далеко не все домохозяйства. Заслуживает внимания наличие местных производств керамических фильтров, которые удаляют из воды патогены, но существенно не улучшают ее физико-химический состав. Федеральное правительство Нигерии стремится обеспечить водоснабжение растущего населения, о чем свидетельствует строительство водоочистных станций и улучшение доступа жителей к чистой воде и санитарии. Однако, наблюдаются серьезные проблемы, в частности, в результате антропогенного загрязнения водоемов и других источников, которые становятся непригодными для забора воды.
Ключевые слова: *Африка, Нигерия, вода, водоочистка, водоочистная станция*

PROBLEMS OF WATER TREATMENT IN NIGERIA

А.М. Жамбиков
Институт Африки РАН, Москва, Россия
Email: aleksandrzhambikov@gmail.com

Nigeria is the most populous country in Africa, which, despite having abundant water resources, does not currently provide clean water to a part of its citizens. Water resources are unevenly distributed across the country, with the humid southern states being much richer in water than the semiarid or arid northern states. Water treatment plants in Nigerian cities face a number of problems including regular power outages, damage to water pipelines, mismatches between plant capacities and the growing demands of cities, and the need to repair and modernize equipment and to provide additional training for personnel. In rural areas, a part of the population has no access to clean water, requiring households to treat water themselves. To this end, they use alum or chlorine, boiling, filtration through cloth or filters, and sedimentation. The issue of water treatment has a socioeconomic aspect, as not all households can afford water treatment. Locally produced ceramic filters remove pathogens from water but do not significantly improve its physicochemical condition. The Federal Government of Nigeria is striving to provide clean water to its growing population, as evidenced by the construction of water treatment plants and the improvement of access to clean water and sanitation. However, there are serious problems, specifically the anthropogenic pollution of water bodies and other sources, making them unsuitable for water intake.
Keywords: *Africa, Nigeria, water, water treatment, water treatment plant*

Введение

Одним из главных для жизнедеятельности человека ресурсов является вода. Согласно резолюции 64/292 «Право человека на воду и санитарию», принятой Генеральной ассамблеей ООН 28 июля 2010 года, каждый человек имеет право на доступ к воде для личных и бытовых нужд. Объем 50 л в сутки на человека считается необходимым количеством, 100 л – достаточным. При этом вода должна быть безопасной, приемлемой по качеству и цене (затраты на нее не должны превышать 3% доходов домохозяйств) [5, с. 68].

При этом обеспечение водой представляет собой ключевую проблему для Африканского континента, доля которого в населении планеты стабильно возрастает. В Африке, по состоянию на 2024 год, проживало более 1,5 млрд человек, что составляло 18,6% населения мира, при этом темпы роста ее населения (2,2%) были существенно выше среднемировых (0,8%)[1].

[1] Total Population, Rate of Population Change. World, Africa, Nigeria. 2024. UN Population Division. https://population.un.org/dataportal/data/indicators/49,51/locations/903,566,900/start/2024/end/2024/table/pivotbylocation?df=6d443c1d-89e3-4345-9a94-4f94e6e63cef

При сохранении текущих темпов роста удельный вес континента в населении Земного шара достигнет в 2035 году 21%, а в 2050 году – 26% [1, с.8].

Более 1/7 населения Африки (232,7 млн чел.) приходится на долю самой населенной страны – Нигерии, проблемы водоснабжения которой характерны и для других стран Африки. С одной стороны, в Нигерии неоднократно предпринимались попытки обеспечения населения питьевой водой, с другой – серьезные трудности сохраняются. Между тем, обеспечение населения чистой водой и средствами санитарии является одной из ключевых задач социально-экономического развития, от решения которой зависит благополучие жителей и ситуация в общественном здравоохранении.

В ходе исследования была предпринята попытка провести поиск и анализ данных, связанных с водной проблематикой Нигерии, выделить наиболее релевантные из них и представить для иллюстрации. Значительную роль в настоящей статье играют проведенные иностранными исследователями опросы населения, которые позволяют определить степень доступности для нигерийцев безопасной воды или используемые ими методы водоочистки. Приводятся показатели качества воды до и после прохождения через водоочистную станцию (*табл.*). Задействован рейтинг стран по водному стрессу.

В работе были проанализированы ключевые публикации, прямо или косвенно затрагивающие водные ресурсы Нигерии, на предмет выяснения главных трудностей в обеспечении этой страны чистой водой. В исследованиях нигерийских авторов представлена подробная информация об особенностях работы в Нигерии водоочистных станций, обеспечивающих питьевой водой крупные города, а также дана оценка качества воды и проанализированы различные аспекты водного кризиса, произошедшего в стране [9, 10, 12, 14, 15, 19]. Отдельные публикации посвящены методам очистки воды в сельской местности и основаны на результатах социологических опросов сельских жителей [6, 12]. Привлечена литература, в которой подробно рассматриваются различные аспекты использования керамических фильтров местного производства [8, 9, 17]. Труды отечественных исследователей [1–5] содержат полезную информацию и количественные показатели (например, обеспечение доступа населения к чистой воде) о Нигерии в сравнении с другими африканскими странами.

Цель настоящей статьи – выявить основные проблемы водоснабжения населения в Нигерии, в том числе установить основные пути загрязнения воды, а также особенности ее очистки.

Региональные особенности в распределении водных ресурсов

Общий объем наземных водных ресурсов Нигерии оценивается в 215 млрд м^3 [7, с. 73]. Ключевая водная артерия Нигерии – река Нигер, от которой страна берет свое название – третья (после Нила и Конго) по протяженности в Африке. Крупнейший приток Нигера – река Бенуэ, крупные – Сокото, Кадуна, Кунара. На северо-востоке Нигерии расположено озеро Чад – реликт древнего бессточного водоема [2, с. 15].

Водные ресурсы Нигерии распределены по ее территории неравномерно со значительными различиями между северными и южными частями страны. Почти все реки имеют дождевое питание в качестве основного (годовой объем осадков в стране составляет примерно 560 млрд м^3 [7, с. 74]), поэтому густота речной сети тесным образом связана со степенью их увлажнения в результате дождей [2, с.14]. В южных штатах, в которых произрастают тропические леса и наблюдается обильное выпадение осадков (*рис. 1*), в пресноводных источниках качество воды в целом выше, чем в северных штатах. Реки южной части страны, имеющие сток в Гвинейский залив, небольшие (длина 200–600 км), полноводные и бурные в период дождей и мелководные в остальное время года. Наиболее крупные из них – Кросс, Огун, Веме, Моно, Оян [2, с. 15]. Они имеют воду с более низким уровнем загрязнения по сравнению с реками на севере Нигерии, что может быть связано с обильной растительностью и высоким уровнем осадков [12, с.1].

Для северных регионов Нигерии характерен более низкий уровень осадков, преимущественно аридный или полуаридный климат, что создает условия для деградации водных ресурсов. Подземные воды на севере страны в скважинах и колодцах, как правило, отличаются более высоким, чем на юге, уровнем концентрации загрязнителей, таких как растворенные минералы и бактерии, из-за ограниченной природной фильтрации и большей концентрации загрязняющих веществ от экономической деятельности. Кроме того, поверхностные источники водоснабжения на севере, включая реки и водохранилища, в большей степени загрязняются из-за сельскохозяйственной деятельности, которая играет бóльшую роль в экономике, чем на юге, что также негативно влияет на качество воды [12, с. 6]. Реки северной части Нигерии (кроме бассейна р. Сокото) полноводны лишь в непродолжительный период дождей, в сухой сезон многие из них пересыхают и теряются в песках [2, с. 15]. Вместе с тем анализ зависимости распространения эпидемий от количества осадков по странам Африки продемонстрировал, что более влажные районы в большей степени подвержены распространению в водоемах патогенов, нежели аридные и полуаридные [4, с. 493].

Более того, диспропорции в инфраструктуре и доступе к чистой воде играют существенную роль в различиях между севером и югом Нигерии. Городские районы на юге обычно имеют более производительные водоочистные станции и лучшую инфраструк-

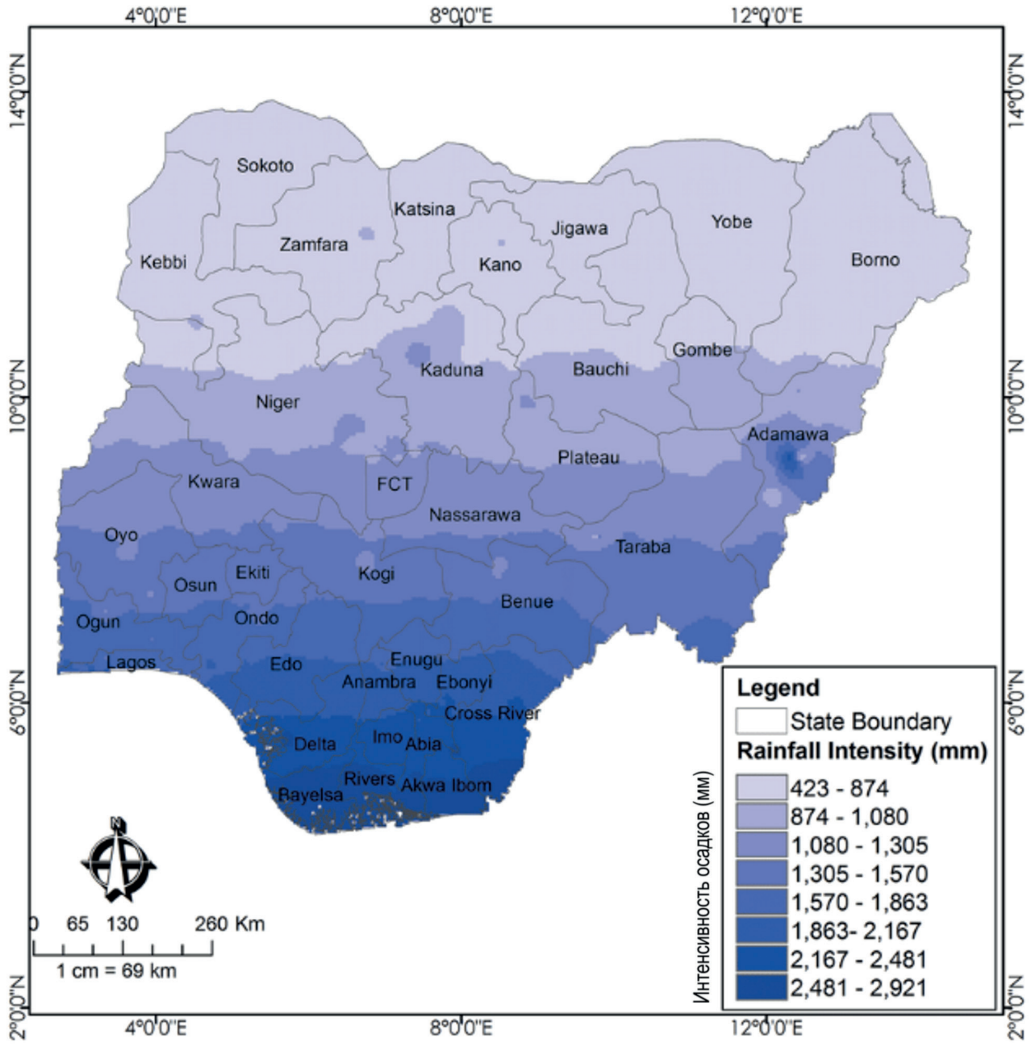


Рис. 1. Карта выпадения осадков в Нигерии (2017 г.). Источник: [16, с. 94].

туру по сравнению с городами в северных районах страны. Напротив, население сельских районов на севере Нигерии зачастую вынуждено набирать для питья и/или для хозяйственных нужд неочищенную и минимально очищенную воду из поверхностных источников, что повышает уязвимость жителей к передающимся через воду болезням и загрязнению в целом [12, с. 6].

Нигерия, по оценкам исследователей, обладает 87 млрд м^3 подземных вод[2], которые широко используются для снабжения населения питьевой водой и в хозяйственных целях. Качество грунтовых вод, как правило, хорошее. В южных районах подземные воды нередко насыщены железистыми соединениями и требуют перед употреблением предварительной фильтрации [2, с. 16]. Вместе с тем подземные водоносные горизонты как источник воды было бы неправильно переоценивать, ведь неконтролируемое бурение населением скважин может вызвать их прогрессирующее истощение.

Антропогенное загрязнение и заражение как основная проблема водных ресурсов Нигерии

Важным показателем состояния водного хозяйства страны является уровень водного стресса, свидетельствующий о степени недостатка водных ресурсов для удовлетворения потребностей человека, его хозяйственной деятельности и обеспечения функционирования экосистем. Он определяется как процентное соотношение величины ежегодного забора пресной воды к имеющимся ресурсам пресной воды [5, с. 67]. У Нигерии этот показатель оценивается как низкий (менее 10%), что свидетельствует о наличии у этой стра-

[2] 2050 Long-Term Vision for Nigeria. UN Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Nigeria_LTS1.pdf

ны внушительных водных ресурсов. Общий спрос на воду в Нигерии, по оценкам местных властей, составляет 5,93 млрд м^3 в год[2]. Нигерия занимает во всемирном рейтинге водного стресса 114-е место из 164[3].

Несмотря на обилие воды, Нигерия столкнулась с серьезным водным кризисом, который чрезвычайно трудно урегулировать, особенно принимая во внимание вызовы общественного здравоохранения и безопасности [12, с. 1]. Актуальными для страны являются проблемы доступа к чистой воде, а также отведения сточных вод. По сведениям Детского фонда ООН (ЮНИСЕФ), 11% населения страны набирает воду из источников без предварительной очистки и 5% – прямо из водоемов, 19% населения пользуются выгребными ямами и другими примитивными разновидностями туалетов, а еще 18% – практикуют дефекацию на открытой местности, что в условиях высокой плотности населения (236,6 чел. на км^2) создает условия для распространения передающихся через воду заболеваний [4, с. 489]. В сезоны дождей существует высокая вероятность загрязнения водоемов патогенами, что может приводить к распространению таких заболеваний, как холера, брюшной тиф, гепатит А, амебная и бактериальная дизентерия, трахома, а также кишечные гельминтозы и шистосомоз [4, с. 490–492].

Проблематика загрязнения водных ресурсов Нигерии отнюдь не исчерпывается заражением водоемов патогенами. Для штатов, расположенных в дельте реки Нигер, характерно химическое загрязнение водной среды. Многочисленные разливы нефти нанесли катастрофический ущерб сельскому хозяйству и рыболовству, а средняя продолжительность жизни в районах экологического бедствия составляет всего 41 год, что на десять лет меньше, чем в среднем по Нигерии[4].

При изучении водного хозяйства Нигерии важно учитывать уровень урбанизации страны – 54%[5]. В рамках настоящей статьи представляется целесообразным разделить рассмотрение очистки воды в Нигерии в городах на водоочистных станциях и в сельской местности, где очистка может проводиться как при централизованном заборе воды, так и на уровне домохозяйств.

Водоочистные станции

В ходе изучения работы водоочистных станций, работающих по классической схеме “аэрация – коагуляция – фильтрация – дезинфекция” (*рис. 2*), нигерийскими исследователями было выявлено, что функция очистки воды в целом выполняется. При этом была отмечена неэффективность некоторых станций в удалении загрязнителей, конкретно выражавшаяся в превышении установленных нормативов для отдельных показателей (*табл.*).

Станция в Майдугури (столица штата Борно на северо-востоке Нигерии) была построена китайской компанией и сдана в эксплуатацию в 1993 году. Ее мощность составляет 67 000 м^3 в сутки [11, с. 832]. В ходе исследований на этой станции было выявлено, что большинство автоматизированных систем не функционировали, поэтому внесение химических реагентов осуществлялось вручную, оборудование за прошедшие 30 лет не модернизировалось, при этом срок службы фильтрующих слоев вышел. Кроме того, плановое обслуживание и периодическая очистка систем, таких как камера аэрации, бассейн седиментации и подземные резервуары, не проводились, в результате чего в них наблюдался рост биологической пленки и загрязнение осадком [14, с. 10]. Отмечена и недостаточная эффективность работы станции Вукари-Иби (города в штате Тараба на востоке Нигерии) (табл. 1), причиной которой может быть неправильная дозировка коагулянта и дезинфицирующего средства в процессе очистки воды. Авторы вышеупомянутого исследования полагают, что недостаточное использование химических средств может объясняться неадекватным финансированием или невысоким уровнем квалификации персонала станции [19, с. 161].

Имеют место и трудности, связанные с быстрой урбанизацией – за последние десять лет доля городских жителей в населении Нигерии выросла на 8% [5]. Рост численности населения городов «перекрывает» существующие мощности водоочистных станций, что осложняется проблемами с подачей электричества, в частности, веерными отключениями. Недостаток мощностей отмечен на станции Лоуэр Усума, построенной японским подрядчиком в 80-е гг. XX в., которая снабжает водой столицу Нигерии Абуджу. Первоначально, в 1987 году мощность станции составляла 5 000 м^3 в час (120 000 м^3 в сутки), однако в 1992 году в связи с ростом потребления она была увеличена до 10 000 м^3 в час (240 000 м^3 в сутки) [10, с. 47].

Несмотря на это, чистой водой обеспечены только 42% населения столицы, что свидетельствует о необходимости увеличить мощность станции [10, с. 46]. В г. Майдугури 84% опрошенных в той или иной степени недовольны количеством водопроводной воды, которая подается всего лишь от одного до пяти часов в день в зависимости от сезона. Имеют место перерывы в водоснабжении сроком на два-три дня или даже на неделю, что может быть связано с перебоями в подаче электроэнергии. В некоторых районах г. Майду-

[3] 25 Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress. World Resources Institute. https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries

[4] Timeline: Half a Century of Oil Spills in Nigeria’s Ogoniland. Al Jazeera. 21.12.2022. https://www.aljazeera.com/features/2022/12/21/timeline-oil-spills-in-nigerias-ogoniland

[5] Urban Population (% of Total Population) – Nigeria. World Bank Group. https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=NG

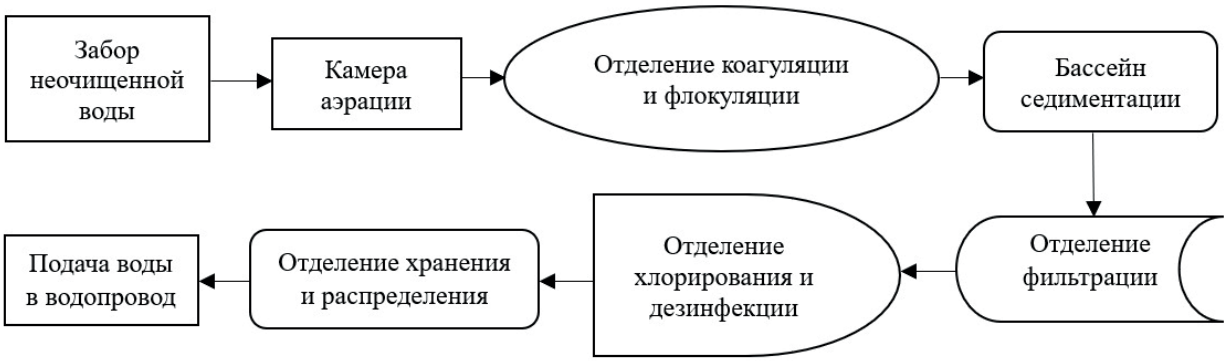


Рис. 2. Схема устройства водоочистной станции Вукари-Иби. Источник: [19, с. 156].

Табл. 1

Показатели воды до и после очистки на станции Вукари-Иби*

Показатели	Стандарты ВОЗ	До очистки	После очистки
pH	6,5–8,5	6,365	7,5
Цвет (единицы истинной цветности)	15	54,135	13,7
Мутность (нефелометрические единицы)	5	20,165	6,74
Концентрация растворенных веществ (мг/л)	500	633,38	427,02
Жесткость (мг/л)	150	212,81	148,73
Число колониеобразующих единиц бактерий кишечной палочки на 100 мл воды	10	42,35	17

*Источник: [19, с. 157].

гури подача воды отсутствует полностью из-за удаленности станции, перенаселенности города, низкого давления в трубах и их разрушения в результате строительных работ [14, с. 7]. В итоге более состоятельные жители (24,3%) пробурили собственные скважины, менее благополучные (31,7%) – были вынуждены покупать воду у торговцев [14, с. 7]. Оптимальным решением проблемы потребителями видится монтаж собственных резервуаров, которые нужно заполнять водопроводной водой в момент ее подачи и задействовать при необходимости. Однако попадание в резервуары патогенов может приводить к заражению воды, особенно при ее неправильном наборе и хранении. Как показали микробиологические исследования, в одном из образцов очищенной воды была обнаружена кишечная палочка (в контейнере для хранения водопроводной воды одного из домохозяйств) [14, с. 11]. Следствием такой практики могут стать вспышки кишечных заболеваний.

Наконец, как наиболее серьезную проблему, ведущую к существенному понижению качества водопроводной воды, рассматривают повреждения водопроводных труб, которые не только приводят к снижению давления и потере воды, но и к ее загрязнению в системе водоснабжения. Анализ воды после очистки и в кранах потребителей свидетельствовал, что загрязнение воды в водопроводе при распределении представляет серьезную угрозу для здоровья населения [19, с. 158]. Обветшание водопроводной системы, приведшее к появлению утечек, вероятнее всего, является результатом недостаточного внимания коммунальных служб к проблеме или отсутствия ресурсов для ее решения.

В ходе изучения станции Вукари-Иби выявлено, что в кранах потребителей мутность и численность кишечной палочки были значительно выше допустимых показателей, что может свидетельствовать о неспособности системы очистки воды в городе снизить концентрацию загрязнителей до уровня, безопасного для водопотребления. На станции отсутствует функциональная лаборатория, необходимая для анализа воды на каждом этапе очистки [19, с. 160]. Опрос населения в г. Майдугури показал, что 30% респондентов используют дополнительную очистку водопроводной воды. 15,5% опрошенных кипятят воду, 11% – используют ткань в качестве фильтра, 3,5% – добавляют в воду хлорные соединения для ее очистки [14, с. 8].

Таким образом, городские станции водоочистки выполняют свои функции, приводя в норму большинство параметров качества воды. Однако в их эксплуа-

тации отмечены определенные недостатки, наиболее серьезной из которых представляется обветшание водопровода, поскольку оно приводит к загрязнению воды. Очевидно, нуждается в обслуживании и ремонте оборудование водоочистных станций. Одной из причин систематических прекращений подачи воды потребителям могут быть перебои в электроснабжении. В условиях быстрой урбанизации существует необходимость модернизации станций, конечной целью которой должно стать повышение их мощности, направленное на обеспечение быстрорастущих потребностей населения в чистой воде. Кроме того, авторы исследования о станции Вукари-Иби предлагают использование недорогих фильтров, наполненных активированным углем, для эффективного удаления загрязнителей [19, с. 161]. Наконец, напрашивается вывод о возможной потребности в повышении квалификации персонала водоочистных станций.

Очистка воды в сельской местности

В сельской местности доступ к источникам воды с фильтрацией (водопровод, скважина или общественный кран) имеет только часть населения [20, с. 82], поэтому возрастает необходимость очистки воды конечными потребителями. В данной ситуации многое зависит от сознательности населения и его поведенческих привычек. Сельские жители, которые понимают важность личной и бытовой гигиены, имеют намного меньшие шансы заразиться передающимися через воду заболеваниями. Исследования показали, что заражение воды зачастую происходит от загрязненных столовых приборов, в результате неправильного хранения воды, а также проблем с личной и домашней гигиеной [13, с. 232]. Дополнительную угрозу в данном контексте несет отсутствие у части домохозяйств туалетов или наличие их примитивных разновидностей, что чревато «вымыванием» в сезон дождей патогенов в окружающую среду с загрязнением водоемов и других источников воды. В этих условиях население вынуждено самостоятельно заботиться о качестве набираемой воды. Анкетирование в штате Плато в центральной части Нигерии продемонстрировало, что 54,1% респондентов очищают воду как минимум одним способом, 45,9% – не очищают воду вообще [13, с. 233].

Среди используемых методов очистки известны: добавление квасцов или хлорных соединений, кипячение, фильтрация (с использованием ткани или специально предназначенных фильтров), отстаивание и осаживание. Данные опросов показывают, что теми или иными способами очистки воды, как правило, пользуются более зажиточные домохозяйства, возглавляемые людьми с образованием не ниже среднего [6, с. 1]. С учетом вышеизложенного можно утверждать, что проблема очистки воды конечными потребителями в сельской местности имеет ярко выраженный социально-экономический аспект. Бедные домохозяйства иногда не могут позволить себе очистку воды и, как следствие, страдают от заражения инфекционными и паразитарными заболеваниями.

Кипячение – проверенный и эффективный способ устранения патогенной микрофлоры, однако он требует дополнительных энергозатрат (расхода электроэнергии, газа или дров). Добавление в воду квасцов или хлорных соединений эффективно против патогенов, но требует четкого соблюдения предписанной дозировки реагентов. Пропускание воды через ткань позволяет очищать ее от загрязнения твердыми частицами и несколько улучшать ее физико-химический состав, однако вряд ли поможет при заражении воды патогенами. Отстаивание и осаживание – дешевый и довольно простой способ очистки загрязненной воды от твердых и крупных частиц, который, как и использование ткани, неэффективен против бактериального или протозойного заражения. Результаты фильтрации воды через фильтр зависят от его особенностей и параметров.

Между тем, в Нигерии предпринимаются попытки наладить производство собственных керамических фильтров, как недорогого и относительно эффективного средства очистки воды. В качестве примера можно рассматривать производимые компанией *Potters for Peace* фильтры в форме цветочных горшков объемом в 8,2 л, пропитанных коллоидным серебром, которые вставлены в ведра емкостью 20–30 л. Поставщики рекомендуют менять керамические фильтры раз в один или два года, хотя при правильном уходе они могут функционировать в течение срока до пяти лет. При производстве керамических фильтров используются глина и опилки в разных пропорциях [8, с. 4].

Исследованиями подтверждается эффективность фильтрации керамическими фильтрами в удалении типичных загрязнителей воды, таких как бактерии и простейшие животные [17, с. 79]. Керамические фильтры при этом недостаточно эффективны в улучшении физико-химического состава воды [9, с. 129], однако в условиях заражения источников воды патогенами и неиспользования населением других методов очистки воды их применение представляется вполне оправданным. Проблемные моменты представляют малая осведомленность сельских жителей о керамических фильтрах, их слабый маркетинг, а также бедность населения [17, с. 81].

Вышеизложенное свидетельствует как о важности обеспечения населения в сельской местности чистой водой, так и о роли сознательности жителей в тех районах, где это невозможно или по каким-то причинам затруднительно. Использование различных методов очистки перед конечным потреблением – не столь-

ко технический, сколько социально-экономический вопрос, одновременно зависимый от благополучия населения и влияющий на него. С точки зрения властей представляется важным, с одной стороны, проводить информирование населения о необходимости водоочистки, в тех районах, где доступ к чистой воде отсутствует, с другой стороны, сделать доступными оптимальные средства очистки, которые позволят привести в норму физико-химические и биологические показатели воды. В качестве одного из возможных решений проблемы очистки воды представляется дальнейшее развитие местных производств фильтров для воды, тем более, такой опыт уже имеется.

Усилия правительства Нигерии по нормализации ситуации с водоочисткой

В научной литературе встречаются различные оценки ситуации с обеспечением водой населения Нигерии: от резко негативных до умеренно оптимистичных [12, 15]. Для выработки более или менее взвешенных выводов представляется целесообразным рассмотреть исторический аспект проблемы.

Острая необходимость в обеспечении стремительно растущего населения, в том числе и в городах, чистой водой потребовала от федерального правительства Нигерии формирования специальных структур ответственных за водоснабжение жителей страны. В 1976 году было сформировано федеральное министерство водных ресурсов, а также 11 управлений развитием бассейнов рек (в 1990 году управление развитием р. Нигер было разделено на два). В 1993 году был принят новый акт (закон) о водных ресурсах, в соответствии с которым на министерство водных ресурсов была возложена исключительная ответственность за развитие водных ресурсов и управление ими. В 2004 году в Нигерии была утверждена Национальная водная политика [15, с. 1].

С одной стороны, социально-экономические параметры обеспечения водой в Нигерии постепенно нормализуются, все больше населения охвачены улучшенным (с фильтрацией) водоснабжением и санитарными удобствами. Вышеперечисленные показатели Нигерии на фоне других африканских стран – средние [4, с. 489], что представляется неплохим результатом с учетом первого места на континенте по численности населения. Строительство водоочистных станций, в частности, демонстрирует целенаправленную государственную политику по обеспечению населения городов чистой водопроводной водой.

С другой стороны, происходит деградация водных систем, вызванная в том числе и антропогенными факторами. Экологи-теоретики считают водные ресурсы неисчерпаемыми, поскольку они восстанавливаются в процессе природного круговорота. В то же время потребление воды растет высокими темпами, и проблема чистой воды и дефицита гидроресурсов становится одной из наиболее актуальных. Несмотря на способность водоемов к самоочищению, в них поступает такое количество загрязненных сточных вод, что их флора и фауна деградируют [3, с. 124]. Речь идет не только о коммунально-бытовом, но и о сельскохозяйственном и промышленном загрязнении водоемов. В результате вода в реках, озерах, водохранилищах, а иногда в колодцах и скважинах для использования человеком требует более глубокой очистки. В итоге, население испытывает проблемы с водоснабжением, о чем, в частности, свидетельствует широко распространенный в Нигерии бизнес по торговле водой.

В 2018 году в Нигерии было объявлено чрезвычайное положение в секторе водоснабжения, санитарии и гигиены, а также принят национальный план действия, основной целью которого стало обеспечение всеобщего доступа населения страны к чистой воде, средствам санитарии и гигиены к 2030 году.[6], что полностью соответствует определенной ООН цели устойчивого развития № 6. При поддержке Всемирного банка и других финансовых организаций федеральное правительство Нигерии утвердило национальную программу по реформе водного сектора в городских районах, которая предусматривает реформу отрасли, модернизацию инфраструктуры и увеличение доступа населения к чистой воде в городах по всей территории страны[6]. Были предприняты практические шаги по созданию общественных кранов с подачей фильтрованной воды и туалетов в отдаленных сельских районах.

Заключение

В число основных проблем в водоснабжении населения в Нигерии входят антропогенное загрязнение водоемов, сбои и снижение эффективности в функционировании водоочистных станций и водопроводных систем, отсутствие доступа к чистой воде у части людей. Источники воды загрязняются из-за недостаточного охвата жителей канализацией, а также в результате промышленной и сельскохозяйственной деятельности. Обеспечение городов чистой водой осуществляется преимущественно водоочистными станциями, населенных пунктов в сельской местности – скважинами и колодцами. В силу недостатка у населения доступа к питьевой воде процветает бизнес по ее торговле, а также использование простых бытовых средств очистки.

Государственные власти Нигерии намерены решить проблемы водоснабжения населения, однако дальнейшее развитие системы обеспечения чистой водой,

[6] Nigeria: Ensuring Water, Sanitation and Hygiene for All. World Bank Group. 26.05.2021. https://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/05/26/nigeria-ensuring-water-sanitation-and-hygiene-for-all

очевидно, потребует систематической работы и многомиллиардных инвестиций, что необходимо в силу быстрого роста численности населения и стремительной урбанизации. Острой потребностью для городов является обеспечение бесперебойного электроснабжения, модернизация существующих водоочистных станций, повышение квалификации их персонала и ремонт водопроводов. В сельской местности работа может вестись по нескольким направлениям. Одной из приоритетных задач является обеспечение доступа к чистой воде для всего населения. Вместе с тем с учетом сроков для ее выполнения важно повышение осведомленности жителей о необходимости фильтрации воды из незащищенных источников и увеличение доступности различных методов водоочистки для домохозяйств. Как один из возможных вариантов – развитие местных производств простых в применении фильтров для воды.

В текущих условиях нельзя исключать возможность российско-нигерийского сотрудничества в области водоочистки, поскольку отечественные технологии могут быть адаптированы для применения в условиях стран Африки. Речь также может идти о поставках различного рода фильтров воды отечественного производства и подготовке национальных кадров в Российской Федерации. Последнее направление двустороннего сотрудничества надежно себя зарекомендовало. На сегодняшний день в нашей стране прошли обучение более 10 тыс. нигерийских специалистов[7]. При наличии запроса по государственной линии возможно обучение нигерийцев по соответствующим специальностям в пределах квоты за счет средств федерального бюджета. Стоит также отметить, что подготовка кадров на коммерческой основе в России обойдется в разы дешевле, чем в Африке.

Финансирование. *Статья подготовлена в рамках проекта «Проект "Чистая вода" как важнейшая составляющая сотрудничества РФ со странами Глобального Юга: социально-экономическое и технологическое измерения» по гранту Министерства науки и высшего образования РФ на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (Соглашение № 075-15-2024-546).*

[7] Общая информация. Посольство Российской Федерации в Нигерии. https://nigeria.mid.ru/ru/countries/obshchaya_informatsiya/

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Абрамова ИО. Народонаселение Африки в условиях трансформации мирового порядка. Азия и Африка сегодня. 2022;(12):5–15. https://doi.org/10.31857/S032150750023555-2
2. Большов ИГ, Денисова ТС, ред. Нигерия. Справочно-монографическое издание. М.: Институт Африки РАН; 2013.
3. Гришина НВ. Водные ресурсы Африки южнее Сахары: возможности и проблемы использования. М.: Институт Африки РАН; 2022.
4. Жамбиков АМ. Факторы передачи через воду болезней в условиях демографического взрыва в странах Африки. Биосфера. 2024;(4):486–496. http://dx.doi.org/10.24855/biosfera.v16i4.963
5. Константинова ОВ. О проблеме доступа к чистой воде в Африке. Азия и Африка сегодня. 2024;(12):65–72. https://doi.org/10.31857/S0869587324060055

Общий список литературы / Reference List

1. Abramova IO. [Population of Africa under Conditions of Transformation of the World Order]. Azia i Afrika Segodnya. 2022;(12):5–15. (in Russ). https://doi.org/10.31857/S032150750023555-2
2. Bolsov IG, Denisova TS, eds. Nigeria. Spravochno-monograficheskoye izdaniye. [Nigeria. Monographic Reference Publication]. Moscow: Institut Afriki RAN; 2013. (In Russ).
3. Grishina NV. Vodnye Resursy Afriki Yuzhneye Sakhary: Vozmozhnosti i Problemy Ispolzovaniya. [Water Resources of Sub-Saharan Africa: Opportunities and Problems of Use]. Moscow: Institut Afriki RAN; 2012. (In Russ).
4. Zhambikov AM. [Factors of waterborne transmission of diseases under conditions of demographic explosion in African countries]. Biosfera. 2024;(4):486–496. (In Russ). http://dx.doi.org/10.24855/biosfera.v16i4.963
5. Konstantinova OV. [On the problem of access to clean water in Africa]. Azia i Afrika Segodnya. 2024;(12):65–72. (In Russ). https://doi.org/10.31857/S0869587324060055
6. Abubakar IR. Understanding the socioeconomic and environmental indicators of household water treatment in Nigeria. Util Policy. 2021;70:1-10. https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101209
7. Adeogun BK, Ijimdiya J. Water resources development in Nigeria: Opportunities, challenges and the way forward. Int J Afr Sustain Develop. 2019;10(2):73-80.
8. Akosile SI, Ajibade FO, Lasisi KH, Ajibade TF, Adewumi JR, Babatola JO, Oguntuase AM. Performance evalu-

ation of locally produced ceramic filters for household water treatment in Nigeria. Sci African. 2020;7:1-13. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00218
9. Erhuanga E, Banda MM, Kiakubu D, Kashim IB, Ogunjobi B, Jurji Z, Ayoola I, Soboyejo W. Potential of ceramic and biosand water filters as low-cost point-of-use water treatment options for household use in Nigeria. J Water Sanitat Hygiene Develop. 2021;11(1):126–140. https://doi.org/10.2166/washdev.2020.096
10. Ibrahim AQ, Onyenekwe PC, Nwaedozie IM. An efficiency assessment of Lower Usuma Water Treatment Plant in Abuja Metropolis, Nigeria. IOSR J Environ Sci Toxicol Food Technol. 2014;8(12):46–53. https://doi.org/10.9790/2402-081224653
11. Idris MN, Ali WM, Suleiman E. Evaluation of water treatment problems: Case study of Maiduguri Water Treatment Plant (MWTP) and Maiduguri environs. Arid Zone J Engin Technol Environ. 2017;13(5):630–642.
12. Isukuru EJ, Opha JO, Isaiah OW, Orovwighose B, Emmanuel SS. Nigeria's water crisis: Abundant water, polluted Reality. Cleaner Water. 2024;2:1-33. https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100026
13. Miner CA, Dakhin AP, Zoakah AI, Afolaranmi TO, Envuladu EA. Household drinking water; knowledge and practice of purification in a community of Lamingo, Plateau state, Nigeria. E3 J Environ Res Manag. 2015;6(3):230–236.
14. Mustapha M, Sridhar M, Coker AO. Assessment of water supply system from catchment to consumers as framed in WHO Water Safety Plans: A study from Maiduguri Water Treatment Plant, North East Nigeria. Sustain Environ. 2021:1-14. https://doi.org/10.1080/27658511.2021.1901389
15. Ngene BU, Nwafor CO, Bamigboye GO, Ogbiye AS, Ogundare JO, Akpan VE. Assessment of water resources development and exploitation in Nigeria: A review of integrated water resources management approach. Heliyon. 2021;(7):1-10. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05955
16. Njoku CG, Efiong J, Nse-Abasi NA. A Geospatial Expose of Flood-Risk and Vulnerable Areas in Nigeria. Int J App Geospat Res. 2020;11(3):87–110. https://doi.org/10.4018/IJAGR.20200701.oa1
17. Okwuba CJ. Ceramic vessel filter for water treatment in Nigeria's rural, underdeveloped communities. Int J Arts Humanities. 2024;12(5):79-82.
18. Omole DO. Sustainable groundwater exploitation in Nigeria. J Water Resour Ocean Sci. 2013;2(2):9-14. https://doi.org/10.1016/10.11648/j.wros.20130202.11
19. Samaila E, Gin WA, Joshua WK. Assessing the efficiency of drinking water treatment plant and the impact of broken distribution systems on water quality of Wukari-Ibi Plant. Environ Res Technol. 2022;5(2):155-64. https://doi.org/10.35208/ert.1044500
20. Umar KA, Mohammed Y, Raji M, Salisu H, Adenekan S, Tijani M. Drinking Water quality, sanitation and hygiene practices in a rural community of Sokoto State, Nigeria. Int J Med Sci Publ Health. 2019;8(1):78-85. https://doi.org/10.5455/ijmsph.2019.0824324102018



CC BY-NC 4.0

УДК 616-002.77:613.1 || EDN: WELBEJ

© Ж.Ф. де Карвалью и соавт.; ФНИ «XXI век»

РЕВМАТИЧЕСКИЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ В ВЫСОКОГОРЬЕ: РИСК И ОСОБЕННОСТИ

Ж.Ф. де Карвалью[1], Л.П. Чурилов[2*], З.К. Кадыралиева[3], М.Г.Норматов[2*], Б.Т. Орозбекова[3] , Б.Д. Рязанцев[3]

[1]Núcleo de Pesquisa em Doenças Crônicas não Transmissíveis (NUPEC), School of Nutrition from the Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil (Бразилия); [2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; [3]Кыргызско-российский славянский университет имени первого Президента России Бориса Ельцина, Бишкек, Кыргызстан

**Эл. почта: muslimbek_normatov@mail.ru; l.churilov@spbu.ru*

Статья поступила в редакцию 28.02.2026; принята к публикации 09.04.2026

Предпосылки: **Природные факторы, зависящие от географической широты и долготы и высоты над уровнем моря, могут влиять на эпидемиологию и клиническое проявление ревматических заболеваний. Высокогорные условия характеризуются хронической гипоксией, низким атмосферным давлением и климатическими особенностями, которые могут воздействовать на иммунные реакции и проявления заболеваний. Однако отношения между условиями высокогорья (ВГ) и ревматическими заболеваниями (РЗ) остаются слабо изученными.** *Цель:* **Провести обзор существующей литературы и данных, опубликованных авторами, о влиянии условий ВГ на распространенность, клинические характеристики и исходы РЗ. Методы: Поиск литературы проведен по базам данных PubMed/MEDLINE и elibrary.ru до февраля 2026 года с использованием запросов "high altitude" OR "altitude" в сочетании с "rheumatic diseases," "arthritis," OR "rheumatology" без языковых ограничений.** *Результаты:* **Найдены 11 исследований, выполненных в Китае, Кыргызстане, Индии, Японии, Непале, Перу, Саудовской Аравии и США при суммарной численности субъектов 278232. В двух популяционных исследованиях распространенность ревматоидного артрита в высокогорных популяций оказалась выше, чем в равнинных. В проведенном в Китае исследовании когорты, проживающей выше 4300 м, распространенность ревматоидного артрита (РА) составляла 4,86 % против 0,28 % на равнине. Относительный риск заболевания РА в Кыргызстане увеличен в 2,95 раза в высокогорной когорте (выше 2000 м). В исследованиях по ревматической лихорадке получены неоднородные результаты, в том числе относительно связи высокогорья со сроками профессиональной пригодности у горняков на больших высотах и различий по заболеваемости кардитом на разных высотах, при этом у детей отмечена тенденция к доброкачественному течению, но в сочетании с повышенным риском осложнений на клапанах сердца. В высокогорных регионах также выявлены особенности факторов риска пурпуры Шёнляйна-Геноха и повышенная встречаемость нарушений опорно-двигательного аппарата. Однако отдельные аутоиммунные заболевания, например витилиго), встречаются в горах реже, чем на равнинах, а на больших высотах была задокументирована даже их ремиссия (например, при аутоиммунной тромбоцитопенической пурпуре). Обсуждены возможные механизмы связи ВГ с аутоиммунными расстройствами. Приведены основания считать, что условия ВГ, особенно хроническая гипоксия, могут вызывать чрезмерное системное действие провоспалительных медиаторов и изменения баланса между субпопуляциями лимфоидных клеток, усугубляющие аутоиммунные реакции. Также на аутоиммунитет в горных районах могут влиять некоторые другие геохимические и климатические факторы.** *Заключение:* **Условия ВГ могут влиять на эпидемиологию и клиническое проявление РЗ посредством экологических и иммунологических механизмов. Хотя имеющиеся данные ограничены и неоднородны, они дают основания считать, что факторы ВГ могут влиять на распространенность и фенотипы РЗ. В статье подчеркивается необходимость дальнейших исследований патогенеза и разработки целевых стратегий профилактики аутоиммунных заболеваний для высокогорных популяций.**

Ключевые слова: *аутоиммунитет, высокогорные условия, гипоксия, ревматоидный артрит, ревматическая лихорадка*

RHEUMATIC DISEASES AT HIGH ALTITUDE AREAS: RISK AND FEATURES

J.F. de Carvalho,[1] L.P. Churilov[2*], Z.K. Kadyralieva[3], M.G. Normatov[2*], B.T. Orozbekova[3], B.D. Ryazantsev[3]

[1]Núcleo de Pesquisa em Doenças Crônicas não Transmissíveis (NUPEC), School of Nutrition from the Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil; [2]Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia; [3]Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, Bishkek, Kyrgyzstan.

**Email: muslimbek_normatov@mail.ru; l.churilov@spbu.ru*

Background: **Environmental factors related to geographic latitude, longitude and altitude may influence the epidemiology and clinical expression of rheumatic diseases. High-altitude environments are characterized by chronic hypoxia, lowered atmospheric pressure, and distinct climatic conditions that may modify immune responses and disease patterns. However, the relationships between high altitude (HA) and rheumatic diseases (RD) remain poorly explored.**

Aim: **To review the available literature and authors' published data related to the impact of high altitude on the prevalence, clinical characteristics, and outcomes of rheumatic diseases.** *Methods:* **A literature review was conducted using** *PubMed/MEDLINE* **and** *elibrary.ru* **databases up to February 2026. The search strategy included the terms "high altitude" OR "altitude" combined with "rheumatic diseases," "arthritis," or "rheumatology," without language restrictions. Three independent reviewers screened the studies and extracted data on study design, population characteristics, altitude exposure, and clinical outcomes.** *Results:* **Eleven studies conducted in China, Kyrgyzstan, India, Japan, Nepal, Peru, Saudi Arabia, and the United States and including 278232 subjects were found. Rheumatoid arthritis prevalence was reported to be higher in high-altitude populations compared to lowland areas in two population-based studies. In a Chinese study of a cohort resided above 4300 m, rheumatoid arthritis prevalence was 4.86%** vs. **0.28% in lowland. The relative risk of rheumatoid arthritis was increased 2.951 times in the high altitude (above 2000 m) cohort in Kyrgyzstan. Studies on rheumatic fever showed heterogeneous findings, including associations with occupational outcomes in high-altitude miners and differences in carditis incidences at different altitudes, but tendencies to indolent course and heart valve complications were noticed in high-altitude pediatric cohorts. High-altitude populations also demonstrated distinct patterns of Henoch-Schönlein purpura risk factors and increased musculoskeletal complaints in some regions. However, some autoimmune diseases (e.g. vitiligo) are observed among mountaineers rarer than in the inhabitants of lowlands, and even their remission at high altitude was documented (e.g. in autoimmune thrombocytic pupura). The mechanisms associating high altitude conditions and autoimmune disorders are discussed to suggest that high-altitude conditions, particularly chronic hypoxia, may induce excessive systemic action of proinflammatory mediators and change the balance between lymphoid sub-populations thus exacerbating autoimmune responses. Some other factors, such as geochemical and climatic of may also influence autoimmunity in mountainous areas.** *Conclusion:* **High altitude may influence the epidemiology and clinical expression of rheumatic diseases through environmental and immunological mechanisms. Although current evidence is limited and heterogeneous, the available data suggest that high altitude-related factors may contribute to variations in disease prevalence and phenotype. The article highlights the need for further research into the pathogenesis and development of targeted preventive strategies for high-altitude populations.**

Keywords: *Autoimmunity; high altitude; hypoxia; rheumatoid arthritis; rheumatic fever.*

Введение

Ревматические заболевания (РЗ) встречаются часто и распространены глобально, затрагивая миллионы людей во всем мире. Заболеваемость остеоартритом после 40 лет, например, достигает 25% в глобальном масштабе, а ревматоидный артрит (РА) затрагивает почти 18 миллионов человек во всем мире при глобальной заболеваемости около 0,46%, самой высокой среди американских индейцев [9, 16, 27, 36]. В то же время, например, в селении Царанг в Непале на высоте сверх 3500 м над уровнем моря распространенность РА во много раз выше (4,3% у мужчин и 7,1% у женщин) [10]. Распространенность РЗ зависит от целого ряда факторов, включая наследственность, воздействие ультрафиолета и уровень витамина D в организме, некоторые инфекции, географическую широту и долготу, высоту над уровнем моря, курение, профессиональные риски [10, 18, 31].

В этом исследовании мы проанализировали существующую литературу по РЗ в условиях высокогорья (ВГ), рассмотрели влияние ВГ на клинические проявления РЗ и обсудили его механизмы.

↓

Introduction

Rheumatic diseases (RD) are relatively common and have a global distribution, affecting millions of individuals worldwide. Osteoarthritis, for example, has a prevalence of almost 25% in the global population aged over 40 years, while rheumatoid arthritis (RA) affects almost 18 million people worldwide with global prevalence about 0.46%, highest among American Indians [9, 16, 27, 36]. At the same time, for example, in Tsarang village (Mustang district of Nepal, above 3500 m of altitude) RA prevalence is many times greater (4.3% in males and 7,1% in females) [10]. RD prevalence is influenced by a variety of factors, including genetics, ultraviolet exposure and vitamin D supply, some infections, geographic latitude, smoking habits, occupational hazards, and altitude [10, 18, 31].

In this study, we review the existing literature on RD at high altitudes (HA), explore the role of HA in the clinical presentation and progression of RD, and discuss the pathogenesis of these associations.

Методы

Проведен глубокий поиск литературы по библиографическим базам данных PubMed/MEDLINE и elibrary.ru до февраля 2026 года, охватывающий в общей сложности 76 лет. Стратегия поиска включала следующие медицинские термины по номенклатуре MeSH: "high altitude" OR "altitude" AND "rheumatic diseases" OR "arthritis" OR "rheumatology" без ограничений по языку. Списки ссылок в выбранных публикациях были просмотрены для выявления дополнительных исследований.

Три независимых рецензента (ЖФК, ЛПЧ и БТО) провели первоначальный поиск и отбор рефератов статей. Далее были проверены полные тексты выбранных исследований. Чтобы извлечь из статей нужные данные, включая информацию об авторах, год публикации, страну происхождения, демографические данные о субъектах исследования, продолжительность болезни, высоту над уровнем моря и результаты исследования (если имеются) использована стандартизированная форма [29].

↓

Methods

A comprehensive literature review was carried out using the PubMed/MEDLINE and elibrary.ru bibliographic databases up to February 2026, totally covering 76 years. The search strategy included the following specific MeSH terms: "high altitude" OR "altitude" AND "rheumatic diseases" OR "arthritis" OR "rheumatology". No language restrictions were applied. The reference lists of selected publications were reviewed to identify additional relevant studies.

Three independent reviewers (JFC, LPC and BTO) conducted the initial search and selection of study abstracts. Next, the full texts of the selected studies were assessed. A standardized form [29] was used to extract relevant data from the studies, including information on the authors, publication year, country of origin, patient demographics, disease duration, altitude, and study outcomes (if available).

Результаты и обсуждение

В этот обзор были включены одиннадцать исследований (описаны в 12 статьях [3, 6, 8, 10, 13, 23, 34, 37, 38, 39, 43, 45], проведенных в различных горных районах трех континентов, (таблица 1).

Эти регионы включали два в Тибетском автономном районе Китая, три в Кыргызстане и по одному в Индии, Японии, Непале, Перу, Саудовской Аравии и США. Всего было охвачено 278232 субъекта. Изученные РЗ включали расстройства опорно-двигательного аппарата (два исследования), ревматоидный артрит (РА, пять исследований), ревматизм (два исследования), пурпуру Шёнляйна-Геноха (одно исследование) и ревматический порок сердца (одно исследование).

Четыре исследования были проведены по схеме случай-контроль, три были сравнительными популяционными, в трех сравнивались результаты опросов, и одно было проспективным когортным. Возраст субъектов варьировался от пяти до девяноста лет, доля женщин составляла от 0 (в одном исследовании) до 97%. Одно исследование проводилось исключительно с участием мужчин. Высота тех ВР, где проводились эти исследования, варьировала от 1800 до 5538 метров над уровнем моря.



Results and discussion

Eleven studies (described in 12 articles [3, 6, 8, 10, 13, 23, 34, 37, 38, 39, 43, 45]) conducted in different mountainous areas of three continents were included in this review (Table 1).

The areas included two in the Tibetan Autonomous District of China, three in Kyrgyzstan, and one in each India, Japan, Nepal, Peru, Saudi Arabia, and the United States. A total 278232 subjects were involved. The rheumatic conditions investigated included musculoskeletal disorders (two studies), rheumatoid arthritis (RA, five studies), rheumatic fever (two studies), Henoch-Schonlein purpura (one study), and rheumatic heart disease (one study).

Study designs included four case-control studies, three population-based cross-sectional cases, three cross-sectional questionnaire surveys, and one prospective cohort study. The participants' ages ranged from five to ninety years. The proportion of female subjects varied between 0% and 97%, with one study exclusively involving male participants. The heights of HA areas where these studies were conducted ranged from 1800 to 5538 meters above sea level.

Исследования показали, что заболеваемость по РА была выше среди тибетских групп населения, живущих в условиях ВГ, при сравнении с теми, кто проживает в равнинных районах: 4,86% против 0,28% [45]. В Кыргызстане сравнительный ретроспективный эпидемиологический анализ медицинских записей в высокогорных (выше 2000 м) и в равнинных районах показал, что у живущих на высоте выше 2000 метров относительный риск развития РА составил 2,951 при сравнении с жителями равнинных территорий. Относительное снижение риска составило 1,951, а разница по рискам (risk difference, RD) – 0,191. У живущих на ВГ определены более высокие провоспалительные и проаутоиммунные индексы, а также более низкий уровень регуляторных Т-лимфоцитов (Treg) в крови, чем в у живущих на равнинах [3, 34].

В одном из двух исследований по ревматизму его хронический вариант был значимо связан со снижением числа сохранявших трудоспособность среди шахтеров в условиях ВГ (относительный риск 10,95; 95%-й ДИ 2,9–33,9) [39]. Во втором исследовании выявлена сниженная заболеваемость кардитом в условиях ВГ при сравнению с равнинными районами: 67% против 73%, соответственно, хотя заболеваемость тяжелой формой кардита была в обеих группах одинаковой: 28% и 25% [8]. В исследовании пурпуры Шёнляйна-Геноха возраст, аллергия в анамнезе и медицинская предыстория были определены как независимые факторы риска для этого заболевания на больших высотах [43].

Рассмотренные результаты свидетельствуют о значимом влиянии условий ВГ на заболеваемость и клиническую картину РЗ. Следует особо отметить рост заболеваемости по РА в условиях ВГ при сравнении с равнинными условиями. Заболеваемость может достигать 4,86% на ВГ против 0,28% на малой высоте, при относительном риске, повышенном почти в три раза. Это может означать, что в патогенез и обострения РА могут вносить вклад факторы среды ВГ, такие как гипоксия [45].



Табл. 1.

Общие характеристики исследований, учтенных в обзоре

Исследование	Схема исследования	Страна	Число субъектов	Возраст (годы); Женщины (%)	Особые условия	Учтенный диагноз	Высота (м)	Сроки наблюдения
Wedum et al., 1950 [42]	Наблюдение	США	1017	Диапазон: 5–23;50,6%		Ревматическая болезнь сердца	≥ 3048	–
Singh et al., 1977 [37]	Случай-контроль	Индия	Случай: 20000 Контроль: 130700	Диапазон: 18–54; 0		Ревматоидный артрит	3692– 5538	1965–1972
Abbag, 1996 [8]	Случай-контроль	Саудовская Аравия	27 high- vs. 11 lowland	Среднее: 9.7; 97%		Ревматизм	3000	10. 1987 и 07. 1995
Brimkulov et al, 2017 [13]	Популяционное поперечное	Кыргызстан	ВГ: 11136 Равнина: 782	Среднее: 32 (медиана 46) на равнине и 22 (38) на ВГ; 64%		Скелетно-мышечные нарушения	2200, 3200 and 1800	Одна неделя в марте 2016
Vega-Hinojosa et al., 2018 [38]	Поперечный опрос	Перу	1095	Среднее: 39; 56.1%		Скелетно-мышечные нарушения	3824	01–06. 2010
Zhang et al., 2020 [45]	Популяционное поперечное	Тибет (Китай)	1458	Среднее: 52.30 ± 8.43; 50%		Rheumatoid arthritis	4500	–
Wei et al., 2021 [43]	Случай-контроль	Тибет (Китай)	ВГ: 140 Равнина: 140			Пурпура Шёнляйна-Геноха	ND	10. 2015– 10. 2018
Vinnikov and Krasotski, 2022 [39]	Проспективное когортное наблюдение	Кыргызстан	569	Среднее: 34 (медиана 40); 4.9%	Шахтеры на ВГ	Ревматизм	3600–4500	2009–2021
Arima et al., 2022 [10]	Популяционный поперечный опрос	Непал	77	Среднее: 52.4; 74%		Ревматоидный артрит	3560	06. 2019
Kondo et al., 2023 [23]	Случай-контроль	Япония	80	Среднее: 61,3; 86.3%	Здоровые лица в сравнении с пациентами	Ревматоидный артрит	30 *vs.* 1000	2022
Kadyralieva, Ryazantsev; Ryazantsev et al., 2025 [3, 34]	Популяционное поперечное эпидемио-логическое	Кыргызстан	111000	Население полностью	Все медицинские записи	Ревматоидный артрит	>2000	2023

Table 1

General characteristics of the studies reviewed

Study	Study design	Country	Subjects number	Subjects age (years); females, %	Specific condition	Diagnosis accounted for	Altitude (m)	Follow-up
Wedum et al., 1950 [42]	Observational	United States	1017	Range: 5–23; 50.6%		Rheumatic heart disease	≥ 3048	–
Singh et al., 1977 [37]	Case-control	India	20000 vs. 130700 controls	Range: 18–54; 0		Rheumatoid arthritis	3692– 5538	1965 to 1972
Abbag, 1996 [8]	Case-control	Saudi Arabia	27 high- vs. 11 lowland	Mean: 9.7; 97%		Rheumatic fever	3000	Nov. 1987 and Jul. 1995
Brimkulov et al, 2017 [13]	Population-based cross-sectional	Kyrgyzstan	11136 highland vs. 782 lowland	Mean: 32 (median 46) at low vs. 22 (38) at high altitude; 64%		Musculo-skeletal disorders	2200, 3200 and 1800	One week in March 2016
Vega-Hinojosa et al., 2018 [38]	Cross-sectional questionnaire	Peru	1095	Mean: 39; 56.1%		Musculo-skeletal disorders	3824	Jan. to June 2010
Zhang et al., 2020 [45]	Population-based cross-sectional	Tibet (China)	1458	Mean: 52.30 ± 8.43; 50%		Rheumatoid arthritis	4500	–
Wei et al., 2021 [43]	Case-control	Tibet (China)	140 highland vs.140 lowland			Henoch-Schőnlein purpura	ND	Oct. 2015 to Oct. 2018
Vinnikov and Krasotski, 2022 [39]	Prospective cohort observational	Kyrgyzstan	569	Mean: 34 (40); 4.9%	Miners at high altitude	Rheumatic fever	3600–4500	2009 to 2021
Arima et al., 2022 [10]	Population-based cross-sectional questionnaire	Nepal	77	Mean: 52.4; 74%		Rheumatoid arthritis	3560	June 2019
Kondo et al., 2023 [23]	Case-control	Japan	80	Mean: 61,3; 86.3%	Healthy donors *vs.* RA patients	Rheumatoid arthritis	30 *vs.* 1000	2022
Kadyralieva, Ryazantsev; Ryazantsev et al., 2025 [3, 34]	Population-based cross-sectional epidemio-logical	Kyrgyzstan	111000	The total population of the regions	All medical records available	Rheumatoid arthritis	>2000	2023

DOI: 10.24855/biosfera.v18i2.1054

The studies demonstrated that the prevalence of RA was higher among Tibetan populations living at HA compared to those in lowland areas: 4.86% vs. 0.28% [45]. In Kyrgyzstan, a comparative retrospective epidemiological analysis of medical records in HA areas (above 2000 m) and lowland areas showed that individuals living at altitudes above 2000 meters had a relative risk of rheumatoid arthritis development of 2.951 compared to those living in low-altitude areas. The relative risk reduction was 1.951, and the risk difference (RD) was 0.191. At HA, patients have higher pro-inflammatory and pro-autoimmune indices and lower T-regulator lymphocyte blood counts than in lowlands. [3, 34].

In one of two studies on rheumatic fever, its chronic variant was significantly associated with non-survival among miners working at HA (HR 10.95; 95% CI: 2.92–33.92) [39]. The second study reported a lower incidence of carditis at HA compared to lowland regions: 66.7% vs. 72.7%, respectively, although the frequency of severe carditis was similar in the two groups: 27.8% vs. 25% [8]. A study on Henoch-Schőnlein purpura identified age, allergic anamnesis, and past medical history as independent risk factors for the condition at high altitudes [43].

The findings reviewed highlight a significant impact of HA environment on the prevalence and clinical presentation of RD. The increased prevalence of RA at HA compared to lowland populations is particularly notable. The finding that its prevalence is 4.86% at HA versus 0.28% at low altitudes, the relative risk being almost three times higher for highlanders, suggests that environmental factors associated with altitude, such as hypoxia, could contribute to the pathogenesis or exacerbation of RA [45].

Аналогичные данные были представлены для жителей ВГ Кыргызстана [3, 13, 34], относящихся к совершенно другому этносу. В Перу среди различных этнических групп распространенность РА и связанных с ним заболеваний на ВГ также была выше, чем в среднем по стране [38]. Следовательно, этническая специфика тибетского населения, вероятно, не является единственной причиной высокой распространенности РА, хотя должна учитываться и она [44]. Возможно, что определённую роль играют этнические различия по иммунной реактивности. Например, исследование в Непале, проведенное в селении этнических тибетцев, также выявило очень высокую частоту РА [10]. Тем не менее, в исследовании Юаня и др. [44] показано, что уровни аутоантител к цитруллинированным пептидам (ранние маркеры РА), а также сывороточного амилоида А (белок острой фазы, связанный с РА) среди тибетцев ниже, чем среди принадлежащих к этносам Хань и Хуэй в том же районе Цинхай в Китае. Это также не соответствует объяснениям, основанным на этнической принадлежности. Сравнительные исследования высокогорных и равнинных условий в Японии выявили значительные проаутоиммунные изменения в субпопуляциях лимфоидных клеток у пациентов с РА, живущих в условиях ВГ, а также аналогичные, но менее заметные изменения у здоровых лиц в таких условиях [23].

Одно из возможных объяснений такой связи – влияние гипоксии на иммунную систему. Хроническое воздействие низкого уровня кислорода в условиях ВГ может вызывать через транскрипционные факторы HIF (Hypoxia-inducible factor: индуцируемый гипоксией фактор) состояние избыточного системного действия воспалительных медиаторов, что может усугубить аутоиммунные реакции у чувствительных к ним людей [30]. Это согласуется с ранее проведенными исследованиями, указывающими на то, что гипоксия может стимулировать провоспалительные цитокины, которые играют ключевую роль в патогенезе ревматоидного артрита [17].

Мутация в участке генома, содержащем ген EPAS1, унаследованная жителями Тибета от денисовского человека, как полагают, способствует адаптации к гипоксии [22]. Продукт гена – индуцируемый гипоксией фактор 2α (HIF2α) известен как важный участник патогенеза РА и терапевтический объект, поскольку оказывает катаболическое воздействие на хрящевую ткань [35]. Возможно, некоторые связи между ВГ и РА зависят от изменения экспрессии HIF2α при гипоксии.

↓

Similar data were reported for the HA population of Kyrgyzstan [3, 13, 34], which belongs to a different ethnic group. In Peru, the prevalence of RA and related diseases among different ethnic groups in HA areas was also higher in comparison to the average [38]. Hence, the ethnic specificity of the Tibetan population is probably not the single cause of the high RA prevalence, although it is taken into account in [44]. Nevertheless, it is likely that the ethnic differences in immune reactivity play some role. For example, a study in Nepal conducted in a village populated by ethnic Tibetans also found a very high incidence of RA [10]. With that, a special study conducted by Yuan et al. [44] has revealed that the level of autoantibodies against citrullinated peptides (early markers of RA) as well as of serum amyloid A (acute phase protein associated with RA) in Tibetans was lower than in Han and Hui people living at the same HA district of Qinghai, China. This may also witness against the ethnicity-related explanations. Comparative studies of HA and lowland Japanese populations revealed significant pro-autoimmune changes in lymphoid cell subpopulations among RA patients living at HA area and similar but less prominent changes among healthy controls in HA areas [23].

One possible explanation for this association is the impact of hypoxia on the immune system. Chronic expo-

sure to low oxygen levels at HA may induce, through HIF transcription factors, a state of excessive systemic action of inflammatory mediators, which could exacerbate autoimmune responses in susceptible individuals [30]. This aligns with previous research indicating that hypoxia can stimulate pro-inflammatory cytokines, which play a key role in the pathogenesis of rheumatoid arthritis [17].

The mutant endothelial per-ARNT-sim domain protein 1 (EPAS1) gene inherited from Denisovans is thought to adapt to hypoxic environments [22]. Its product is the hypoxia-inducible factor 2α (HIF2α). Interestingly, HIF2α is an important player and therapeutic target in RA pathogenesis because of rendering a catabolic effect on cartilage [35]. Perhaps, some relationships of HA and RA depend on alterations in HIF2α expression under hypoxic conditions.

Механизмы связи условий ВГ с аутоиммунными заболеваниями многообразны и могут включать иммунонейроэндокринные взаимодействия. Быстрое авиаперемещение здоровых добровольцев с равнины (200 м) в на ВГ (3600 м) приводит у них к значительным иммунологическим изменениям. В периферической крови были отмечены снижение числа базофилов, плазмацитоидных дендритных клеток, Т-клеток CD4+ и особенно эозинофилов. Эти изменения были более очевидны в случаях тяжелой горной болезни [20] и могут отражать стрессовое влияние гипоксии как типичного стрессора. При этом известно, что длительный и хронический стресс может при дифференцировке CD4+ Т-клеток вызвать сдвиг к фенотипу Th17, что способствует некоторым аутоиммунным заболеваниям [21].

В условиях ВГ гипоксия стимулирует дифференцировку Т-клеток в сторону Th17 посредством сигнального каскада через активин, пируваткиназу М2 и регулируемую внеклеточными сигналами киназу (ERK), что усугубляет такие аутоиммунопатии, как экспериментальный энцефаломиелит и псориаз. При этом, независимо от формы заболевания, повышается активность сенситизации лимфоцитов-киллеров, что приводит к усилению продукции провоспалительных цитокинов, в том числе интерлейкина 6 и фактора-альфа некроза опухолей [14].

Хронический стресс в условиях ВГ может также способствовать относительному снижению функции щитовидной железы [33]. Этот эффект был замечен И.Т. Калюжным у горцев в Кыргызстане и интерпретирован как адаптивное изменение, уменьшающее окислительный метаболизм при гипоксии в условиях ВГ [4]. Тем не менее, открытым остается вопрос, может ли в данном случае играть свою роль эндемический дефицит йода, отмеченный в некоторых горных районах Кыргызстана. Ведь даже субклинический гипотиреоз сопровождается склонностью к гиперпролактинемии из-за компенсирующего действия тиролибина/пролактолиберина [15]. Пролактин известен как эндокринный и паракринный стимулятор аутоиммунитета [12].

↓

The mechanistic links of HA to autoimmune diseases are multiple and involve immunoneuroendocrine interactions. Rapid air travel of healthy volunteers from lowlands (200 m) to HA (3600 m) produce significant immunologic changes in them. Reduced peripheral blood basophil, plasmacytoid dendritic cell, CD4+ T cell and, especially, eosinophil counts were noticed. These changes were more evident in severe mountain sickness cases [20] and may reflect the stress-provoking influence of hypoxia as a typical stressor. With that, it is known that prolonged and chronic stress may cause the Th17 bias in CD4+ T cell differentiation, which facilitates some autoimmune diseases [21].

Hypoxia at HA stimulates Th_{17} cell differentiation via the Activin A-PKM2 axis and the ERK pathway, which exacerbates such autoimmunopathies as experimental encephalomyelitis and psoriasis. Killer lymphocyte activity and sensitization are increased, regardless of the disease form, which elevates the production of the pro-inflammatory cytokines (IL-6, TNF-α) [14].

Chronic stress produced by HA may also contribute to a relative decrease in thyroid function [33]. This effect was noticed by I.T. Kalyuzhnyi in highlanders of Kyrgyzstan and interpreted as an adaptive change, which decreases oxidative metabolism under HA hypoxia [4]. However, it is an open question whether the endemic iodine deficiency registered in some HA areas of Kyrgyzstan could play a role in this case. Nevertheless, even subclinical hypothyroidism is accompanied by a tendency to hyperprolactinemia due to the compensatory action of thyroliberin/prolactoliberin [15]. Prolactin is known as an endocrine and paracrine stimulant of autoimmunity [12].

В условиях ВГ гипоксия посредством нескольких механизмов, включая связанные со стрессом, активирует гликолиз. Было доказано, что гликолитическая активация сигнализации от белкового комплекса mTOR может увеличить соотношение Th17/Treg, таким образом способствуя нескольким аутоиммунным заболеваниям, включая РА. Гипоксия в синовиальной среде, связанная с локальным образованием молочной кислоты, является одной из движущих сил РА, и ему могут способствовать условия ВГ, включая изменения в в микробиоте, вызванные гипоксией кишечника, [25, 40, 41].

Иммунологические исследования течения РА у жителей высокогорных регионов Кыргызстана показали, что уровень антител против цитруллинированных белков в сыворотке у них при сравнении с жителями равнинных районов в среднем на 23% выше, что может указывать на более агрессивный курс РА в усло-

виях ВГ. Количество Th17-клеток у них повышено на 19%, а количество клеток Treg снижено на 11%, что указывает на дисбаланс между воспалительными и регуляторными механизмами иммунного ответа. Концентрации провоспалительных цитокинов IL-6 и TNF-α в сыворотке были значительно выше у пациентов живущих в высокогорье, в результате чего и уровень ревматоидных факторов был у них в среднем на 15% выше [3].

↓

HA hypoxia through several mechanisms, including stress-related ones, activates glycolysis. It has been demonstrated that glycolytic activation of mTOR signaling may increase the Th17/Treg ratio, thus promoting several autoimmune diseases, including rheumatoid arthritis. Synovium hypoxia associated with local lactic acid production is one of the driving forces of this disease, and HA, as well as changes in microbiota caused by intestinal hypoxia, may facilitate it [25, 40, 41].

Immunological studies of RA course in the residents of HA regions of Kyrgyzstan showed that serum anti-citrullinated protein antibody levels in these patients, compared to patients from lowlands, were on average 23% higher, which may indicate a more aggressive course of RA at HA. Th_{17} cell counts in these subjects were elevated by 19%, while Treg cell counts were reduced by 11%, suggesting an imbalance between the inflammatory and regulatory mechanisms of the immune response. Serum concentrations of the proinflammatory cytokines IL-6 and TNF-α were significantly higher in patients living at HA. As a result, rheumatoid factor level was on average 15% higher in HA residing patients [3].

Разумеется, значимыми для связи условий ВГ с ревматическими заболеваниями могут быть и другие факторы помимо гипоксии. В том же исследовании [3, 34] было установлено, что физический труд и воздействие холода повышали риск РА в 1,8 раза, а влажность воздуха выше 70% была связана с увеличением частоты его обострений на 27%. Не следует недооценивать и то, что жизнь в условиях ВГ всегда связана с повышенными нагрузками на двигательный аппарат и, следовательно, с повышенным риском микротравм, которые в свою очередь могут способствовать развитию хронических РЗ [28]. Также большое ретроспективное исследование в Китае (с участием 512715 человек, включая 2889 пациентов с РА) недавно выявило положительные корреляции между риском РА с несколькими природными условиями там, где родились пациенты, включая факт рождения в теплое время года, низкоширотные условия и сильную инсоляцию в ранней жизни [26].

Некоторые важные выводы следуют также из изучения ревматизма [8, 39]. Отмечено, что хроническая ревматическая лихорадка связана с укороченным сроком профессиональной пригодности у шахтеров, работающих в условиях ВГ, и это вызывает обеспокоенность в связи с тем, что такие условия могут усугублять хронизацию и тяжесть ревматизма [39]. Однако вывод о том, что общая частота кардита ниже в условиях ВГ при сравнении с равнинными районами, предполагает сложные взаимодействия между высотой и РЗ. Возможно, что некоторые факторы ВГ, такие как снижение уровня кислорода и повышение воздействия ультрафиолетового излучения, связанные с улучшением обеспечения витамином D, могут влиять на микробиоту и тем самым на иммунопатологические заболевания [11, 40]. Интересно, что среди педиатрических пациентов с ревматической лихорадкой, живущих в высокогорье Кыргызстана, была зарегистрирована на фоне более мягкого развития болезни и менее активного гуморального ответа против стрептококков повышенная частота ревматических пороков сердечных клапанов, особенно справа. Авторы связывают это с тенденцией к развитию легочной гипертензии, характерной для жителей высокогорья [6].

↓

Of course, exposure of mountaineers to some other factors besides hypoxia may be also significant for HA association with rheumatic diseases. Moreover, it was found in the same study [3, 34] that physical labor and exposure to cold increased the risk of rheumatoid arthritis 1.8 times, while air humidity above 70% was associated with a 27% increase in the frequency of its exacerbations. In this regard, one should not underestimate the fact that life in HA areas is always associated with increased challenges to the locomotion apparatus and, hence, a higher risk of microtraumas, which in its turn can contribute to the development of chronic RD [28]. A large Chinese retrospective study (512715 participants with 2889 RA patients among them) recently revealed positive correlations of RA risk with several natural environmental conditions at patient's birthplace, including being born in a warm season and exposed in the early life to low-latitude conditions and extreme sunlight [26].

Studies on rheumatic fever [8, 39] also provide some important insights. The observation that chronic rheumatic fever was associated with poorer survival rates among miners working at HA raises concerns about the potential for HA to exacerbate the chronicity and severity of rheumatism [39]. However, the finding that the overall incidence of carditis was lower at HA compared to lowland areas suggests a complex interaction between altitude and rheumatic pathology. It is possible that certain factors of HA, such as reduced oxygen levels and higher ultraviolet exposure associated with better vitamin D supply, may alter microbiota thus influencing immunopathological diseases [11, 40]. Interestingly, among pediatric patients with

rheumatic fever who live in the HA regions of Kyrgyzstan, there were recorded, against the background of a more indolent course of the disease and less active anti-streptococcal humoral immunity, a higher frequency of carditis and a greater incidence of rheumatic heart valve defects, especially on the right. The authors associate this with a tendency towards pulmonary hypertension characteristic for HA inhabitants [6].

Также в условиях ВГ заслуживает внимания пурпура Шёнляйна-Геноха, особенно в связи с тем, что в качестве независимых факторов ее риска в этих регионах определены возраст и медицинские факторы, в частности аллергия, в анамнезе [43]. Это позволяет считать, что экологические триггеры, возможно связанные с высотой, могут взаимодействовать с уже существующими уязвимостями, ускоряя начало аутоиммунных заболеваний. Точные механизмы тут остаются неясными, но могут включать в себя связанные с высотой изменения сосудистых функций или иммунных реакций [19].

Повышенная распространённость аутоиммунных процессов в условиях ВГ не ограничивается ревматическими заболеваниями. Например, сравнивая распространённость тироидита Хасимото среди горцев Алтая (тилингитов) и представителей того же этноса в низкогорных районах (Алтай-кижи), Т.П. Маклакова обнаружила, что и частота аутоиммунного тиреоидита и частота носительства аутоантител к антигенам щитовидной железы выше у горцев [5].

Однако воздействия условий ВГ на различные аспекты иммунной системы вариабельны. Например, из некоторых экспериментальных данных, полученных на животных, следует снижение аллергической сенсибилизации, уровня IgE и количества лимфоцитов в крови с одновременным увеличением активности фагоцитоза после 45 дней пребывания в условиях ВГ (горный перевал Анзоб в Таджикистане, 3375 м) [1]. Таким образом, ВГ способствует не любым видам иммунопатологических и аутоиммунных заболеваний и даже может быть связано негативно с некоторыми из них. Например, исследование, проведенное в Таджикистане, показало, что частота витилиго среди местных детей отрицательно коррелирует с высотой их места жительства [2]. При иммунной тромбоцитопенической пурпуре, у проживающих на равнине (760 м) и пролеченных в течение одной-шести недель на высокогорном кыргызстанском курорте (3200 м), уровень тромбоцитов повысился, а сывороточные провоспалительные цитокины (IL-2, IL-6 и TNFα) снизились [7]. Старые эпидемиологические данные из Индии (1965-72) указывают на то, что заболеваемость РА была значительно ниже в высокогорных округах, чем на уровне моря, что, однако, может быть связано с намного более выраженными 50 лет назад, чем сегодня, различиями в качестве медицинской помощи в более или менее урбанизированных группах населения, [37].

↓

Henoch-Schőnlein purpura at HA also deserves attention, particularly because age, allergic history, and past medical anamnesis were identified as independent risk factors of the disease in these regions [43]. This suggests that environmental triggers possibly related to altitude may interact with pre-existing vulnerabilities to precipitate the onset of autoimmune disease. The exact mechanisms remain unclear, but may involve altitude-related changes in vascular function or immune responses [19].

The increased prevalence of autoimmune processes at HA is not limited to RD. For example, by comparing the incidence of Hashimoto's thyroiditis in high-mountain Altai people (Tilingites) and the members of the same ethnic group living in low-altitude areas (Altai-Kizhi), T.P. Maklakova found that both, the incidence of autoimmune thyroiditis and the frequency of carriers of autoantibodies to thyroid antigens, are higher among the HA sub-ethnic group [5].

However, the influences of HA on different facets of immune system are variable. For example, some experimental animal data suggest a decrease in allergic sensitization, IgE levels and blood lymphocyte count with concomitant increase in phagocytosis activity after 45 days of exposure to HA environment (Anzob mountain pass in Tajikistan, 3375 m) [1]. Thus, HA does not promote all kinds of immunopathological and autoimmune diseases and even may be negatively associated with some of them. For example, a study performed in Tajikistan has demonstrated that the incidence of vitiligo among local children correlated negatively with the altitude of their residence [2]. In immune thrombocytopenic purpura patients residing at lowlands (760 m) and treated for one to six weeks at Kyrgyz HA spa (3200 m), platelet count improved and serum pro-inflammatory cytokines (IL-2, IL-6 and TNFα) decreased [7]. An old epidemiological data from India (1965-72) mentioned that RA incidence was significantly lower at HA districts than at the sea level, which however could be related to differences in quality of medical aid and follow-up in more and less urbanized populations, much more pronounced 50 years ago than nowadays [37].

В целом, рассмотренные выше результаты подчеркивают необходимость в дальнейших исследоватниях механизмов связи условий ВГ с повышенной распространенностью и изменениями клинической картины РЗ. Ценные сведения о патогенезе РЗ в условиях ВГ могут дать проспективные исследования и экспериментальные модели сфокусированные на путях стиму-

ляции воспаления при гипоксии. Гипоксия (например, в синовиальной среде при артрите) может посредством HIFα способствовать ангиогенезу, воспалению, апоптозу, эрозии хряща, гликолитическому сдвигу энергетического метаболизма, привлечению фибробластов и активации иммунных клеток, связанной с продукцией провоспалительное цитокинов и окислительными повреждениями ткани, тем самым способствуя патогенезу РЗ [32, 46]. Патогенетическое значение могут иметь и другие природных факторы ВГ.

Глобальную актуальность поднятых здесь вопросов подчеркивает разнообразие географических мест проведения исследований – от Тибета и Гималаев до Тянь-Шаня, Памира и Алтая и от Анд до гор Асир и Нагано, а также этническое и культурное разнообразие населения этих регионов. Для интерпретации рассмотренных здесь данных важны различия в планировании исследований, демографии пациентов и в высоте места их проживания над уровнем моря.

В заключение, хотя имеющиеся данные позволяют предположить наличие связи между условиями ВГ и повышенной распространенностью некоторых аутоиммунных заболеваний, точные механизмы этой связи еще предстоит выяснить. Будущие исследования должны быть нацелены на прояснение этих взаимосвязей и изучение потенциальных профилактических и терапевтических стратегий против РЗ в популяциях, насчитывающих десятки миллионов постоянных жителей и миллионы туристов.

↓

Overall, these findings underscore the need for further studies of the mechanisms associating HA with the increased prevalence and altered clinical presentation of RD. Longitudinal studies and experimental models focusing on hypoxia-induced inflammatory pathways could provide valuable insights into the pathogenesis of RD at HA. Anyway, hypoxia (for example, synovial one in arthritis) can, through HIFα, promote angiogenesis, inflammation, apoptosis, cartilage erosion, glycolytic shift of energy metabolism, fibroblast attraction, and immune cells activation associated with pro-inflammatory cytokines production and oxidative damage, thus promoting the pathogenesis of RD [32, 46]. Several other natural environmental factors related to HA may also be of some mechanistic significance.

Additionally, the diverse geographic locations of the studies included in this review, from Tibet and Hymalayas to Tien Shan, Pamir and Altai and from Andes to Asir and Nagano mountains, and ethnically and culturally diverse populations there, highlight the global relevance of the issues addressed in the present review. Variation in study design, patient demographics, and altitude levels emphasizes the importance of considering local environmental and social factors when interpreting these findings.

In conclusion, while the current evidence suggests a link between HA and increased prevalence of certain autoimmune diseases, the exact mechanisms of this association remain to be elucidated. Future research should aim to clarify these relationships and explore potential preventive and therapeutic strategies against RD in HA populations numbering tens of millions of people and millions of tourists worldwide.

Декларации:

Конфликт интересов: *Отсутствует*

Финансирование: *Исследование и публикация не получали особое финансирование*

Совместное использование данных: *Не применимо к данной статье, так как в ходе исследования не были созданы или проанализированы базы данных, помимо библиографических.*

Соблюдение этических принципов: авторы заявляют, что соблюдали Хельсинкскую декларацию Всемирной медицинской ассоциации.

Вклад авторов:

ЖК: планирование, сбор данных, написание статьи, анализ данных, статистический анализ.

ЛПЧ: сбор данных, анализ данных, написание статьи, окончательный пересмотр и подача статьи.

ЗКК: сбор данных, написание статьи, статистический анализ.

МГН: сбор данных, подача статьи.

БДР: сбор данных, написание статьи, анализ данных, статистический анализ.

БТО: сбор данных, написание статьи, анализ данных, пересмотр.

Авторство: *Все названные авторы соответствуют критериям Международного комитета редакторов медицинских журналов (ICMJE) для авторства, отвечают за качество работы в целом и дают согласие на публикацию этой версии.*

↓

Declarations:

Conflict of interest: *Nothing to declare.*

Data sharing: *Data sharing does not apply to this article, as no datasets were generated or analyzed during the current study.*

Funding source: *No funding or sponsorship was received for this study or publication of this article.*

Compliance with Ethics Guidelines: *The authors declare that the World Medical Association Declaration of Helsinki was followed.*

Author Contributions:

JFC: design, data collection, writing, data analysis, statistical analysis.

LPC: data collection, data analysis, writing, final revision, submission.

ZKK: data collection, writing, statistical analysis.
MGN: data collection, submission.
BDR: data collection, writing, data analysis, statistical analysis.
BTO: data collection, writing, data analysis, revision.

Authorship: *All named authors meet the International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) criteria for authorship for this article, take responsibility for the integrity of the work as a whole, and give their approval for this version to be published.*

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Галиев РС, Дробленков АВ. Гипосенсибилизирующий эффект высокогорья и иммуногенетический закон. Медицинская иммунология. 2023;25(2):409-14. doi.org/10.15789/10.15789/1563-0625-HEO-2335.
2. Исматуллоева СС, Мухамадиева КМ. Витилиго у детей, проживающих в разных климатогеографических регионах Таджикистана. Светоч науки. 2024;3:100-9. EDN NUYDVO.
3. Кадыралиева ЗК, Рязанцев БД. Заболеваемость ревматоидным артритом и его особенности течения в Кыргызстане. Innova. 2025; 11(2):106-7. EDN TXTTST.
4. Калюжный ИТ. Функция щитовидной железы при сердечно-сосудистых заболеваниях в условиях горного климата. Фрунзе: Илим; 1977.
5. Маклакова ТП. Заболевания щитовидной железы у коренного населения Республики Алтай: эпидемиологические, клинические, гормонально-метаболические и профилактические аспекты. Международный эндокринологический журнал. 2011;(4):94-103. EDN RVNJFJ.
6. Саатова ГМ, Накажима Т, Омурзакова Н. Ревматическая лихорадка в Кыргызстане: распространенность, последствия, стратегия контроля. Здоровье матери и ребенка. 2009;3:11-7. EDN HBSJJL.
7. Эралиева М.О. Клиническая картина и изменения цитокинов у больных идиопатической тромбоцитопенической пурпурой в процессе высокогорного лечения. Медицина Кыргызстана. 2014;2(1): 31-3. EDN XQDCPJ.

Общий список литературы / Reference List

1. Galiev RS, Droblenkov AV. [Hyposensitizing effect of high altitude and immunogenetic law]. Meditsynskaya Immunologiya. 2023;25(2):409-14. doi.org/10.15789/10.15789/1563-0625-HEO-2335. (In Russ.)
2. Ismatulloeva SS, Mukhamadieva KM. [Vitiligo in children living in different climatic and geographic regions of Tajikistan]. Svetoch Nauki. 2024;3:100-9. EDN NUYDVO. (In Russ.)
3. Kadyralieva ZK, Ryazantsev BD. [Incidence of rheumatoid arthritis and its course characteristics in Kyrgyzstan]. Innova. 2025;11(2):106-7. (In Russ.).EDN TXTTST.
4. Kalyuzhnyi I.T. Funktsiya Schitovidnoy Zhelezy pri Serdechno-Sosudistykh Zabolevaniyakh v Usloviyakh Gornogo Klimata [Function of Thyroid Gland in Cardiovascular Diseases under the Conditions of Mountainous Climate]. Frunze: Ilim; 1977. (In Russ.).
5. Maklakova TP. [Thyroid diseases in the indigenous population of the Altai Republic: epidemiological, clinical, hormonal-metabolic and preventive aspects. Mezhdunarodnyi Endokrinologicheskiy Zhurnal. 2011;(4): 94-103. EDN RVNJFJ. (In Russ.)
6. Saatova G.M., Nakajima T., Omurzakova N. [Rheumatic fever in Kyrgyzstan: prevalence, consequences, control strategy]. Zdorovye Materi i Rebenka. 2009;3:11-7. EDN HBSJJL. (In Russ.)
7. Eralieva MO. [Clinical picture and cytokine changes in patients with idiopathic thrombocytopenic purpura during high-altitude treatment]. Meditsyna Kyrgyzstana. 2014;2:31-3. EDN XQDCPJ. (In Russ.)
8. Abbag FI. Preliminary study on acute rheumatic fever at high and low altitudes of Asir region. J Family Community Med. 1996;3(1):35-8.
9. Almutairi K, Nossent J, Preen D, Keen H, Inderjeeth C. The global prevalence of rheumatoid arthritis: a meta-analysis based on a systematic review. Rheumatol Int. 2021;41(5):863-77. doi: 10.1007/s00296-020-04731-0.
10. Arima H, Koirala S, Nema K, Nakano M, Ito H, Poudel KM, Pandey K, Pandey BD, Yamamoto T. High prevalence of rheumatoid arthritis and its risk factors among Tibetan highlanders living in Tsarang, Mustang district of Nepal. J Physiol Anthropol. 2022; 41(1):12. doi: 10.1186/s40101-022-00283-3.
11. Basnyat B, Murdoch DR. High-altitude illness. Lancet. 2003; 361(9373):1967-74. doi: 10.1016/S0140-6736(03)13591-X.

12. Borba V, Carrera-Bastos P, Zandman-Goddard G, Lucia A, Shoenfeld Y. Prolactin's paradox: Friend, foe, or both in immune regulation? Autoimmun Rev. 2024;23(11):103643. doi: 10.1016/j.autrev.2024.103643.
13. Brimkulov N, Louton L, Sydykova S, Vinnikov D, Imanalieva F. Morbidity in the mountainous province of Kyrgyzstan: Results from a population-based cross-sectional study. High Alt Med Biol. 2017;18(4):338-42. doi: 10.1089/ham.2017.0046.
14. Cai C, Ni G, Chen L, Deng C, Chai S, Wang R, Zhang R, Luo F, Ge RL. Altitude hypoxia and hypoxemia: pathogenesis and management. Signal Transduct Target Ther. 2026;11(1):27. doi: 10.1038/s41392-025-02531-1.
15. Churilov LP, Stroev YI, Serdyuk IY, Kaminova-Mudzhikova OM, Belyaeva IV, Gvozdetsky AN, Nitsa NA, Mikhailova LR. Autoimmune thyroiditis: Centennial jubilee of a social disease and its comorbidity. Pathophysiology. 2014;21(2):135-45. doi: 10.1016/j.pathophys.2013.11.002.
16. Cui A, Li H, Wang D, Zhong J, Chen Y, Lu H. Global and regional prevalence, incidence and risk factors of knee osteoarthritis in population-based studies. EClinicalMedicine. 2020; 29-30:100587. doi: 10.1016/j.eclinm.2020.100587.
17. Fearon U, Canavan M, Biniecka M, Veale DJ. Hypoxia, mitochondrial dysfunction and synovial invasiveness in rheumatoid arthritis. Nat Rev Rheumatol. 2016; 12(7):385-97. doi: 10.1038/nrrheum.2016.69.
18. GEO-RA Group. Latitude gradient influences the age of onset of rheumatoid arthritis: a worldwide survey. Clin Rheumatol. 2017; 36(3):485-97. doi: 10.1007/s10067-016-3481-9.
19. Groves BM, Reeves JT, Sutton JR, Wagner PD, Cymerman A, Malconian MK, Rock PB, Young PM, Houston CS. Operation Everest II: elevated high-altitude pulmonary resistance unresponsive to oxygen. J Appl Physiol 1987; 63(2):521-30. doi: 10.1152/jappl.1987.63.2.521.
20. Han J, Gao J, Ma Y, Li Y, Wu C, Le S, Zhao Y, Li H, Luo Y, Han X, Guo Y, Li Y, Zhou G, Jin L, Wang J, Qian F. Distinct immune cell profiles associated with high-altitude hypoxia and severe acute mountain sickness. J Physiol. 2025. doi: 10.1113/JP288584.
21. Harpaz I, Abutbul S, Nemirovsky A, Gal R, Cohen H, Monsonego A. Chronic exposure to stress predisposes to higher autoimmune susceptibility in C57BL/6 mice: glucocorticoids as a double-edged sword. Eur J Immunol. 2013; 43:758-69. doi: 10.1002/eji.201242613.
22. Huerta-Sánchez E, Jin X, Asan BZ, Peter BM, Vinckenbosch N, et al. Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA. Nature. 2014;512(7513):194-7. doi: 10.1038/nature13408.
23. Kondo Y, Abe S, Toko H, Hirota T, Takahashi H, Shimizu M, Noma H, Tsuboi H, Matsumoto I, Inaba T, Sumida T. Effect of climatic environment on immunological features of rheumatoid arthritis. Sci Rep. 2023; 13(1):1304. doi: 10.1038/s41598-022-27153-3.
24. Konisti S, Kiriakidis S, Paleolog EM. Hypoxia – a key regulator of angiogenesis and inflammation in rheumatoid arthritis. Nat Rev Rheumatol. 2012; 8(3):153-62. doi: 10.1038/nrrheum.2011.205.
25. Liu A, Li S, Huo C, Qian T, Zhu Y, Jiang T. The effect of hypoxia on rheumatoid arthritis. Mol Rheumatol. 2025;35:787-800. doi: 10.1093/mr/roaf046.
26. Luo L, Hee JY, Zang S, Liu Z, Tang K, Zhang X, Li C. Natural environmental factors at birth on risk for rheumatoid arthritis: the impact of season, temperature, latitude, and sunlight exposure. BMC Public Health. 2025; 25(1):1267. doi: 10.1186/s12889-025-22448-2.
27. Ma Y, Chen H, Lv W, Wei S, Zou Y, Li R, Wang J, She W, Yuan L, Tao J, Guo X, Bi S, Tian H, Ma Y, Sun H, Sun C, Xu J, Dong Y, Kang J, Lv H, Zhang M, Jiang Y. Global, regional and national burden of rheumatoid arthritis from 1990 to 2021, with projections of incidence to 2050: a systematic and comprehensive analysis of the Global Burden of Disease study 2021. Biomark Res. 2025; 13(1):47. doi: 10.1186/s40364-025-00760-8.
28. Martin JA, Buckwalter JA. Post-traumatic osteoarthritis: the role of stress induced chondrocyte damage. Biorheology. 2006; 43(3,4):517-21.
29. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG; PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS Med. 2009;6(7):e1000097. doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
30. Palazon A, Goldrath AW, Nizet V, Johnson RS. HIF transcription factors, inflammation, and immunity. Immunity. 2014; 41:518-28. doi: 10.1016/j.immuni.2014.09.008.
31. Parks CG, Miller FW, Pollard KM, Selmi C, Germolec D, Joyce K, Rose NR, Humble MC. Expert panel workshop consensus statement on the role of the environment in the development of autoimmune disease. Int J Mol Sci. 2014;15:14269-97. doi: 10.3390/ijms150814269.
32. Quiñonez-Flores CM, González-Chávez SA, Pacheco-Tena C. Hypoxia and its implications in rheumatoid arthritis. J Biomed Sci. 2016;23(1):62. doi: 10.1186/s12929-016-0281-0.

33. Re RN, Kourides IA, Ridgway EC, Weintraub BD, Maloof F. The effect of glucocorticoid administration on human pituitary secretion of thyrotropin and prolactin. J Clin Endocrinol Metab. 1976;43:338-46.
34. Ryazantsev B, Kadyralieva Z, Orozbekova B, Kybanychbekovna KZ, Khanferyan R. Clinical features of the course of rheumatoid arthritis in Kyrgyzstan. In: 19th International Congress of Immunology - IUIS 2025. August 17-25, Vienna. Frontiers Abstract Book. Frontiers Media SA: Vienna, 2025. P. 3823-4. doi 10.3389/978-2-8325-6558-2.
35. Ryu J-H, Chae C-S, Kwak J-S, Oh H, Shin Y, Huh YH, et al. Hypoxia-inducible factor-2α is an essential catabolic regulator of inflammatory rheumatoid arthritis. PLoS Biol. 2014;12(6): e1001881. doi: 10.1371/journal.pbio.1001881.
36. Safiri S, Kolahi AA, Smith E, Hill C, Bettampadi D, Mansournia MA, Hoy D, Ashrafi-Asgarabad A, Sepidarkish M, Almasi-Hashiani A, Collins G, Kaufman J, Qorbani M, Moradi-Lakeh M, Woolf AD, Guillemin F, March L, Cross M. Global, regional and national burden of osteoarthritis 1990-2017: a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2017. Ann Rheum Dis. 2020;79(6):819-28. doi: 10.1136/annrheumdis-2019-216515.
37. Singh I, Chohan IS, Lal M, Khanna PK, Srivastava MC, Nanda RB, Lamba JS, Malhotra MS. Effects of high altitude stay on the incidence of common diseases in man. Int J Biometeorol. 1977;21(2):93-122. doi: 10.1007/BF01553705.
38. Vega-Hinojosa O, Cardiel MH, Ochoa-Miranda P. Prevalence of musculoskeletal manifestations and related disabilities in a Peruvian urban population living at high altitude. COPCORD Study. Stage I. Reumatol Clin (Engl ed). 2018;14:278-84. doi: 10.1016/j.reuma.2017.01.011.
39. Vinnikov D, Krasotski V. Healthy worker survival effect at a high-altitude mine: prospective cohort observation. Sci Rep. 2022; 12(1):13903. doi:10.1038/s41598-022-18331-4.
40. Wang H, Fang K, Yan W, Chang X T-cell immune imbalance in rheumatoid arthritis is associated with alterations in NK cells and NK-like T cells expressing CD38. J Innate Immun. 2022; 14:148-66. doi: 10.1159/000516642.
41. Wang Z, Xu Z, Zong M, Fan L. Metabolic regulation of Th17 and Treg cell balance by the mTOR signaling. Metab Open. 2025;26:100369. doi: 10.1016/j.metop.2025.100369.
42. Wedum BG, Darley W, Rhodes PH. Prevalence of rheumatic heart disease at high altitudes. Am J Dis Child. 1950;79:205-10. doi: 10.1001/archpedi.1950.04040010216001.
43. Wei H, Luo Z, Zong C, Jin B. [Analysis of clinical characteristics of Henoch-Schonlein purpura patients from different altitudes in plateau areas]. Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban. 2021;53(6):1072-7. doi: 10.19723/j.issn.1671-167X.2021.06.011. (in Chinese)
44. Yuan X, Cui S, Liu Y, Song T. Analysis of serum rheumatoid factors in patients with rheumatoid arthritis in Han, Tibetan and Hui nationalities in Qinghai. Int Immunopharmacol. 2020;83:106380. doi: 10.1016/j.intimp.2020.106380.
45. Zhang Q, Liu Q, Lin C, Baima Y, Li H, Gong H, Lin J. The prevalence of rheumatoid arthritis in middle-aged and elderly people living in Naqu City, Tibet, Autonomous Region of China. J Orthop Surg Res. 2020; 15(1):338. doi: 10.1186/s13018-020-01883-4. PMID: 32811526; PMCID: PMC7436952.
46. Zheng QH, Zhai Y, Wang YH, Pan Z. The role of hypoxic microenvironment in rheumatoid arthritis. Front Immunol. 2025; 16:1633406. doi: 10.3389/fimmu.2025.1633406.



Подписано в печать **28.06.2026.**
Дата выхода в свет **18.07.2026.**
Отпечатано в ***ООО «Типография Лесник»***
197183, г. Санкт-Петербург, ул. Сабировская, 37, Лит. Д, комната 206
Тел.: **+7 (812) 649-73-14.**
Тираж **30 экз.**
Цена свободная
Адрес издателя и редакции:
197110, Санкт-Петербург, Большая Разночинная ул., д. 28; тел./факс: (812) 415-41-61
Учредитель: **Фонд научных исследований "XXI век"**
Главный редактор: **Розенберг Геннадий Самуилович**