

2025

Т. 17, № 1

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ
И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ



БИОСФЕРА

ISSN 2077-1371 / www.21bs.ru

**ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛЫ
ОТ СЖИГАНИЯ ОСАДКА
СТОЧНЫХ ВОД КАК
РЕКУЛЬТИВАЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА**

Л.П. Капелькина

*CHARACTERIZATION OF ASH
GENERATED BY SEWAGE SLUDGE
INCINERATION AND TESTED
AS A SUBSTRATE FOR
REVEGETATION*

L.P. Kapelkina

**ДЕСТРУКЦИЯ
ПЕРФТОРКАРБОНОВЫХ
КИСЛОТ БАКТЕРИЯМИ РОДА
PSEUDOMONAS ПОДТВЕРЖДЕНА
ДАННЫМИ ОБ ИХ ГЕНОМАХ
И МЕТАБОЛИТАХ**

**С.П. Четвериков, Г.Г. Худайгулов,
Д.А. Шарипов, С.Н. Стариков**

*DECOMPOSITION OF
PERFLUOROCARBONIC ACIDS
BY PSEUDOMONAS BACTERIA
IS CONFIRMED BY DATA ON THEIR
GENOMES AND METABOLITES*
*S.P. Chetverikov, G.G. Khudaygulov,
D.A. Sharipov, S.N. Starikov*

**ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА
ПРИВОДИТ К УВЕЛИЧЕНИЮ
ЧИСЛЕННОСТИ БЕРЕГОВЫХ
ЛЕЖБИЩ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ
(PUSA SIBIRICA GM.)**

**Е.А. Петров, А.Б. Купчинский,
М.Е. Овдин, А.В. Шаблов**

*CLIMATE WARMING LEADS
TO INCREASE IN THE NUMBER
OF SHORE ROOKERIES OF BAIKAL
SEAL (PUSA SIBIRICA GM.)*

*E.A. Petrov, A.B. Kupchinsky,
M.E. Ovdin, A.V. Shablov*



ФОТО: SERGEY PESTEREV, UNSPLASH.COM

БИОСФЕРА

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

Том 17, № 1

Санкт-Петербург
2025



BIOSPHERE

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

Vol. 17, No. 1

Saint Petersburg
2025

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

КОРРЕКТОР: Н.А. НАТАРОВА

PROOFREADING: N.A. NATAROVA

АДМИН САЙТА:

И.В. ПЕРЕСКОКОВ

SITE ADMIN:

I.V. PERESKOKOV

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)*

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

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

В.В. Глухов (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;**

Тел./факс: (812) 415-41-61

Эл. почта: biosphaera@21mm.ru

Электронная версия:

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

POSTAL ADDRESS:

**28 Bolshaya Raznochinnaya,
197110,
Saint Petersburg, Russia;**

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

E-mail: biosphaera@21mm.ru

Online version:

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

СОДЕРЖАНИЕ

А3	СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS	36	СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ГУМАТОВ И РИЗОБАКТЕРИЙ НА РОСТ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ САЖЕНЦЕВ СПИРЕИ ЯПОНСКОЙ (SPIRAEA JAPONICA, L.F.) Р.С. Иванов, М.Д. Тимергалин, С.П. Четвериков, Н.А. Рязанова, З.Х. Шигапов, А.М. Назаров, Г.Р. Кудоярова JOINT EFFECTS OF HUMATES AND RHIZOBACTERIA ON THE GROWTH AND VIABILITY OF JAPANESE SPIRAEA (SPIRAEA JAPONICA, L.F.) SEEDLINGS R.S. Ivanov, M.D. Timerlagin, S.P. Chetverikov, N.A. Riazanova, Z.H. Shigapov, A.M. Nazarov, G.D. Kudoyarova
	ПРАКТИКА / PRACTICE		
1	ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД КАК РЕКУЛЬТИВАЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Л.П. Капелькина CHARACTERIZATION OF ASH GENERATED BY SEWAGE SLUDGE INCINERATION AND TESTED AS A SUBSTRATE FOR REVEGETATION L.P. Kapelkina		
12	ДЕСТРУКЦИЯ ПЕРФТОРКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ БАКТЕРИЯМИ РОДА PSEUDOMONAS ПОДТВЕРЖДЕНА ДАННЫМИ ОБ ИХ ГЕНОМАХ И МЕТАБОЛИТАХ С.П. Четвериков, Г.Г. Худайгулов, Д.А. Шарипов, С.Н. Стариков DECOMPOSITION OF PERFLUOROCARBONIC ACIDS BY PSEUDOMONAS BACTERIA IS CONFIRMED BY DATA ON THEIR GENOMES AND METABOLITES S.P. Chetverikov, G.G. Khudaygulov, D.A. Sharipov, S.N. Starikov	46	ПРИРОДА / NATURE ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА ПРИВОДИТ К УВЕЛИЧЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА БЕРЕГОВЫХ ЛЕЖБИЩ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ (PUSA SIBIRICA GM.) Е.А. Петров, А.Б. Купчинский, М. Е. Овдин, А.В. Шаблов CLIMATE WARMING LEADS TO INCREASE IN THE NUMBER OF SHORE ROOKERIES OF BAIKAL SEAL (PUSA SIBIRICA GM.) E.A. Petrov, A.B. Kupchinsky, M.E. Ovdin, A.V. Shablov
25	ЗЕЛЕНЫЕ НАСАЖДЕНИЯ МАЛЫХ ГОРОДОВ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ Д.В. Жучков, В.П. Макаренко GREEN AREAS OF SMALL TOWNS IN THE SOUTHERN FAR EAST OF RUSSIA AS AN INDICATOR OF QUALITY OF URBAN ENVIRONMENT D.V. Zhuchkov, V.P. Makarenko	59	ОБЩЕСТВО / SOCIETY АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРАВОНАРУШЕНИЙ В ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ ТУРИЗМА Ю.И. Баева, Н.А. Черных ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF ENVIRONMENTAL VIOLATIONS IN TVER REGION IN THE CONTEXT OF TOURISM DEVELOPMENT Yu.I. Baeva, N.A. Chernykh



ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД КАК РЕКУЛЬТИВАЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Л.П. Капелькина

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: kapelkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.08.2024; принята к печати 18.11.2024

Изучены состав и свойства золы от сжигания осадка сточных вод Северных очистных сооружений Санкт-Петербурга. Определена ее пригодность для биологической рекультивации. Состав золы неоднородный, что обусловлено разнообразием сточных вод, поступающих на очистные сооружения. По гранулометрическому составу зола соответствует пылеватому суглинку или пылеватой супеси (классификация Качинского). Валовой состав золы близок по содержанию основных окислов к зональным почвам. Преобладают окислы кремния, алюминия, железа. В золе очень низкое содержание органического вещества (до 1–3%) и высокое, избыточное для роста растений содержание соединений калия и фосфора. Вследствие высокотемпературной обработки сырого осадка в золе отсутствует основной элемент питания – азот. У водной взвеси золы щелочная реакция. Гидролитическая кислотность золы низкая. Пористость высокая. В золе повышенные концентрации как валовых, так и подвижных форм ряда тяжелых металлов, прежде всего кадмия, относящегося к 1-му классу опасности. Несмотря на большое число исследований по утилизации золы в различных направлениях, ее промышленное использование не налажено. Ежегодное поступление большого количества золы на полигоны и нерешенность проблемы ее утилизации обусловили необходимость изучения ее состава и свойств как рекультивационного материала. Для установления пригодности золы для рекультивации на отсыпанный золой участок осуществлен посев различных видов травянистых многолетних растений. Установлены активное поселение дикорастущих растений с окружающей местности на этот участок и возможность рекультивации золоотвала, имеющей санитарно-гигиеническую направленность.

Ключевые слова: состав и свойства золы, осадок сточных вод, тяжелые металлы, рекультивация.

CHARACTERIZATION OF ASH GENERATED BY SEWAGE SLUDGE INCINERATION AND TESTED AS A SUBSTRATE FOR REVEGETATION

L.P. Kapelkina

Saint-Petersburg Research Center of Environmental Safety, the Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, Russia

Email: kapelkina@mail.ru

The present communication presents the results of studies of the composition and physical properties of ash generated by incineration of sewage sludge at the Northern Sewage Water Treatment Plant in Saint Petersburg. The suitability of ash for biological reclamation has been determined. The composition of ash is heterogeneous, which is due to the diversity of wastewater entering the treatment facilities. In terms of its granulometric composition, ash corresponds to dusty loam or dusty clay sand according to Kachinskiy classification. The gross composition of ash is close, in terms of the content of prevalent oxides, to the zonal soils. Silica, aluminum and iron oxides prevail. Organic matter content is very low (up to 1-3%), whereas the contents of potassium and phosphorus compounds is excessive for plant vegetation. Because of the high-temperature treatment of raw sediment, there is no nitrogen, which is an essential nutrient for plants. Ash suspension is alkaline. The hydrolytic acidity of ash is low. Ash porosity is high. Elevated in the ash are the contents of some heavy metals and their labile forms. Among them, cadmium is referred to hazard Class 1. Despite numerous studies of the utility of ash for different applications, it is still not used in industry. The large amounts of ash disposed at landfills, the problem of its utilization being still suspended, necessitates further studies of the composition and properties of ash as a possible substrate suitable for reclamation purposes. To this end, ash was applied to a test plot, and several perennial grasses were sowed there. The observation that wild growing plants vigorously penetrate the test plot suggests the possibility of reclamation of ash dumps for sanitary and hygienic purposes.

Keywords: ash composition and properties, sewage sludge, heavy metals, revegetation.

Введение

Качественная очистка сточных вод обуславливает увеличение содержания загрязняющих веществ

в осадке сточных вод (ОСВ). Проблемы утилизации сырого осадка сточных вод рассмотрены во многих работах [3, 4, 18]. Для избавления от большого коли-

чества осадка в Санкт-Петербурге принято решение о его сжигании. Санкт-Петербург является первым и единственным городом России, в котором к настоящему времени практически полностью решена проблема утилизации сырого осадка путем его сжигания в псевдоожиженном слое [10]. Сжигание ОСВ признается перспективным направлением его утилизации [2, 5]. Метод сжигания ОСВ в Петербурге позволил сократить его объем более чем в 10 раз за счет потерь воды, выгорания органических веществ, в том числе токсичных. Тем не менее, общее количество ежегодно образуемой золы составляет около 40–50 тысяч тонн в год, что создает определенные сложности для ее размещения в связи с ограниченностью земель.

Всесторонняя оценка состава и свойств золы является необходимым условием как для выяснения возможности ее утилизации в различных направлениях [16, 23, 31], так и для определения степени ее пригодности для биологической рекультивации, восстановления нарушенных земель. Поиск технологических решений по утилизации золы – определяющий фактор в решении проблемы безотходной и/или малоотходной технологии, путь к снижению объемов и площадей, занятых этим отходом, а рекультивация земель, занятых золой, позволит сократить и вернуть в хозяйственный оборот площади, занятые ею.

В 1970–1980-е годы в Ленинграде рядом научно-исследовательских институтов (ВНИИ торфяной промышленности, Институтом химической мелиорации почв и других) были проведены обширные исследования по изучению возможности использования сырого осадка в качестве удобрений, проведены экспериментальные работы на сельскохозяйственных полях и при озеленении города, разработаны Рекомендации по ее использованию в зеленом строительстве и сельском хозяйстве¹. Но разрешение санитарных органов на использование ОСВ не было получено из-за содержащегося в осадке большого количества тяжелых металлов (ТМ), наличия яиц гельминтов и по другим причинам. Это обусловило поиск других направлений утилизации осадка, и было принято решение по его сжиганию.

Зарубежный опыт показывает весьма разнообразные методы утилизации осадка сточных вод. Так, осадок сточных вод практически полностью сжигается в Нидерландах и в Швейцарии – более 95%, а в Германии и Австрии – более 60%. В Сербии, Боснии, Хорватии, на Мальте осадок практически полностью размещается на полигонах. В Албании, Португалии, Великобритании, Ирландии, Испании свыше 60% осадка используется на сельскохозяйственных полях [13].

¹ Рекомендации по использованию осадков городских сточных вод в зеленом строительстве и сельском хозяйстве. Ленинград: Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-технологический институт химической мелиорации почв; 1987.

В настоящее время проводятся исследования вещественного состава и свойств золы ОСВ в Санкт-Петербурге, Новосибирске, Омске [7, 11, 21] и ее токсичности [6]. В свою очередь проведена апробация технологических решений по использованию золы в дорожном строительстве [9, 14], в производстве золопенобетона [12, 20] и керамических изделий [19, 22, 25], для извлечения фосфора [17, 32] и изучения его удобрительных свойств [24, 26, 29], при реализации технологии 3D-печати [27], а также в составе различных строительных материалов и в других применениях [15, 30, 33]. Однако публикаций по изучению и использованию золы для улучшения свойств почв и для благоустройства и озеленения территорий в качестве рекультивационного материала относительно немного [8, 28]. Несмотря на значительное число проведенных исследований, промышленное использование золы не налажено вследствие нерентабельности предлагаемых технологий и сложности реального их применения. Кроме того, в определенной степени ограничивает область ее применения способность содержащихся в золе ТМ при контакте с водой и изменении реакции среды переходить в подвижную форму. При сжигании осадка процентное содержание ТМ в золе увеличивается за счет выгорания органического вещества. Нерешенность проблемы промышленной утилизации золы и большие объемы ее ежегодного образования обусловили целесообразность изучения золы ОСВ как субстрата для биологической рекультивации и рассмотрение, как возможного варианта, рекультивации полигона на месте размещения золы при заполнении полигона до проектных отметок.

Целью исследования явилось изучение состава и свойств золы как рекультивационного материала. Наряду с изучением свойств золы были проведены экспериментальные работы по санитарно-гигиеническому направлению рекультивации без применения плодородного слоя почвы, то есть при минимуме затрат.

Изучение состава и свойств золы ОСВ как субстрата для биологической рекультивации осуществлялось методами, принятыми в почвоведении [1]. Полевые работы по рекультивации на полигоне золы ОСВ в Санкт-Петербурге проведены впервые.

Методы исследования

Многокомпонентный, неоднородный и непостоянный состав золы ОСВ определяет необходимость учета многих показателей при выборе направлений ее использования. Состав золы зависит от поступающего на очистные сооружения осадка сточных вод. Пробы золы были отобраны на полигоне Северных очистных сооружений. Две пробы золы отобраны согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 на полевых участках с площадок 10 × 10 м. Каждая проба состояла из 10 точечных проб, которые были объединены и смешаны. Одна проба отобрана на заводе.

Проба № 1 отобрана на полигоне в месте размещения золы. Глубина отбора 0–5 см.

Проба № 2 отобрана непосредственно на заводе по сжиганию ОСВ.

Проба № 3 отобрана на участке заложения полевого опыта с глубины 0–20 см (зона основного размещения корневых систем травянистых растений).

Гранулометрический состав золы определен по ГОСТ 12536-2014. Название грунта дано по Качинскому, как это принято в почвоведении.

Валовой химический состав золы ОСВ определен соответственно «Руководству по химическому анализу почв» [1].

Валовые формы химических элементов определены методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98). Подвижные формы химических элементов определены в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4,8 (ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08). Массовая доля водорастворимых форм тяжелых металлов определена по М-МВИ-80-2008. pH водной вытяжки определен по ГОСТ 26423-85. Емкость катионного обмена (ммоль/100 г) – по ГОСТ 17.4.4.01-84. Гидролитическая кислотность (ммоль/100 г) – по Каппену (ГОСТ 26212-2021).

Фосфор и калий (подвижная форма) определены по методу Чирикова (ГОСТ 26204-91) и по методу Мачигина (ГОСТ 26205-91), водорастворимые формы этих элементов определены согласно «Методическим рекомендациям по анализу объектов неизвестного состава (воздух, вода, почва, промышленные продукты и полупродукты, отходы и др.)» методом атомно-эмиссионной спектрометрии с микроволновой плазмой АЭС-МП (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»; ФР.1.31.2019.34143).

Аналитические работы выполнены в аккредитованной лаборатории Почвенного института им. В.В. Докучаева (г. Москва).

Результаты исследований СВОЙСТВА ЗОЛЫ

Зола по своим физическим свойствам представляет собой однородный по структуре, очень легкий, сыпучий, тонкодисперсный, сильно пылящий материал. Ее насыпная плотность составляет от 0,68 г/см³ [16] до 0,74 г/см³ [11]. Зола, погруженная в воду, меняет цвет на более темный, становится более плотной, тонет в воде, ее плотность становится больше единицы.

По гранулометрическому составу (таблица 1) золу следует классифицировать как пылеватый легкий суглинок или как пылеватую супесь (по классификации Качинского, принятой в почвоведении). Преобладающими в золе являются фракции мелкого песка и крупной пыли. Частицы этих размеров обладают очень малой поглотительной способностью. Зола бесструктурная, представлена элементарными частицами, не находящимися в микроагрегатном состоянии. Присутствие в золе большого количества пылевой фракции обуславливает ее сильное пыление.

Пробы золы были подвергнуты валовому (вещественному) анализу (таблица 2). Содержание окислов в золе сравнивалось с общим содержанием окислов в зональной лесной подзолистой почве Ленинградской области. Результаты проведенных анализов свидетельствуют об определенном сходстве между золой ОСВ и зональными подзолистыми почвами. В анализируемых пробах золы, как и в зональных подзолистых почвах, на первом месте по содержанию находятся окислы кремния, на втором – окислы алюминия. В повышенных количествах в золе содержатся окислы железа и особенно фосфора. Окись серы присутствует в золе в количестве, значительно превышающем ее содержание в природной лесной почве, не подвергнутой техногенному воздействию. Содержание основных элементов питания растений – азота, фосфора, калия (N, P, K) – в золе не сбалансировано: в избыточном

Табл. 1

Гранулометрический состав золы ОСВ, %

Фракции, мм	Наименование пробы				Название фракции
	Зола ОСВ № 1	Зола ОСВ № 2	Зола ОСВ № 3	Почва (горизонты A ₁ -C)	
0,5–0,25	0,50	–	–	–	Песок средний
0,25–0,10	4,80	3,15	2,30	3,40	Песок мелкий
0,10–0,05	27,55	30,02	31,02	27,36	
0,05–0,01	48,05	44,25	42,64	48,16	Пыль крупная
0,01–0,005	6,76	7,12	7,88	7,36	Пыль средняя
0,005–0,001	5,42	7,10	6,82	5,80	Пыль мелкая
< 0,001	6,92	8,36	9,34	7,92	Ил
Σ фракций менее 0,01	19,10	22,58	24,04	21,08	–
Название грунта по гранулометрическому составу	Супесь пылеватая	Суглинок легкий пылеватый	Суглинок легкий пылеватый	Суглинок легкий пылеватый	–

количестве содержатся окислы фосфора, но из-за высокотемпературной обработки в ней практически отсутствует основной элемент питания растений – азот. Содержание остаточного количества органического вещества в золе очень низкое и по результатам проведенных анализов не превышает 2%.

Результаты определения валового содержания ТМ и содержания их подвижных форм в золе приведены в табл. 3. ТМ характеризуются высокой токсичностью, многие из них обладают способностью накапливаться

в тканях живых организмов, что определяет их негативную роль при формировании экологической нагрузки на объекты окружающей среды и население. Подвижные формы способны мигрировать в почву, воду, растениеводческую продукцию. Именно подвижные формы химических элементов обуславливают токсичность или экологическую безопасность среды. Обычно подвижность ТМ в грунтах и почвах оценивают по их способности экстрагироваться различными растворителями. Наиболее часто употре-

Табл. 2

Валовое содержание окислов в золе (% в расчете на прокаленную навеску)

Наименование пробы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃
Зола ОСВ № 1	53,1	12,0	9,02	6,07	1,21	2,63	2,98	0,25	0,14	10,28	1,77
Зола ОСВ № 2	51,1	13,1	9,58	6,20	1,31	2,70	2,70	0,25	0,16	11,05	1,90
Зола ОСВ № 3	50,4	13,4	9,44	5,32	1,51	2,46	2,47	0,26	0,24	11,77	1,98
Зональная почва (горизонты A ₁ -C)	65–75	13–19	4,4–5,8	0,9–1,3	1,2–2,3	1,17–1,42	1,9–3,5	0,3–0,5	0,12–0,21	0,02–0,1	0,02

Табл. 3

Содержание валовых и подвижных форм химических элементов в пробах золы ОСВ, мг/кг

Элемент	Валовое содержание	Подвижные формы	Процент подвижных форм относительно валового содержания
Проба № 1			
Марганец	980 ± 290	96 ± 14	9,8
Железо	50000 ± 13000	12,5 ± 1,9	0,025
Кадмий	28 ± 13	2,4 ± 0,6	8,57
Хром	123 ± 25	0,30 ± 0,09	0,24
Медь	250 ± 50	21 ± 3	8,4
Никель	59 ± 21	0,91 ± 0,27	1,54
Свинец	47 ± 12	1,5 ± 0,4	3,19
Цинк	850 ± 170	37 ± 6	4,35
Кобальт	24 ± 10	0,43 ± 0,13	1,79
Проба № 2			
Марганец	990 ± 300	86 ± 13	8,8
Железо	51000 ± 14000	9,7 ± 2,4	0,019
Кадмий	32 ± 16	2,5 ± 0,6	7,8
Хром	270 ± 50	0,39 ± 0,12	0,14
Медь	330 ± 70	23 ± 3	6,97
Никель	550 ± 190	1,4 ± 0,4	0,25
Свинец	170 ± 40	4,8 ± 1,2	2,82
Цинк	1380 ± 280	37 ± 6	2,68
Кобальт	52 ± 21	1,4 ± 0,4	2,70
Проба № 3			
Марганец	790 ± 240	72 ± 11	9,1
Железо	53000 ± 15000	2,4 ± 0,6	0,005
Кадмий	40 ± 20	4,4 ± 1,1	11,0
Хром	320 ± 60	0,66 ± 0,20	0,21
Медь	420 ± 80	36 ± 5	8,6
Никель	65 ± 23	1,6 ± 0,4	2,5
Свинец	70 ± 18	2,0 ± 0,5	2,9
Цинк	1480 ± 300	72 ± 11	4,9
Кобальт	27 ± 11	0,74 ± 0,22	2,7

бляемым реагентом при этом является ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4,8 (СанПиН 1.2.3685-21), который моделирует переход ТМ из твердой фазы в жидкую. Использование этой вытяжки было обусловлено наличием разработанных и утвержденных значений предельно допустимых и ориентировочно допустимых концентраций (ПДК и ОДК) на некоторые химические элементы.

Анализ проб золы на содержание химических элементов выявил наличие в ней высоких концентраций некоторых ТМ и их превышение над утвержденными Минздравом показателями (СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования...»). Их повышенное содержание обусловлено преимущественно стоками промышленных предприятий.

Необходимо отметить, что некоторые соединения ТМ, находящиеся в составе золы, при контакте с кислыми поверхностными, грунтовыми и почвенными водами могут переходить в подвижные формы, что способствует их миграции в водные объекты, почву, растения. Наибольшей подвижностью в пробах характеризуются следующие элементы: кадмий (7,8–11% от валовых форм), марганец (8,8–9,8%), медь (6,97–8,6%). Подвижные формы никеля, свинца, цинка и кобальта составляют до 5% от валовых форм, а подвижные формы хрома, алюминия, железа присутствуют в количестве меньше 1%. Ртуть и мышьяк при сгорании органического вещества летят в воздух, поэтому в пробах золы находятся ниже пределов обнаружения.

Что касается влияния золы на окружающую среду, определенное опасение вызывает кадмий, присутствующий в повышенных количествах как в валовой, так и в подвижной форме. Его содержание в 14–20 раз превышает утвержденное значение ОДК, которое составляет 2 мг/кг для суглинистых почв с нейтральной реакцией среды. Этот элемент согласно «Классификации химических веществ для контроля загрязнения» (ГОСТ 70281-2022) относится к 1-му классу опасности.

Извлечение ТМ из проб золы, имеющих щелочную реакцию, кислым ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 на наш взгляд не дает возможности корректно отразить количественное содержание тяжелых металлов, способных мигрировать в растительную продукцию. Более информативным способом определения содержания химических элементов в золе, способных мигрировать в окружающую среду, является определение их в вытяжке, приближенной по реакции среды к выпадающим атмосферным осадкам.

При определении содержания ТМ в водной вытяжке из золы ОСВ (водорастворимая форма) установлено их наличие в количестве сотых и десятых долей мг/кг. По результатам анализа 3 проб золы значения по содержанию химических элементов колебались в следующих пределах: массовая доля кобальта 0,045–0,070 мг/кг, марганца 0,205–1,110 мг/кг, меди 0,025–0,080 мг/кг,

кадмия 0,008–0,02 мг/кг, никеля 0,040–0,265 мг/кг, цинка 0,122–0,347 мг/кг, свинца 0,250–0,350 мг/кг, хрома 0,110–0,175. В то же время следует отметить, что при произрастании растений вследствие корневых выделений и постепенном изменении реакции среды в кислую сторону, содержание водорастворимых форм тяжелых металлов может увеличиваться. Этот факт необходимо учитывать, так как имеются публикации по использованию золы ОСВ в качестве удобрений [24, 26, 29, 32].

Результаты определения физико-химических свойств золы ОСВ представлены в таблице 4. Следует отметить, что согласно ГОСТ 17.4.4.01-84 полученные результаты по определению емкости катионного обмена (ЕКО), гидролитической кислотности, а также некоторых других показателей выражаются в мг-экв/100 г, что соответствует эквивалентному содержанию вещества, выраженному в ммоль/100 г, принятому в Международной системе СИ, то есть численно результаты анализа, выраженные в миллимолях эквивалентов и в миллиграмм-эквивалентах равны. В настоящее время основной единицей количества в системе СИ является моль (mol).

Агрохимические показатели золы ОСВ характеризуют обеспеченность необходимыми для роста растений питательными элементами. Представленные в таблице 4 показатели свидетельствуют о том, что она имеет щелочную реакцию среды, высокие численные значения зольности и низкие показатели гидролитической кислотности. При этом содержание основных элементов питания растений в пробах золы не сбалансировано. С позиций обеспеченности растений основными питательными элементами в золе в избыточном количестве содержатся калий и фосфор, но она практически лишена соединений азота.

Содержание элементов питания – фосфора и калия – определено в разных вытяжках и характеризуется различными количественными значениями. Эти показатели существенно превышают принятые в почвоведении оценочные уровни по обеспеченности почв питательными элементами как сельскохозяйственных, так и лесных почв. Основным показателем почв, отличающим ее от минеральных грунтов и горных пород, выносимых на дневную поверхность при разработке месторождений полезных ископаемых, является наличие в верхнем слое почвы органического вещества, обладающего плодородием. Однако в золе вследствие высокотемпературной обработки сырого осадка содержание органического вещества не превышает 3%.

Об обеспеченности почв потенциально доступными соединениями фосфора и калия судят по установленным показателям. Так, при содержании фосфатов в вытяжке, полученной по методу Чирикова, в количестве 10–20 мг P_2O_5 на 100 г почвы (в зависимости от вида выращиваемых культур и их потребности в

питательных элементах) почвы считаются высокообеспеченными этим элементом и не нуждаются во внесении фосфорных удобрений. В вытяжке, полученной по методу Мачигина, показатель обеспеченности составляет 3–6 мг P_2O_5 на 100 г [1]. Как видно из таблицы 4, содержание фосфора в золе во много раз превышает оптимальные значения его содержания в почвах сельскохозяйственных угодий.

В результате комплексной оценки проб золы ОСВ как субстрата для произрастания растений с учетом содержания ТМ необходимо отметить следующее. Такие присутствующие в золе элементы, как кобальт, медь, цинк, марганец, являются необходимыми для нормального роста и развития растений. Эти элементы при недостатке их в почве в виде солей и соединений используются для удобрения почв с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур. В подзолистых почвах северо-западного региона отмечается недостаток этих элементов. При недостаточном содержании их в почве эти элементы относят к микроэлементам, тогда как при избыточном их содержании они переходят в категорию тяжелых металлов. По нашему мнению, повышенное содержание ТМ в золе не является критичным, если рассматривать полигон золы в будущем как объект санитарно-гигиенического направления рекультивации. Вряд ли следует рассматривать полигоны золы от сжигания ОСВ как объекты сельскохозяйственного направления рекультивации сразу после доведения их поверхности до проектных отметок. Они могут быть использованы под объекты промышленного назначения, рекреационного и лесохозяйственного использования при проведении необходимых дополнительных исследований и обосновании выбранных направлений хозяйственного использования земель. В то же время при извлечении фосфора из золы ОСВ необходимо учитывать возможный переход повышенных количеств ТМ при последующем использовании удобрения для сельскохозяйственных культур.

Следует также отметить сложность подбора метода анализа для правильной оценки свойств золы. К анализу золы применялись методы, принятые в почвоведении. Но зола – это не почва, а потому существуют определенные сложности как в подборе методов анализа, так в интерпретации полученных результатов. Сложно на начальных этапах исследований оценить приемлемость тех или иных методов анализа для правильной оценки золы. В почвоведении и агрохимии на протяжении многих лет, а точнее десятилетий, на основе различных видов и методов анализа почвенных проб: применения разных реагентов и вытяжек, проведения лабораторных, вегетационных и полевых опытов, на различных типах почв устанавливались корреляционные зависимости между химическими показателями и урожайностью культур. Однако зола ОСВ является новым необычным и слабо изученным субстратом, требующим проведения исследований, подбора и разработки подходящих методов анализа.

Применение золы для рекультивации

С учетом слабой изученности золы как субстрата для биологической рекультивации, а также сложности и неоднозначности интерпретации полученных результатов химического анализа, и ввиду того, что трудно объяснимые факты как в почвоведении, так и в рекультивации нарушенных земель, как правило, решаются экспериментальным путем, на полигоне Северных очистных сооружений в конце августа 2023 года был заложен полевой опыт. Выбор этого времени был обусловлен погодными условиями: к концу лета температура воздуха понижается, а количество осадков увеличивается. Полив растений на опытном участке не производился.

Предварительно на опытный участок было завезено с завода по сжиганию осадков несколько машин свежей золы и выполнена грубая планировка бульдозером. Вручную были срезаны повышения, засы-

Табл. 4

Физико-химические свойства золы осадка сточных вод

№ пробы	рН водный	Зольность, %	Емкость катионного обмена, ммоль/100 г	Гидролитическая кислотность, ммоль/100 г	Содержание, мг/100 г					
					P_2O_5			K_2O		
					1	2	3	1	2	3
1	8,6	98,3	4,0	< 0,23	1962	58,8	42,0	1372,0	879,0	390,0
2	7,9	98,8	1,0	< 0,23	1517	48,8	34,0	1276,0	794,0	380,0
3	8,1	98,2	4,0	< 0,23	1636	52,1	35,0	1180,0	527,0	365,0

Примечание: содержание P_2O_5 и K_2O в золе определено (1) методом Чирикова, (2) методом Мачигина, (3) в водной вытяжке (водорастворимая форма).

паны понижения, проведено поверхностное уплотнение. Завезенная на участок зола характеризовалась ярко оранжевой окраской и очень рыхлым сложением, обусловленным высокой пористостью субстрата. При ходьбе по отсыпанной территории зола уплотнялась, ноги проваливались на глубину 10–20 см, как при ходьбе по рыхлому снегу. Общая площадь отсыпанного золой участка составляла 500–550 м². Толщина нанесенного слоя золы в разных местах была различной – от 30 см с краев до 60 см.

В центральной части отсыпанного золой участка с помощью шнура и колышков были заложены 2 грядки протяженностью по 15 метров. Общая площадь грядок составляла 30 м². Грядки были разделены на квадратные метры. На одну продольную грядку была внесена аммиачная селитра с содержанием азота 34%, из расчета 40 г действующего вещества азота на квадратный метр, на другую грядку было внесено органоминеральное удобрение (ОМУ) для газонных трав по 40–60 г на квадратный метр. Каждый вид высевался на двух квадратных метрах с разными видами внесенных в золу удобрений. Семена и удобрения были граблями заделаны в золу. Смесь оставшихся от посева на грядки семян была высеяна справа и слева от засеянных грядок на части отведенной площади. Часть площади не засеивалась, в нее не вносились удобрения, эта территория использовалась в качестве контроля.

На опытном участке было высеяно 15 видов трав: райграс пастбищный (*Lolium perenne*), овсяница луговая и красная (*Festuca rubra* и *F. pratensis*), тимофеевка луговая (*Phleum pratense*), клевер белый и луговой (*Tri-*

folium alba и *T. pratense*), полевица побегообразующая (*Agrostis stolonifera*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), колосняк песчаный (*Leymus arenarius*) и другие, имеющие различный тип кущения корневых систем: рыхлокустовой, корневищный, стержневой. Общий вид опытного участка через 1 месяц после заложения опыта представлен на рис. 1, а весной 2024 года – на рис. 2.

В осенний период после обильных дождей, а также весной 2024 года после схода снега зола на участке была насыщена водой настолько, что по ней было невозможно ходить. В конце мая 2024 года после нескольких дней жаркой погоды сверху зола подсыхала, но нижние слои золы находились в состоянии, насыщенном влагой. Проход по участку был невозможен (фотографии были сделаны с прилегающей территории, сложенной естественным грунтом). Этот факт предопределяет необходимость изучения водно-физических свойств золы не только для биологического этапа рекультивации, но и для разработки технологий технического этапа рекультивации полигона.

Осенью в год посева и ранней весной травы характеризовались замедленным ростом и развитием (рис. 1 и 2). Визуально в весеннее время и начале лета высеянные многолетние травы выглядели немного лучше на грядке, где вносилось органоминеральное удобрение. Высота растений на этом участке была на 5–7% выше, зеленая окраска травы более насыщенной. По-видимому, внесение органоминерального удобрения (ОМУ) оказывало на развитие растений более существенное положительное влияние по сравнению с внесением минерального азотного удобрения.



Рис. 1. Общий вид опытного участка через 1 месяц после заложения опыта



Рис. 2. Общий вид опытного участка в конце мая 2024 года

Весной, в конце мая зафиксировано внедрение на прилегающие к грядкам участки золы первых аборигенных (местных) видов растений с окружающей местности. К середине лета число дикорастущих видов, внедрившихся на отсыпанный золой участок, превысило 30. Проективное покрытие участка травянистой растительностью достигло 70–100%. Преобладающими среди заносных растений являются тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara*), ромашка непахучая (*Matricaria inolora*), осот полевой (*Sonchus arvensis*), марь городская (*Chenopodium urbicum*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*). Многие растения – клевер красный, осот полевой, кипрей волосистый, ромашка непахучая, цикорий обыкновенный, пижма и другие – находились в стадии цветения, а отдельные виды вступили в генеративную фазу. Зафиксировано наличие всходов кустарника ивы филолистной (*Salix phylicifolia*) высотой 30–35 см, а также появление моховой растительности на поверхности золы. Дикорастущие виды растений поселились не только на свободных местах, но и внедрились в опытные посевы. Высота большинства дикорастущих видов растений достигала 50–60 см. Осенью 2024 года по результатам обследования, проведенного в сентябре-октябре, участки с относительно разреженным растительным покровом (70–80%) были полностью покрыты моховой растительностью. На рисунках 3, 4, 5 представлены участки с различными видами растений, поселившихся на отведенной для опыта площади (снимки сделаны во второй половине июля 2024 года).

Быстрое зарастание отсыпанного золой участка, по нашему мнению, обусловлено его незначительной площадью 500–550 м², и поэтому легкостью заноса семян растений с окружающей местности. На всей площади участка, несмотря на жаркую летнюю погоду, в нижнем слое золы сохранялось достаточное количество влаги, необходимой для роста растений. Скорость формирования растительного покрова на золе во много раз происходит быстрее, чем на землях, нарушенных горнодобывающими и строительными предприятиями. На этих территориях самозарастание происходит на протяжении многих лет. Поэтому целесообразно проведение анализов по химическому составу растений, поселившихся на золе в сравнении с растениями, выросшими на других участках, а также анализ атмосферного воздуха, чтобы выяснить, что же лежит в основе необычайно быстрого роста растений на золе? По этому вопросу нужны дополнительные исследования.

Несмотря на высокое содержание ТМ, отсутствие соединений азота, очень низкое содержание органического вещества, несбалансированность элементов питания растений, в течение первого же вегетационного сезона весь опытный участок (включая контроль), независимо от того, вносились удобрения или не вносились, был заселен полностью травянистыми видами, произрастающими поблизости. В результате простейших приемов рекультивации (подготовка участка и посев многолетних трав) и природного процесса заноса на участок семян дикорастущих растений и их разрастания формируется растительный покров, способный закрепить поверхность, противостоять эрозии, улучшить санитарно-гигиенические условия.



Рис. 3. Растительное сообщество, сформировавшееся по границе засеянного участка (слева) и заросшего контрольного участка (справа)



Рис. 4. Естественное зарастание опытного участка



Рис. 5. Самозарастание опытного участка, на переднем плане кипрей волосистый, на заднем – заросли ромашки непахучей

Проведенный эксперимент и значительное количество видов, внедрившихся на участок, позволяют сделать вывод об относительно благоприятных свойствах золы Северных очистных сооружений как рекультивационного материала. А учитывая современные требования к определенным категориям нарушенных земель, предусмотренные Национальным стандартом РФ ГОСТом Р 57446-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия», этот субстрат следует считать пригодным для роста растений и осуществления санитарно-гигиенического направления рекультивации. По нашему мнению, целесообразно также рассмотреть отвалы золы на предмет пригодности к лесохозяйственному и рекреационному направлению рекультивации.

Заключение

Нерешенность проблемы промышленной утилизации золы, полученной при сжигании ОСВ, ее значительное количество, которое ежегодно образуется на очистных сооружениях Санкт-Петербурга, обусловили необходимость изучения состава и свойств золы с позиций перспективной рекультивации полигонов.

Исследованы гранулометрический и вещественный состав, геохимические и физико-химические свойства золы, полученной от сжигания сырого осадка сточных вод на Северных очистных сооружениях Санкт-Петербурга как субстрата для биологической

рекультивации. По гранулометрическому составу зола является легким пылеватым суглинком или пылевой супесью, характеризуется значительным пылеобразованием и отрицательным влиянием на окружающую среду. Уровень содержания в золе валовых и подвижных форм некоторых ТМ превышает установленные Минздравом РФ нормативы ПДК и ОДК химических элементов в почве. Установлена несбалансированность содержания в золе основных питательных элементов: отсутствие соединений азота, очень высокие содержания калия и фосфора. На полигоне Северных очистных сооружений для оценки возможности проведения санитарно-гигиенического направления рекультивации был заложен мелко-деляночный полевой опыт. К концу июля 2024 года всего лишь за один вегетационный сезон на опытном участке сформировалось растительное сообщество с 70–100%-м покрытием травянистой растительностью, что свидетельствует о необычайно быстром развитии растений на этом субстрате и возможности санитарно-гигиенического направления рекультивации полигона при доведении его до проектных отметок.

Автор выражает признательность коллегам: Е.А. Горбуновой, Т.В. Бардиной, А.А. Галдянцу за помощь в заложении полевого опыта.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FFZF-2025-0018).

Литература

1. Аринушкина ЕВ. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ; 1970. С. 488.
2. Валетов ДС, Кащенко ОВ. Сжигание осадков сточных вод как метод их утилизации. *Academy*. 2018;12(39):20-3.
3. Валиев ВС, Иванов ДВ, Шагидуллин РР. Анализ мирового опыта утилизации осадка городских сточных вод. *Российский журнал прикладной экологии*. 2020;4:43-51. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10033.
4. Валиев ВС, Иванов ДВ, Шагидуллин РР. Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор). *Российский журнал прикладной экологии*. 2020;4(24):52-63. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034.
5. Векшин АА, Рассохина ЕВ, Дягелев МЮ, Исаков ВГ. Сжигание осадка как безотходный способ утилизации осадка сточных вод. *Приволжский научный журнал*. 2023;2:100-7.
6. Волкова ЕН, Антонов ИВ, Здоровцева АГ, Закарлюкина ВП. Изучение токсичности золы от сжигания осадков сточных вод с использованием инфузорий *Parameciumcaudatum*. В кн.: *Фундаментальные и прикладные научные исследования: Актуальные вопросы, достижения и инновации. Часть 1*. Пенза: Наука и просвещение; 2018. С. 67-9.
7. Волкова ЕН, Какимов МГ. Изучение физических свойств золы от сжигания осадка сточных вод. В кн.: *Сборник научных трудов по материалам 8-й Международной научно-практической конференции. «Экологические проблемы промышленных городов»*. Саратов: Саратовский государственный технический университет; 2017. С. 13-7.
8. Волкова ЕН, Осипова ТС, Какимов МГ. Оценка возможности использования золы от сжигания осадка сточных вод для улучшения свойств

- дерново-подзолистой почвы. В кн.: IV Лужские научные чтения. «Современное научное знание: Теория и практика». СПб.: Изд-во ЛГУ им. А.С. Пушкина; 2016. С. 71-3.
9. Зубова ОВ, Силецкий ВВ. Изменение свойств материала на основе золы и вяжущих для строительства лесных дорог. В кн.: Научно-техническая конференция Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета; 2019. С. 134-7.
 10. Кармазинов ФВ, Васильев БВ, Григорьева ЖЛ. Сжигание осадка сточных вод – решение проблемы их утилизации. Водоснабжение и санитарная техника. 2008;9:9-24.
 11. Крымская ЕЯ, Чукалина ЕМ. Состав и структура золы из сточных осадков как разновидность грунта. Науковедение. 2013;2(15):1-9. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/10tvn213.pdf>.
 12. Литвинова ТЕ, Сучков ДВ. Получение легкого золобетона как перспективное направление утилизации техногенных продуктов (на примере отходов водоотведения). Записки Горного института. 2023;264:906-18.
 13. Манжина СА. Российские и зарубежные практики обращения с осадком сточных вод. Экология и водное хозяйство. 2023;1:15-31. DOI: 10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31.
 14. Минаев АН, Зубова ОВ, Кулик ДМ, Силецкий ВВ, Луговой ВИ. Применение золополимерных смесей в строительстве лесовозных дорог. Лесной журнал. 2020;3(375):106-16. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-106-16.
 15. Поповцева АА, Дьяков МС. Научно-практические основы использования золы сжигания осадка городских сточных вод в производстве строительных материалов. Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2015;1:278-82.
 16. Смирнов ЮД, Сучкова МВ. Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве. Вода и экология: проблемы и решения. 2019;3(79):16-25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25.
 17. Тенно Т. Рекуперация фосфора из осадка сточных вод. [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.good-climate.com/materials/files/219.pdf> (дата обращения: 22.02.2024).
 18. Тихонова ИО. Утилизация иловых осадков в экономике замкнутого цикла: опыт Германии. Экология производства. 2020;6:74-7.
 19. Цыбина АВ, Дьяков МС, Вайсман ЯИ. Перспективное направление утилизации продуктов термической обработки осадков сточных вод в производстве керамических строительных материалов. Фундаментальные исследования. 2014;6-2:265-70.
 20. Чулкова ИЛ, Смирнова ОЕ, Красова АВ. Применение осадков сточных вод в производстве бетона. Вестник СибАДИ. 2021;18(5):566-75. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-75.
 21. Шахов СА. Вещественный состав и свойства золы от сжигания осадка бытовых сточных вод. Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023;2:31-39. DOI: 10.14529/build230204.
 22. Шахов СА, Николаев НЮ. Фасадная керамика с дисперсно-армированной структурой на основе золы от сжигания осадков бытовых сточных вод. В кн.: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации». Омск: Изд-во СибАДИ; 2019. С. 391-4.
 23. Bezak-Mazur E, Widak M, Gawdzik J, Stoinska R, Zapala-Slaveta J, Ciopińska J. Properties of ashes formed after the combustion of sewage sludge. E3SWeb of Conferences 44. 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400012.
 24. Borowski G. Using vitrification for sewage sludge combustion ash disposal. Polish J Environ Stud. 2015;24(5):1889-96. DOI: 10.15244/pjoes/36080.
 25. Huang Y, Chen Z, Liu Y, Lu J, Bian Z, Yio M, Cheeseman C, Wang F, Poon Chi Sun. Recycling of waste glass and incinerated sewage sludge ash in glass-ceramics. Waste Manag. 2024. DOI: 10.1016/j.wasman. 023.12.007.
 26. Jastrzębska M, Kostrzevska M. Using an environment-friendly fertiliser from sewage sludge ash with the addition of *Bacillus megaterium*. Minerals. 2019;9(7):423. DOI:10.3390/min9070423.19.
 27. Ki D, Kang SY, Park K-M. Upcycling of wastewater sludge incineration ash as a 3D printing technology.Resource. 2021;2. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.697265>.
 28. Lin WY, Ng WC, Wong BSE, Teo SLM, Sivananthan GD/O, Baeg GH, Ok YS, Wang CH. Evaluation of sewage sludge incineration ash as a potential land reclamation material.JHazardousMater. 2018. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.05.047.
 29. Lin X, Chen C, Li H, Hei L, Zeng L, Wei Z, Chen Y, Wu Q-T. Comprehensive recycling of fresh municipal sewage sludge to fertilize garden plants and achieve low carbon emission: A pilot study. Front Environ Sci. 2022;10. 1023356. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1023356.
 30. Silva RV, de Brito J, Lynn CJ, Dhir RK. Use of municipal solid waste incineration bottom ashes in

- alkali-activated materials, ceramics and granular applications: A review. *WasteManag.* 2017:207-20. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.043.
31. Sun X, Dregulo AM, Kumar SM, Pandey A, Kumar AM. Sewage sludge treatment and management. *Boca Raton.* 2023:3-14. DOI: 10.1201/9781003354765.
 32. Vogel T, Nelles M, Bettina Eichler-Löbermann. Phosphorus effects of recycled products from municipal wastewater on crops in a field experiment. *Plant Soil Environ.* 2017;63(10):475-82. DOI: 10.17221/513/2017-PSE.
 33. Zhang M, Tashiro Y, Ishida N, Sakai K. Application of autothermal thermophilic aerobic digestion as a sustainable recycling process of organic liquid waste: Recent advances and prospects. *Sci Total Environ.* 2022;828. 154187. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154187.



ДЕСТРУКЦИЯ ПЕРФТОРКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ БАКТЕРИЯМИ РОДА *PSEUDOMONAS* ПОДТВЕРЖДЕНА ДАННЫМИ ОБ ИХ ГЕНОМАХ И МЕТАБОЛИТАХ

С.П. Четвериков*, Г.Г. Худайгулов, Д.А. Шарипов,
С.Н. Стариков

Уфимский институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

* Эл. почта: che-kov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; принята к печати 25.11.2024

Изучен потенциал штаммов *Pseudomonas* sp. 2,4-D и *P. mosseli* 5(3) (UIB-53 и UIB-251 из коллекции микроорганизмов УИБ УФИЦ РАН), выделенных из загрязненных пестицидами и галогенорганическими соединениями почв, в качестве деструкторов перфторкарбонных кислот (ПФК) и выполнен анализ полных геномов этих штаммов. Геномы длиной 5,68 и 5,86 млн пар нуклеотидов у штаммов 5(3) и 2,4-D соответственно содержат гены белков, потенциально участвующих в деструкции (дегалогенировании) фторорганических соединений: галоалкандегалогеназы (*dhaA*), галоацетатдегалогеназы H-1 (*dehH1*), переносчика ионов фтора (*CrcB*) и алкансульфонатмонооксигеназы (*SsuE*). Штаммы за 7 суток культивирования в жидкой среде с различными (C_7-C_{10})-ПФК в качестве единственного источника углерода и энергии полностью их утилизировали. Результаты анализа с помощью ЖХ-МС показали, что разложение ПФК доходит до перфторгексановой кислоты с высвобождением, при различных стехиометрических соотношениях в зависимости от ПФК, индикаторов минерализации ионов фтора, определяемых хроматографией с кондуктометрическим детектированием. Таким образом показано, что изученные штаммы бактерий рода *Pseudomonas* имеют большой генетически подтвержденный потенциал деструкции ПФК.

Ключевые слова: перфторкарбонные кислоты, деградация, *Pseudomonas*, геном.

DECOMPOSITION OF PERFLUOROCARBONIC ACIDS BY *PSEUDOMONAS* BACTERIA IS CONFIRMED BY DATA ON THEIR GENOMES AND METABOLITES

S.P. Chetverikov*, G.G. Khudaygulov, D.A. Sharipov, S.N. Starikov

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

* Email: che-kov@mail.ru

Pseudomonas strains 2,4-D and *P. mosseli* 5(3) designated as UIB-53 and UIB-251 in the Ufa Institute of Biology (UIB) Collection of Microorganisms were isolated from soils contaminated with pesticides and halogen-containing organic compounds and were evaluated for their potential ability to degrade perfluorocarboxylic acids (PFOA). Whole genome sequencing of their DNA (5.68 and 5.86 bp for 5(3) and 2,4-D strains respectively) showed the presence of genes whose products may be implicated in degradation (dehalogenation) of fluorinated compounds: haloalkane dehalogenase (*dhaA*), H-1 haloacetate dehalogenase (*dehH1*), fluorine ion transporter (*CrcB*), and alkanesulfonate monooxygenase (*SsuE*). After 7 days of cultivation in a liquid medium containing different C_7-C_{10} PFOA species as the sole carbon and energy sources, the strains utilized them completely. LC-MS results suggest that PFOA decomposition leads to perfluorohexanoic acid formation associated with the generation, at different stoichiometric ratios depending on PFOA species, of indicators of fluorine ion mineralization, which were detected using chromatography with conductometric detection. The results suggest that the *Pseudomonas* strains studied possess potentially high potential for PFOA decomposition, which is confirmed by genomics data.

Keywords: perfluorocarboxylic acids, decomposition, *Pseudomonas*, genome.

Введение

Перфторкарбонные кислоты (ПФК) подвергаются строгому регулированию со стороны международных надзорных органов по причине высокой подвижности, способности к биоаккумуляции, и стойкости,

включая биостойкость, основанной на силе взаимодействия углерода и фтора в самой прочной связи, известной в органической химии [1]. Выявление этих свойств, характеризующих токсичность ПФК по отношению к живой природе, привело к их включению в

Приложение В Стокгольмской конвенции по стойким органическим загрязняющим веществам¹.

Основные представители этого класса соединений – перфтороктановая кислота (ПФОК) и перфтороктансульфонат (ПФОС) – это синтетические химические соединения с высокой стабильностью, широко используемые в производстве фторполимеров для антипригарных поверхностей, пестицидов, защитных средств для тканей, упаковки пищевых продуктов, гальванических покрытий и, в силу их поверхностной активности, в качестве компонентов противопожарных пен [2–7], в результате чего ПФКК распространены повсеместно в окружающей среде по всей планете, перемещаясь через почву и водные системы [8, 9]. Токсикологические воздействия ПФКК на человека включают канцерогенные эффекты, нарушения функций иммунной системы и работы печени, влияние на рост, развитие и репродукцию [10, 11].

Поэтому разработка способов разложения ПФКК является актуальной задачей. Известны способы разложения ПФОС химической обработкой, сжиганием при высокой температуре, ультразвуком, но они дорогостоящие и малоэффективные [12–15]. Биodeградация ПФКК затруднена их необычными химическими свойствами, а именно сложностью строения и большими размерами молекул, поглощение которых бактериями требует участия специализированных активных путей транспорта. Ранее считалось, что у микроорганизмов не было времени эволюционировать к способности разлагать ПФКК (особенно при сравнении с дегалогенированием полихлорированных молекул [16]) благодаря возникновению ферментативных систем, воздействующих на них. Это связывалось с недостатком природных аналогов ПФКК, которые стимулировали бы эволюцию необходимых катаболических ферментов [17]. Но в последнее время было показано, что дефторирование ПФКК все же возможно. И происходит оно преимущественно, когда микроорганизмы атакуют углеродные ковалентные связи (например, C–S, C–O), не содержащие фториды, как показано при биodeградации ПФОК и ПФОС в аэробных [18, 19] и анаэробных [20–22] условиях. В некоторых работах показана деградация ПФОС и (или) ПФОК, не подтверждаемая выделением ионов фтора. Это позволяет предполагать, что в результате этих процессов предпочтительно образуются минорные полифторированные соединения [23–26]. Эффективное расщепление связей C–F уже давно признано критически узким местом в биodeградации фторорганических соединений, включая ПФКК [27]. Удаление фторида устраняет влияние этого гетероатома на химическую стабильность

органической молекулы, являющуюся прямым результатом его крайней электроотрицательности, а также повышает вероятность того, что образующиеся метаболиты будут разлагаться легче [28].

Как правило, в качестве бактерий-деструкторов в исследованиях фигурируют представители рода *Pseudomonas*. Псевдомонады разлагают различные ксенобиотики, используя их в качестве единственного источника углерода и энергии. Охарактеризованы геномы штаммов *Pseudomonas*, принадлежащих к разным видам, например, *P. protegens* (штамм Pf-5), *P. fluorescens* (штаммы Pf-01, SBW25), *P. azelaica* (штаммы HBP1, Aramco J), *P. putida* (штамм L48), *P. mendocina* (штамм YMP) и др. Размер геномов *Pseudomonas* составляет около 6 Мб [29], и многие гены участвуют в катаболизме различных молекул-источников углерода для адаптации к существованию в определенной экологической нише.

Но на сегодняшний день имеется мало информации о бактериальных штаммах, у которых были бы обнаружены и описаны гены, кодирующие ферменты, расщепляющие ПФКК. Исключение составляют штаммы *P. parafulva* YAB-1 и *Delftia acidovorans* D4B (род *Delftia* близок к роду *Pseudomonas*) – деструкторы с идентифицированными вероятными дегалогеназами галогенкислот и со фторацетатдегалогеназой, которые могут участвовать в деградации фторированных соединений [30, 31]. При этом известны лишь единичные штаммы бактерий, способные к трансформации перфторкарбоновых кислот. И они могут подвергаться биodeградации только ПФОК и ПФОС. Упоминания о них в контексте других ПФКК в литературе не найдены. Отмеченный выше штамм *P. parafulva* YAB-1 утилизирует 32,2% перфтороктановой кислоты при ее начальной концентрации 500 мг/л, а *P. aeruginosa* HJ4 способен разрушать ПФОС на 67% при концентрации, не превышающей 2 мг/л [23].

Внимание исследователей биodeградации ПФКК направлено в основном на соединения C₈, но потенциал биоаккумуляции растет с увеличением длины углеродной цепи [32]. Также сообщалось, что ПФКК с короткой цепью более подвижны, водорастворимы и даже более стойки [33, 34], чем длинноцепочечные.

Следовательно, оценки биodeградации не нужно ограничивать ПФОК и ПФОС; вероятно, список стойких фторсодержащих органических загрязнителей в Стокгольмской конвенции в будущем будет увеличен в связи с вновь открываемыми токсичными свойствами ПФКК. И, тогда как адаптация микроорганизмов к ПФОС и ПФОК уже представлена в публикациях, еще только предстоит оценить устойчивость микроорганизмов к промежуточным продуктам дефторирования и распада ПФКК, а также к выделяемым ионам фтора, с одной стороны, и к их высокомолекулярным предшественникам – с другой.

¹ Report of the Conference of the Parties of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants on the work of its fourth meeting, 4-8 May // UNEP/POPS/COP.4/38. Geneva: Stockholm Convention Secretariat, 2009. P. 66–69.

В настоящем исследовании проведено секвенирование геномов и изучены генетические особенности и деградационный потенциал штаммов псевдомонад 2,4-D и 5(3), выделенных из загрязненных пестицидами и галогенорганическими соединениями почв, по отношению к (C_7-C_{10})-ПФКК. Эти результаты могут быть применены в биотехнологиях реабилитации окружающей среды при загрязнении фторорганическими соединениями.

Материалы и методы Бактериальные штаммы

Штамм 5(3) был выделен из почвы, загрязненной пестицидом, в Янаульском районе Республики Башкортостан. Пестицидное загрязнение представляло собой смесь, включающую фосфорсодержащий глифосат (действующее вещество (д. в.) – N-(фосфонометил)глицин), хлорсодержащий октапон (д. в. – 2-(2,4-дихлорфенокси)-уксусная кислота) и фторсодержащий флуорсулам (д. в. – N-(2,6-дифторфенил)-8-фтор-5-метокси-[1,2,4] триазоло[1,5-с]пиримидин-2-сульфонамид). Штамм 2,4-D выделен из почвы с территории предприятия производства галогенорганических соединений. Штаммы 2,4-D и 5(3) были выделены в результате обширного предварительного скрининга различных объектов и депонированы в Коллекции микроорганизмов УИБ УФИЦ РАН под номерами UIB-53 и UIB-251 соответственно.

Химикаты и реагенты

Перфторкарбоновые кислоты перфтордекановая кислота (ПФДК), перфторнонановая кислота (ПФНК), перфтороктановая кислота (ПФОК), перфторгептановая кислота (ПФГпК) и перфтороктансульфоновая кислота (ПФОС) – все высокой чистоты (> 98%) – были приобретены у компании Sigma Aldrich (Сент-Луис, Миссури, США). Ацетонитрил (качество для ВЭЖХ) был приобретен у компании Merck (Дармштадт, Германия). Все остальные реагенты имели квалификацию «ч. д. а.».

Секвенирование, сборка и аннотирование генома

Геномную ДНК штаммов выделяли из биомассы фенол-хлороформным методом [35]. Секвенирование выполнено на оборудовании DNBSEQ-G50 (MGI, Китай), получены парноконцевые прочтения длиной 100 пар нуклеотидов (п. н.).

Контроль качества прочтений проведен методом HTQC (High-Throughput Quality Control) [38]. Низкокачественные ($Q < 25$) и короткие (<100 п. н.) прочтения и адаптерные последовательности были удалены с использованием программы Trimomatic версии 0.39 [36]. Геномы были собраны с помощью программы

SPAdes версии 3.15.4 [37]. Для исправления ошибок использовались программы Pilon версии 1.23 [38] и Bowtie2 версии 2.3.5.1 [39]. Чтобы подтвердить наличие собранного кольцевого репликона, мы проанализировали наличие перекрывающихся концов. Для идентификации штаммов использованы параметры средней нуклеотидной идентичности (ANI) (<https://www.ezbiocloud.net/tools/ani> [40]) и цифровой ДНК-ДНК гибридизации (DDH) (<https://ggdc.dsmz.de/ggdc.php> [41]) с настройками по умолчанию.

Контиги короче 500 п. н. были удалены. Аннотирование выполнено с помощью программы Prokka версии 1.14.5 [42]. Анализ последовательностей целевых генов был выполнен с помощью сервиса BLAST NCBI [43], при использовании базы данных nr/nt и WGS.

Для построения минимального эволюционного древа на основе полученных межгеномных расстояний использована программа FASTME 2.1.6.1 [44]. Древо было укоренено посередине [45] и визуализировано с помощью <https://itol.embl.de/> (дата обращения: 2 октября 2024 года) [46]. Виды и подвиды были сгруппированы в соответствии с [47] и [48] соответственно. Для расчета средней нуклеотидной идентичности геномов (ANI) между штаммами и родственными штаммами использован алгоритм OrthoANI [49].

Среды и условия выращивания

Штаммы выращивали на орбитальном шейкере-инкубаторе ES-20/60 (SIA BIOSAN, Рига, Латвия) при 180 об/мин и 28 °С в жидкой минеральной среде Раймонда (граммы на литр дистиллированной воды): NH_4NO_3 – 2,0; $MgSO_4 \times 7H_2O$ – 0,2; KH_2PO_4 – 2,0; Na_2HPO_4 – 3; $CaCl_2 \times 6H_2O$ – 0,01; Na_2CO_3 – 0,1 [50], с ПФДК, либо ПФНК, либо ПФОК, либо ПФГпК, либо ПФОС (250 мг/л) в качестве единственного источника углерода и энергии.

Для получения инокулята штамм выращивали на минеральной среде Раймонда с добавлением пептона (1 г/л) в течение 24 ч. Биомассу осаждали и перед инокуляцией в экспериментальные колбы промывали стерильной дистиллированной водой. Полученный осадок ресуспендировали в минеральной среде и добавляли в экспериментальные колбы до достижения оптической плотности (OD_{600}) 0.1.

Для получения отдельных колоний и оценки численности бактерий использовали среду LB [51], содержащей (на литр дистиллированной воды) 10 г триптона, 5 г дрожжевого экстракта, 5 г NaCl и 15 г агара (PanReas, Барселона, Испания).

Для оценки эффективности деградации ПФКК культивировали бактерии при 28 °С в жидкой минеральной среде с индивидуальными (C_7-C_{10})-ПФКК в течение 7 суток. Все эксперименты проведены в трех независимых повторах.

Выделение и идентификация продуктов деструкции ПФКК

Содержание ПФКК в среде и идентификацию их метаболитов оценивали в Центре коллективного пользования оборудования AGIDEL УФИЦ РАН на жидкостном тандемном хромато-масс-спектрометре LCMS-IT-TOF (Shimadzu, Япония) в ультрафильтрах (≤ 3 кДа) культуральных жидкостей, полученных на установке Vivaflow 50 (Sartorius AG, Геттинген, Германия), как описано [18].

Для хроматографического разделения применяли колонку Shim-pack XR-ODS (75 mm $\times$ 2.0 mm id, 2.2 μ m) (Shimadzu, Киото, Япония), используя в качестве подвижной фазы 5 мМ ацетата аммония в ацетонитриле (А) и 0,1% (об./об.) уксусную кислоту в воде (В). Элюирование в линейном градиенте проводили следующим образом: от 0 до 10 мин, 60–30% В; от 10 до 20 мин, 30–60% В; скорость потока 0,25 мл/мин, объем вводимой пробы 5 мкл. Масс-спектры получали методом ионизации электрораспылением (ESI) в режиме отрицательных ионов со следующими параметрами: высоковольтный зонд – 3,5 кВ; поток распыляющего газа 1,5 л/мин; температура CDL 200 °C; температура термоблока 50 °C; давление газа-осушителя 150 кПа; напряжение детектора TOF 1,57 кВ. Раствор трифторуксусной кислоты использовался в качестве стандартного образца для настройки чувствительности и разрешения, а также для выполнения калибровки массового числа (ионная ловушка и времяпролетный анализатор).

Структуры полученных соединений определяли по совокупности данных анализа масс-спектров, основанных на распаде молекулярного иона, и сравнения с данными литературы. Фторидный баланс определяли методом ионной хроматографии с использованием системы ВЭЖХ LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором CDD-10Avp (Shimadzu, Japan). Разделение аналита проводили на колонке Shodex (Shodex, New York, NY, USA) при скорости потока 1 мл/мин элюента следующего состава: 1,8 мМ Na₂CO₃ + 1,7 мМ NaHCO₃, с применением супрессора Xenoic® XAMS ASUREX-A100 (Diduco AB, Умеа, Швеция). Метаболические пути изображены с помощью ChemDraw Ultra v. 12.0.2.1076.

Статистический анализ

Статистический анализ был выполнен с использованием Microsoft Office Excel 2021. На рисунках динамики роста микроорганизмов и изменения концентраций ПФКК и ионов фтора данные представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартная ошибка ($p \leq 0,05$), $n = 3$.

Результаты и их обсуждение

Идентификация и функциональная аннотация генома штаммов

Геномы штаммов 2,4-D и 5(3) были собраны до контигов; параметры сборок представлены в табл. 1. Получены достоверные предварительные сборки геномов чистых культур, которые были использованы для идентификации и последующего функционального анализа.

Проект генома для штамма 5(3) депонирован в GenBank под номером JAUHJ000000000 и номерами BioSample SAMN36271085 и BioProject PRJNA990579.

Проект генома для штамма 2,4-D депонирован в GenBank под номером JAUHJ000000000 и номерами BioSample SAMN36271038 и BioProject PRJNA990562.

На основании предварительного анализа физиолого-биохимических данных и гена 16S рРНК изучаемые штаммы были отнесены к роду *Pseudomonas*. Для псевдомонад есть большое число сборок, представленных в различных базах данных, таких как NCBI, BV-BRS, TYG и *Pseudomonas.com* [52]. Несмотря на долгую историю изучения и обширные базы данных подробная систематика этого рода до сих пор отсутствует и постоянно пополняется новыми результатами. На основе полногеномного секвенирования была предпринята попытка определить филогенетическое родство между изучаемыми штаммами и их ближайшими типовыми штаммами. Штамм 5(3) достоверно относится к *Pseudomonas mosselii* (рис. 1); значения ключевых параметров идентификации относительно референса (*P. mosselii* DSM17497T) следующие: ANI 97,40%, DDH 80,30% (при видовых порогах $> 95\%$ и $> 70\%$ соответственно [53]). Штамм же 2,4-D ни по одному из параметров не проходит видовой порог для отнесения его к определённому виду (ANI ниже 90%, DDH ниже 60%) и, вероятно, является представителем

Табл. 1

Метрики сборки геномов штаммов

Штамм	Число контигов > 1000 п. н.	Размер генома, млн п. н.	N50, п. н.	Самый короткий контиг, п. н.	Самый длинный контиг, п. н.	N75, п. н.	N90, п. н.	GC-состав, %
2,4-D	94	5,86	112,669	1086	453,475	69,882	35,829	61,81
5(3)	76	5,69	165,927	1040	455,784	92,844	51,388	64,38

нового вида бактерий рода *Pseudomonas*. Его видовая идентификация и характеристика – тема отдельной большой работы.

Секвенирование и полная сборка генома *Pseudomonas mosselii* штамма 5(3) (штамма 2,4-D) выявили 5134 (5388) кодирующих последовательностей CDS, 4 (3) кластера rРНК и 65 (54) кластеров tРНК. Геномы собраны из 73 (92) контигов общей длиной 5676241 (5852124) п. н. с соотношением GC 64,38% (61,81%).

Из 5134 генов 2895 (56,8%) были функционально аннотированы (рис. 2).

Результат функциональной аннотации показывает, что исследуемые штаммы обладают генами всех метаболических путей, необходимых для существования автономной культуры.

Категория «Дегградация и метаболизм ксенобиотиков» для штаммов 5(3) и 2,4-D содержит более 60 генов. Большая часть в этой категории связана с дегградацией различных ароматических соединений (этилбензол, ксилолы, стирен, нафталин, полициклические ароматические углеводороды, диоксины, атразин). По данным [54] наиболее вероятными ферментами-кандидатами для деструкции ПФОК являются лакказы и дегалогеназы. Эти ферменты в настоящее время находятся под пристальным вниманием ученых, исследующих биокатализ как инструмент для удаления стойких загрязнителей, в том числе ПФКК. Действительно, предполагаемые ферменты, вероятно

участвующие в декарбоксилировании и декарбонилировании ПФКК, были обнаружены в исследуемых геномах поровну. Из генов, которые могли бы участвовать в деструкции фторорганических соединений (дегалогенирования), выделяются галоалкандегалогеназы (*dhaA*) и галоацетатдегалогеназы H-1 (*dehH1*). Они, как и охарактеризованные до сих пор фторацетатдегалогеназы [55], могут опосредовать дефторирование ПФКК по альфа-углероду молекулы.

Механизмы устойчивости к ПФКК могут быть опосредованы наличием:

– декарбоксилазы (*NovR*), которая может осуществлять несколько последовательных этапов окислительного декарбоксилирования ПФКК; это для подобных соединений ранее было описано и показано только химическим методом [56];

– алкансульфонатмонооксигеназы (*SsuD*), катализирующей десульфонирующее разложение органосульфатных субстратов в условиях сульфатного голодания и также могущей выполнять защитную роль в условиях окислительного стресса [57];

– переносчика ионов фтора (*CrcB*); эти «фторидные рибопереклюватели» увеличивают экспрессию нижестоящих генов при повышении уровня фторида, и предполагается, что они помогают смягчить токсические эффекты очень высоких уровней фторида [58]. Предполагается также, что этими фторидными рибопереклювателями регулируются многие гены. По данным [59] эффективная деятельность по дефториро-

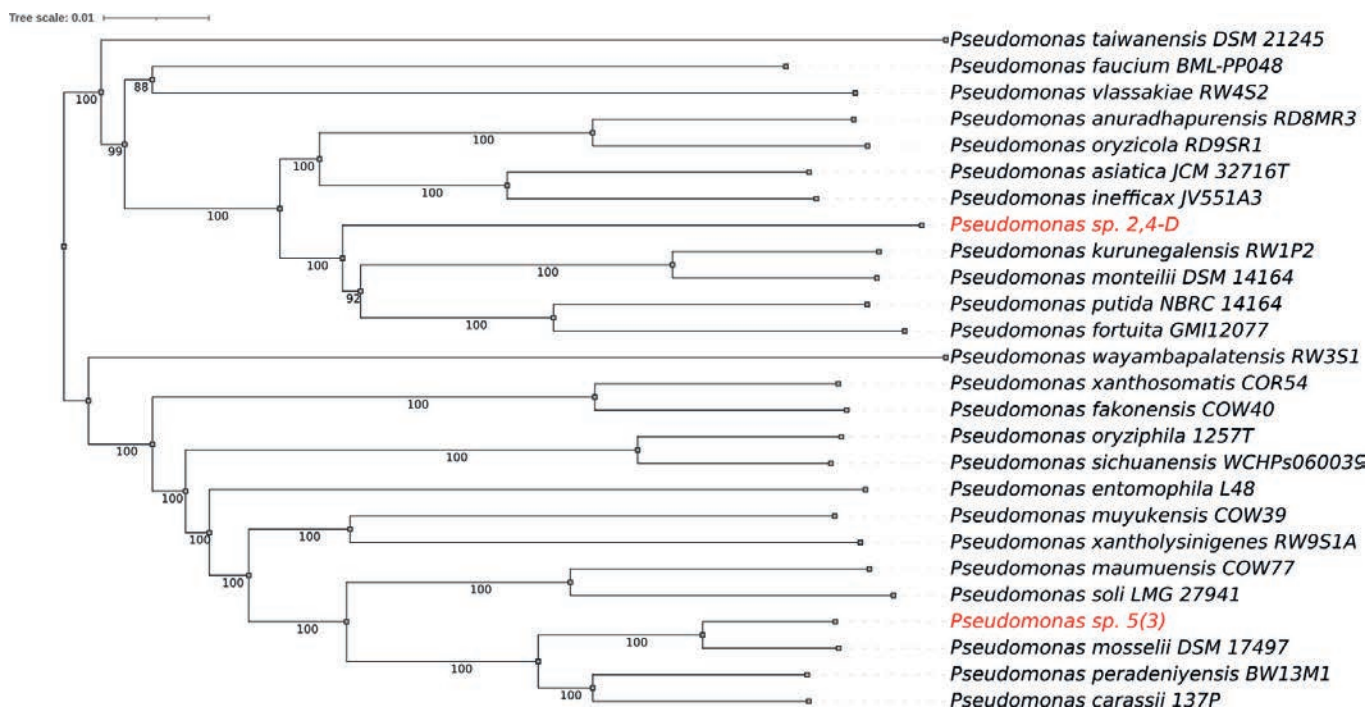


Рис. 1. Полногеномное древо положения штаммов 2,4-D и 5(3) в пределах рода *Pseudomonas*

ванию потребует высокого уровня толерантности к повышенным внутриклеточным концентрациям F^- у микробного хозяина.

Геномы *Pseudomonas* кодируют различные типы ферментов, которые потенциально могут катализировать дефторирование как в процессах биodeградации, опосредованных оксигеназой, так и благодаря активностям, обычно участвующим в анаэробном метаболизме. Хотя фактическую активность этих ферментов в процессах дефторирования еще предстоит полностью раскрыть, кажется правдоподобным, что такие деградирующие ферменты также могут играть роль в формировании реакции *Pseudomonas* на внутриклеточное высвобождение фторидов.

Ни в одной из предыдущих публикаций по деструкции перфторорганических соединений не найдены упоминания о подтвержденном наличии представленного комплекса ферментов у какого-либо микроорганизма-деструктора.

Нельзя также забывать, что геномы *Pseudomonas* кодируют >25% белков с неизвестной функцией, что позволяет предположить, что новая дефторизирующая активность может иметь отношение и к ним [60, 61].

Рост на (C_7-C_{10}) -ПФКК и их дефторирование

Для роста на ПФКК бактериям необходимо транспортировать ее в клетку; выработать активный фермент, катализирующий разрыв связи C-F; обнаружить токсичный ион фтора и удалить его из клетки. И похоже, что для изучаемых штаммов *Pseudomonas* это – не проблема. Штаммы активно росли на минеральных средах, содержащих в качестве единственного источника углерода (C_7-C_{10}) -перфторкарбоновые кислоты (рис. 3 А-Д), достигая максимального показателя оптической плотности культуральной жидкости через 6–7 суток, причем максимум оптической плотности находился в интервале 0,7–1,0 в зависимости от кис-

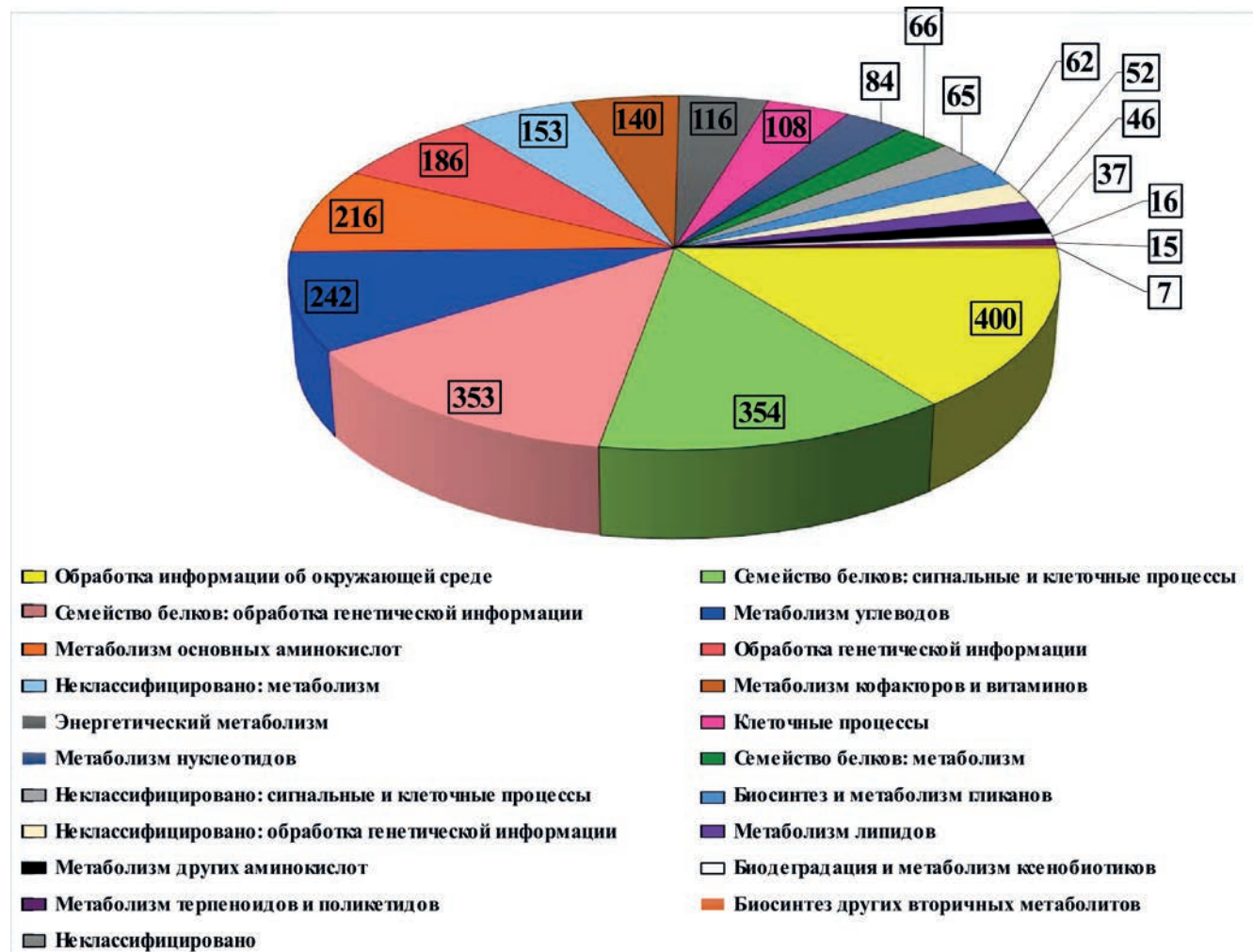


Рис. 2. Численности генов, отнесенных к общим функциональным категориям в геномах по классификации KEGG (представлено для штамма 5(3))

лоты и был обратно пропорционален числу атомов углерода у ПФКК. При росте штаммов на (C_7-C_{10}) -перфторкарбоновых кислотах происходило их полное разложение через 7 суток, для разложения ПФОС бактериям хватало 5 суток.

Полученные в настоящем исследовании результаты значительно превышают то, что было представлено ранее. Так, ближайший к нашему результат достигнут с использованием штамма бактерий *Acidimicrobium* sp. А6 для удаления ПФОК и ПФОС в аэробной среде, где степень биодеструкции не превышала 63% для концентрации 100 мг/л за 100 дней [20].

Только в отличие от этого мы наблюдали высвобождение ионов фтора в среду, что является проявлением частичной минерализации и, возможно, оказывает ингибирующий эффект на дальнейшую деструкцию промежуточных фторированных соединений. Конверсия перфторированных субстратов сопровождалась выходом в среду свободных ионов фтора, а начало высвобождения коррелировало с началом линейного снижения их концентрации в среде. Отсутствие ингибирующего эффекта на рост бактерий как раз объясняется наличием переносчика ионов фтора (*CrcB*), позволяющего перешагнуть физиологический барьер фторидной токсичности при разложении ПФКК и продолжать дефторирование на уровне дехлорирования полихлорированных соединений несмотря на разницу между окислительно-восстановительными потенциалами процессов.

Биодеградация (C_7-C_{10}) -ПФКК

Биологическая деградация ПФКК может включать серию реакций декарбоксилирования, гидроксирования, дефторирования. С учетом того, что методология определения ПФКК и их метаболитов отличается от методов оценки других «традиционных» стойких органических загрязнителей в связи с их особыми свойствами, их анализ ведется методами жидкостной хроматографии/тандемной масс-спектрометрии (рис. 4А). Но нужно еще обнаружить высвобождающийся фторид-ион, что мы делали при помощи ВЭЖХ с кондуктометрическим детектированием (рис. 4Б).

При хроматографическом анализе с масс-спектрометрией в исходной КЖ при культивировании бактерий в среде с ПФГпК мы наблюдали ее диссоциированные кислотные ионы (молекулярный ион с отношением m/z 363) (рис. 3Е). Через сутки в ультрафильтрате обнаруживалось соединение с m/z 319, что возможно в результате реакции элиминирования диоксида углерода (m/z 44) из карбоксильной группы. Его концентрация увеличивалась в срок до 4 суток, после чего в среде, вероятно, под действием фермента галоалкандегалогепазы стал появляться компонент с m/z 313, идентифицированный как перфторгексановая кислота (ПФГкК). Через 6 суток

это соединение превалировало в культуральной жидкости. Аналогичная серия реакций проходила при превращении гомологичных кислот ПФОК (m/z 413) (рис. 3Ж), ПФНК (m/z 463) (рис. 3З), ПФДК (m/z 513) (рис. 3И). Промежуточные продукты отличались между циклами на величину массы отщепляемой группы CF_2 , то есть на m/z 50. Везде в качестве конечного превалирующего продукта деструкции обнаруживались ПФГкК в количестве от 50 до 95% от суммы продуктов деструкции. Для разложения ПФОК потребовалось два таких цикла реакций, для разложения ПФНК – три цикла, для ПФДК – четыре.

Предполагается, что ПФКК, содержащие еще и связи C–S (сульфонат) и C–C (карбоксилат), которые считаются более слабыми, чем связь C–F, могут подвергаться одноэлектронному восстановлению или окислению с образованием углерод-центрированного радикала с последующим гидроксированием.

Также и мы предполагали, что в ПФОС сначала разорвется связь C–S (сульфонатная) с высвобождением сульфита для метаболизирования бактериями и образованием перфтороктана с последующими реакциями гидроксирования, декарбоксилирования и дефторирования с образованием перфторгептановой кислоты, как это оказалось в нашей предыдущей работе [18]. Но в реалиях эксперимента все было иначе. При разложении ПФОС (m/z 499) (рис. 3К), вероятно, при участии галоацетатдегалогепазы H-1, происходит атака свободных электронов на наиболее уязвимое место, на атом фтора в α -положении алкильной цепи, при этом заменяются 2 атома фтора на атомы водорода с последующим разрывом связи C–C алкильной цепи через промежуточный не идентифицированный продукт с m/z 461, то есть с укорачиванием цепи на CH_2 , высвобождением этой группы и образованием перфторгептансульфоната (m/z 449) к 2 суткам культивирования; затем происходит аналогичный цикл и к 4-м суткам образуется перфторгексансульфонат (m/z 399). И только после этого под вероятным действием алкансульфонатмонооксигеназы разрывается связь C–S и высвобождается SO_3^- с образованием соединения с m/z 319 и его трансформацией в перфторгексановую кислоту; к 7-м суткам она составляет не менее 70% от суммы продуктов деструкции.

Таким образом, по окончании культивирования в среде обнаруживалась идентифицированная по диссоциированному кислотному иону перфторгексановая кислота. Полученные результаты позволили предположить схему деструкции (C_7-C_{10}) -ПФКК, показанную на рис. 5. Определить дальнейшее разложение для исследуемых штаммов сейчас не представляется возможным. Требуется продолжать изучение их каталитических возможностей. Более низкомолекулярные фрагменты деструкции ПФКК наблюдали только в ра-

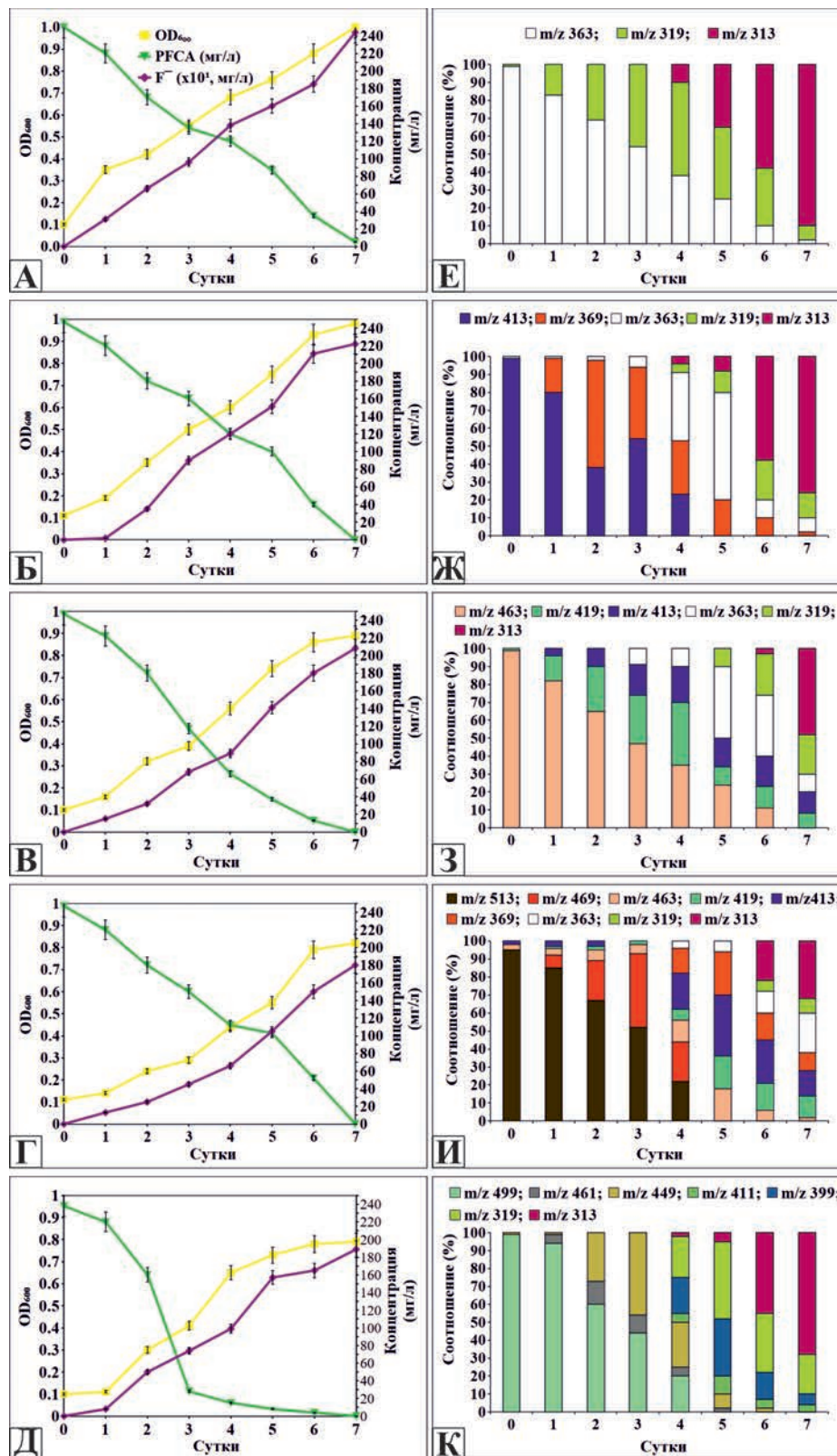


Рис. 3. Динамика роста (по OD₆₀₀) штамма-деструктора (штамм 5(3) в данном случае), высвобождения ионов фтора, изменений концентрации ПФКК (графики слева) и процентных соотношений между ПФКК и продуктами деструкции (по m/z) (гистограммы справа) при культивировании в жидкой минеральной среде. А, Е – с ПФГпК, Б, Ж – с ПФОК, В, З – с ПФНК, Г, И – с ПФДК, Д, К – с ПФОС

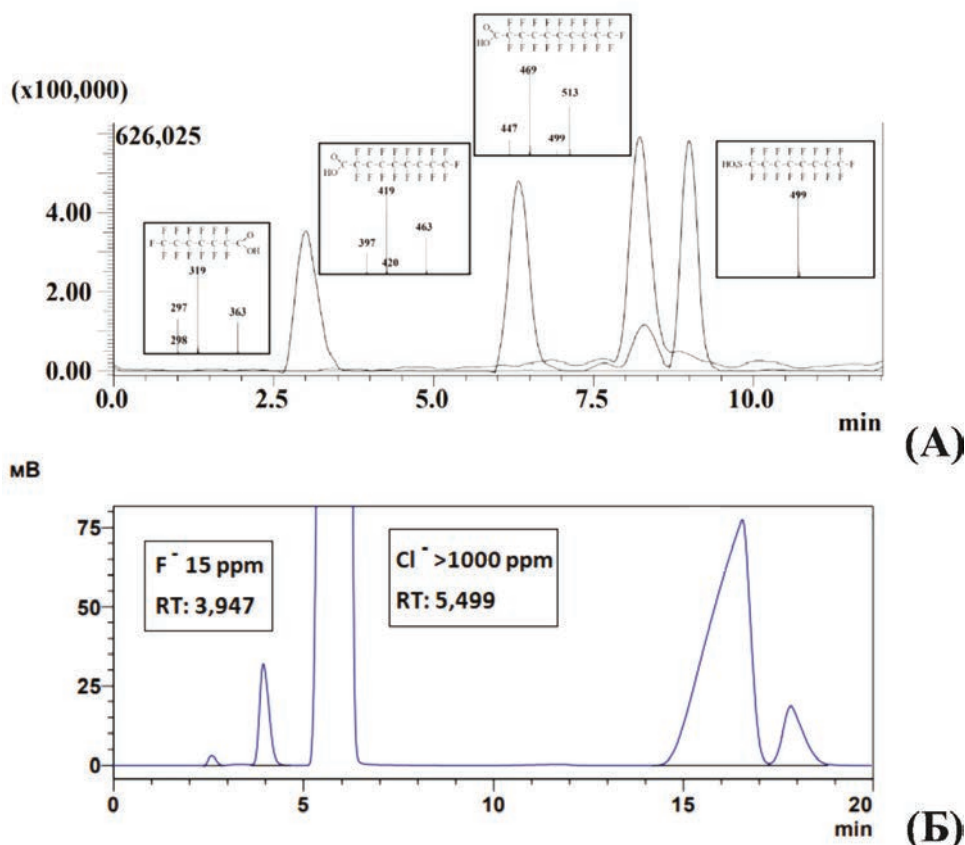


Рис. 4. Временные характеристики и хроматограммы разделения ПФКК на хромато-масс-спектрометре (А) и обнаружения высвобождающихся ионов фтора хроматографией с кондуктометрическим детектированием (Б)

боте [23], но без подтверждения описанным генетическим потенциалом и частичной минерализацией при выделении фтора. Литература по токсичности ПФКК указывает на то, что чем короче цепочка F–C, тем более благоприятен токсикологический профиль. Соответственно имеется определенный смысл в плане снижения токсичности ПФКК для человека, в том, чтобы сократить цепочку хотя бы на одно звено [62–64].

Заключение

Впервые описаны штаммы бактерий рода *Pseudomonas*, способные к деструкции (C₇–C₁₀)-перфторкарбоновых кислот. Их геномы полностью секвенированы. Они содержат комплекс генов, продукты которых участвуют в деструкции фторорганических соединений (дегалогенировании) – гены галоалкандегалогеназы (*dhaA*), галоацетатдегалогеназы H-1 (*dehH1*), переносчика ионов фтора (*CrcB*) и алкансульфонатмонооксигеназы (*SsuE*), не упоминаемые в таком составе у микроорганизмов ранее. Штамм *Pseudomonas* за 7 суток культивирования в жидкой среде с различными (C₇–C₁₀)-перфторкарбоновыми кисло-

тами в качестве единственного источника углерода и энергии полностью их утилизировали. Результаты анализа с помощью ЖХ-МС показали, что разложение проходит до перфторгексановой кислоты с высвобождением, при разных стехиометрических соотношениях в зависимости от ПФКК, индикаторов минерализации ионов фтора, определенных ионной хроматографией. По полученным результатам можно утверждать, что механизм деградации ПФКК штаммами *Pseudomonas* состоит в образовании продуктов деградации с более короткими алифатическими цепями за счет удаления группы –CF₂. Таким образом, штаммы бактерий рода *Pseudomonas* демонстрирует генетически подтвержденный большой потенциал разложения ПФКК, а полученные результаты помогут как в фундаментальном изучении процессов, происходящих в клетках штаммов, так и в разработке биотехнологий реабилитации окружающей среды при загрязнении фторорганическими соединениями.

Благодарности. Работа выполнена за счёт Российского Научного Фонда (номер гранта 23-24-00154).



DOI: 10.24855/biosfera.v17i1.955

Список литературы/References

- Ross I, McDonough J, Miles J, Storch J, Kochunaryanan PT, Kalve E, Hurst J, Dasgupta SS. A review of emerging technologies for remediation of PFASs. *Remediation*. 2018;28:101-26. doi: 10.1002/rem.21553.
- Fujii S, Tanaka S, Hong Lien NP, Qiu Y, Polprasert C. New POPs in the water environment: Distribution, bioaccumulation and treatment of perfluorinated compounds: A review paper. *AQUA*. 2007;56(5):313-26. doi: 10.2166/aqua.2007.005.
- Nascimento RA, Nunoo DBO, Bizkarguenaga E, Schultes L, Zabaleta I, Benskin JP, Spano S, Leonel J. Sulfluramid use in Brazilian agriculture: A source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) to the environment. *Environ Pollut*. 2018;242:1436-43. doi:10.1016/j.envpol.2018.07.122.
- Xia C, Diamond ML, Peaslee GF, Peng H, Blum A, Wang Z, Shalin A, Whitehead HD, Green M, Schwartz-Narbonne H, Yang D, Venier M. Per- and polyfluoroalkyl substances in North American school uniforms. *Environ Sci Technol*. 2022;56:13845-57. doi: 10.1021/acs.est.2c02111.
- Schaider LA, Balan SA, Blum A, Andrews DQ, Strynar MJ, Dickinson ME, Lunderberg DM, Lang JR, Peaslee GF. Fluorinated compounds in U.S. fast food packaging. *Environ Sci Technol Lett*. 2017;4:105-11. doi: 10.1021/acs.estlett.6b00435.
- Pozo K, Moriera LB, Karaskova P, Pribylova P, Klanova J, de Carvalho MU, Maranhão LA, de Souza Abessa DM. Using large amounts of firefighting foams releases per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) into estuarine environments: A baseline study in Latin America. *Mar Pollut Bull*. 2022;182:113938. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113938.
- Prevedouros K, Cousins IT, Buck RC, Korzeniowski SH. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates. *Environ Sci Technol*. 2006;40(1):32-44. doi: 10.1021/es0512475.
- Wang Y, Munir U, Huang Q. Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in soil: Sources, fate, and remediation. *Soil Environ Health*. 2023;1(1):100004. doi: 10.1016/j.seh.2023.100004.
- Bin J, Yaqian Z. World profile of foreseeable strategies for the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from water. In: *Persistent Pollutants in Water and Advanced Treatment Technology*. 2023. P. 47-69.
- Sung-Hee S. Health risk of human exposure to perfluorinated compounds (PFASs) in Hyeongsan River, Pohang. *Jf Environ Analysis Health Toxicol*. 2022;3:77-84. doi: 10.36278/jeaht.25.3.77.
- Calvert L, Green MP, De Iuliis GN, Dun M, Turner BD, Clarke BO, Eamens AL, Roman SD, Nixon B. Assessment of the emerging threat posed by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances to mrle Reproduction in humans. *Front Endocrinol*. 2022;12:799043. doi: 10.3389/fendo.2021.799043.
- Cheng J, Vecitis CD, Park H, Mader BT, Hoffmann MR. Sonochemical degradation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in landfill groundwater: environmental matrix effects. *Environ Sci Technol*. 2008;42:8057-63. doi: 10.1021/es8013858.
- Wang F, Shih K, Lu X, Liu C. Mineralization behavior of fluorine in perfluorooctanesulfonate (PFOS) during thermal treatment of lime-conditioned sludge. *Environ Sci Technol*. 2013; 47: 2621-27. doi: 10.1021/es305352p.
- Marquínez-Marquínez AN, Lóor-Molina NS, Quiroz-Fernández LS, Maddela NR, Luque R, Rodríguez-Díaz JM. Recent advances in the remediation of perfluoroalkylated and polyfluoroalkylated contaminated sites. *Environ Res*. 2023;219:115152. doi: 10.1016/j.envres.2022.115152.
- Kabiri S, Navarro DA, Hamad SA, Grimison C, Higgins CP, Mueller JF, Kookana RS, McLaughlin MJ. Physical and chemical properties of carbon-based sorbents that affect the removal of per- and polyfluoroalkyl substances from solution and soil. *Sci Total Environ*. 2023;875:162653. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162653.
- Mayer-Blackwell K, Sewell H, Fincker M, Spormann AM. Comparative physiology of organohalide-respiring bacteria. In: Adrian BTL, Löffler FE, eds. *Organohalide-Respiring Bacteria*. Berlin Heidelberg: Springer; 2016. P. 259-80.
- Wackett LP, McMahon K. Why Is the biodegradation of polyfluorinated compounds so rare? *mSphere*. 2021; 6(5):Article e00721-21. doi: 10.1128/mSphere.00721-21.
- Chetverikov SP, Sharipov DA, Korshunova TY, Loginov ON. Degradation of perfluorooctanyl sulfonate by strain *Pseudomonas plecoglossicida* 2.4-D. *Appl Biochem Microbiol*. 2017;53(5):533-8. doi: 10.1134/S0003683817050027.
- Shaw DMJ, Munoz G, Bottos EM, Duy SV, Sauve S, Liu J, Van Hamme JD. Degradation and defluorination of 6:2 fluorotelomer sulfonamidoalkyl betaine and 6:2 fluorotelomer sulfonate by *Gordonia* sp. strain NB4-1Y under sulfur-limiting conditions. *Sci Total Environ*. 2019;647:690-8. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.012.
- Huang S, Jaffé PR. Defluorination of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) by *Acidimicrobium* sp. Strain A6. *Environ Sci Technol*. 2019;53(19):11410-19. doi: 10.1021/acs.est.9b04047.
- Yu Y, Zhang K, Li Z, Ren C, Chen J, Lin Y.-H, Liu J, Men Y. Microbial cleavage of C-F bonds in two C6 Per-

- and polyfluorinated compounds via reductive defluorination. *Environ Sci Technol.* 2020;54(22):14393-402. doi: 10.1021/acs.est.0c04483.
22. Ruiz-Urigüen M, Shuai W., Huang S, Jaffé PR. Biodegradation of PFOA in microbial electrolisis cells by *Acidimicrobiaceae* sp. strain A6. *Chem.* 2022;292:133506. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133506.
 23. Kwon BG, Lim H-J, Na S-H, Choi B-I, Shin D-S, Chung S-Y. Biodegradation of perfluorooctanesulfonate (PFOS) as an emerging contaminant. *Chemosphere.* 2014;109:221-5. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.072.
 24. Yi LB, Chai LY, Xie Y, Peng QJ, Peng QZ. Isolation, identification, and degradation performance of a PFOA-degrading strain. *Genet Mol Res.* 2016;15:235-46. doi: 10.4238/gmr.15028043.
 25. Beškoski VP, Yamamoto A, Nakano T, Yamamoto K, Matsumura C, Motegi M, Beškoski LS, Inui H. Defluorination of perfluoroalkyl acids is followed by production of monofluorinated fatty acids. *Sci Total Environ.* 2018;636:355-59. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.243.
 26. Chiriac FL, Stoica C, Iftode C, Pirvu F, Petre VA, Paun I, Pascu LF, Vasile GG, Nita-Lazar M. Bacterial biodegradation of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorosulfonic acid (PFOS) using pure *Pseudomonas* strains. *Sustainability.* 2023;15(18):14000. doi: 10.3390/su151814000.
 27. Zhang Z, Sarkar D, Biswas JK, Datta R. Biodegradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): a review. *Bioresour Technol.* 2022;344:126223. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126223.
 28. Kiel M, Engesser KH. The biodegradation vs. biotransformation of fluorosubstituted aromatics. *App Microbiol Biotechnol.* 2015;99:7433-64. doi: 10.1007/s00253-015-6817-5.
 29. Nogales J, García JL, Díaz E. Degradation of aromatic compounds in *Pseudomonas*: A systems biology view. In: Rojo F, ed. *Aerobic Utilization of Hydrocarbons, Oils and Lipids: Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology.* Cham, Switzerland: Springer: 2017. P. 1-49.
 30. Yi L, Tang C, Peng Q, Peng Q, Chai L. Draft genome sequence of perfluorooctane acid-degrading bacterium *Pseudomonas parafulva* YAB-1. *Genome Announc.* 2015; 3: e00935–e00915. doi: 10.1128/genomeA.00935-15.
 31. Harris J, Gross M, Kembal J, Farajollahi S, Dennis P, Sitko J, Steel JJ, Almand E, Kelley-Loughnane N, Varaljay VA. Draft genome sequence of the bacterium *Delftia acidovorans* Strain D4B isolated from soil. *Microbiol Resour Announc.* 2021;10(44):e0063521. doi:10.1128/MRA.00635-21.
 32. Spaan KM, van Noordenburg C, Plassmann MM, Schultes L, Shaw S, Berger M, Heide-Jørgensen MP, Rosing-Asvid A, Granquist SM, Dietz R, Sonne C, Rigét F, Roos A, Benskin JP. Fluorine mass balance and suspect screening in marine mammals from the northern hemisphere. *Environ Sci Technol.* 2020;54(7):4046-8. doi: 10.1021/acs.est.9b06773.
 33. Brendel S, Fetter É, Staude C, Vierke L, Biegel-Engler A. Short-chain perfluoroalkyl acids: environmental concerns and a regulatory strategy under REACH. *Environ Sci Eur.* 2018;30(1): 9. doi: 10.1186/s12302-018-0134-4.
 34. Li F, Duan J, Tian S, Ji H, Zhu Y, Wei Z, Zhao D. Short-chain per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic systems: occurrence, impacts and treatment. *Chem Engin J.* 2020; 380:122506. doi: 10.1016/j.cej.2019.122506.
 35. 35.ic acids by extraction with phenol:chloroform. *Cold Spring Harb Protoc.* 2006; 2006(1):pdb.prot4455. doi: 10.1101/pdb.prot4455.
 36. Bolger AM, Lohse M, Usadel B. Trimmomatic: A flexible trimmer for Illumina Sequence Data. *Bioinformatics.* 2014;30(15):2114-20. doi: 10.1093/bioinformatics/btu170.
 37. Bankevich A, Nurk S, Antipov D, Gurevich A, Dvorkin M, Kulikov AS, Lesin V, Nikolenko S, Pham S, Prjibelski A, Pyshkin A, Sirotkin A, Vyahhi N, Tesler G, Alekseyev MA, Pevzner PA. SPAdes: a new genome assembly algorithm and its applications to single-cell sequencing. *J Comput Biol.* 2012;19:455-77. doi: 10.1089/cmb.2012.0021.
 38. Langmead B, Salzberg SL. Fast gapped-read alignment with Bowtie 2. *Nat Methods.* 2012; 9:357-359. doi: 10.1038/nmeth.1923.
 39. Walker BJ, Abeel T, Shea T, Priest M, Abouelliel A, Sakthikumar S, Cuomo CA, Zeng Q, Wortman J, Young SK, Earl AM. Pilon: An integrated tool for comprehensive microbial variant detection and genome assembly improvement. *PLoS ONE.* 2014; 9: e112963. doi: 10.1371/journal.pone.0112963. eCollection 2014.
 40. Yoon SH, Ha SM, Lim JM, Kwon SJ, Chun J. A large-scale evaluation of algorithms to calculate average nucleotide identity. *Antoine Van Leeuwenhoek.* 2017;110(10):1281-6. doi:10.1007/s10482-017-0844-4.
 41. Meier-Kolthoff JP, Sardà Carbasse J, Peinado-Olarte RL, Göker M. TYGS and LPSN: a database tandem for fast and reliable genome-based classification and nomenclature of prokaryotes. *Nucl Acid Res.* 2022;50(D1):D801-7. doi: 10.1093/nar/gkab902.
 42. Seemann T. Prokka: Rapid prokaryotic genome annotation. *Bioinformatics.* 2014;30:2068-9. doi: 10.1093/bioinformatics/btu153.
 43. Altschul SF, Gish W, Miller W, Myers EW, Lipman DJ. Basic local alignment search tool. *J Mol*

- Biol. 1990;215:403-10. doi: 10.1016/S0022-2836(05)80360-2.
44. Lefort V, Desper R, Gascuel O. FastME 2.0: A comprehensive, accurate, and fast distance-based phylogeny inference program. *Mol Biol Evol.* 2015;32:2798-800. doi: 10.1093/molbev/msv150.
 45. Farris JS. Estimating phylogenetic trees from distance matrices. *Am Nat.* 1972;6:645-67.
 46. Letunic I, Bork P. Interactive Tree Of Life (iTOL) v5: An online tool for phylogenetic tree display and annotation. *Nucl Acids Res.* 2021;49:W293-6. doi: 10.1093/nar/gkab301.
 47. Meier-Kolthoff JP, Goker M. TYGS is an automated high-throughput platform for state-of-the-art genome-based taxonomy. *Nat Commun.* 2019;10:2182. doi: 10.1038/s41467-019-10210-3.
 48. Meier-Kolthoff JP, Hahnke RL, Petersen J, Scheuner C, Michael V, Fiebig A, Rohde C, Rohde M, Fartmann B, Goodwin LA, Chertkov O, Reddy T, Pati A, Ivanova NN, Markowitz V, Kyrpides NC, Woyke T, Göker M, Klenk H-P. Complete genome sequence of DSM 30083(T), the type strain (U5/41(T)) of *Escherichia coli*, and a proposal for delineating subspecies in microbial taxonomy. *Stand Genom Sci.* 2014;9:2. doi: 10.1186/1944-3277-9-2. eCollection 2014.
 49. Lee I, Ouk Kim Y, Park SC, Chun J. OrthoANI: An improved algorithm and software for calculating average nucleotide identity. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2016;66:1100-3. doi: 10.1099/ijsem.0.000760.
 50. Raymond RL. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons. *Dev Ind Microbiol.* 1961;2:23-54.
 51. Bertani G. Studies on lysogenesis I. *J Bacteriol.* 1951;62:293-300. doi: 10.1128/jb.62.3.293-300.1951.
 52. Olson RD, Assaf R, Brettin T, Conrad N, Cucinell C, Davis JJ, Dempsey DM, Dickerman A, Dietrich EM, Kenyon RW, Kuscuoglu M, Lefkowitz EJ, Lu J, Machi D, Macken C, Mao C, Niewiadomska A, Nguyen M, Olsen GJ, Overbeek JC, Parrello B, Parrello V, Porter JS, Pusch GD, Shukla M, Singh I, Stewart L, Tan G, Thomas C, Van Oeffelen M, Vonstein V, Wallace ZS, Warren AS, Wattam AR, Xia F, Yoo H, Zhang Y, Zmasek CM, Scheuermann RH, Stevens RL. Introducing the bacterial and viral bioinformatics resource center (BV-BRC): A resource combining PATRIC, IRD and ViPR. *Nucl Acids Res.* 2023; 51:D678-89. doi: 10.1093/nar/gkac1003.
 53. Chun J, Oren A, Ventosa A, Christensen H, Arahall DR, da Costa MS, Rooney AP, Yi H, Xu XW, De Meyer S, Trujillo ME. Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2018;68:461-6. doi: 10.1099/ijsem.0.002516.
 54. Marchetto F, Roverso M, Righetti D, Bogianni S, Filippini F, Bergantino E, Sforza E. Bioremediation of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) by *Synechocystis* sp. PCC 6803: A chassis for a synthetic biology approach. *Life.* 2021;11:1300. /doi: 10.3390/life1121300.
 55. Li Y, Yue Y, Zhang H, Yang Z, Wang H, Tian S, Wang J, Zhang Q, Wang W. Harnessing fluoroacetate dehalogenase for defluorination of fluorocarboxylic acids: In silico and in vitro approach. *Environ Int.* 2019;131: 104999. doi: 10.1016/j.envint.2019.104999.
 56. Trang B, Li Y, Xue XS, Ateia M, Houk KN, Dichtel WR. Low-temperature mineralization of perfluorocarboxylic acids. *Science.* 2022;377(6608):839-45. doi: 10.1126/science.abm8868.
 57. Park C, Shin B, Park W. Protective role of bacterial alkanesulfonate monooxygenase under oxidative stress. *App Environ Microbiol.* 2020;86(15):e00692-20. doi: 10.1128/AEM.00692-20.
 58. Calero P, Gurdo N, Nikel PI. Role of the *CrcB* transporter of *Pseudomonas putida* in the multi-level stress response elicited by mineral fluoride. *Environ Microbiol.* 2022;24(11):5082-104. doi: 10.1111/1462-2920.16110.
 59. Wackett LP. *Pseudomonas*: versatile biocatalysts for PFAS. *Environ Microbiol.* 2022;24(7):2882-9. doi: 10.1111/1462-2920.15990.
 60. Winsor GL, Van Rossum T, Lo R, Khaira B, Whiteside MD, Hancock RE, Brinkman FS. *Pseudomonas* genome database: facilitating user-friendly, comprehensive comparisons of microbial genomes. *Nucl Acids Res.* 2009; 37:D483-8. doi: 10.1093/nar/gkn861.
 61. Winsor GL, Griffiths EJ, Lo R, Dhillon BK, Shay JA, Brinkman FS. Enhanced annotations and features for comparing thousands of *Pseudomonas* genomes in the *Pseudomonas* genome database. *Nucl Acids Res.* 2016;44:D646-53. doi: 10.1093/nar/gkv1227.
 62. Luz AL, Anderson JK, Goodrum P, Durda J. Perfluorohexanoic acid toxicity, part I: Development of a chronic human health toxicity value for use in risk assessment. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2019;103:41-55. doi:10.1016/j.yrtph.2019.01.019.
 63. Zango ZU, Ethiraj B, Al-Mubaddel FS, Alam MM, Lawal MA, Kadir HA, Khoo KS, Garba ZN, Usman F, Zango MU, Lim JW. An overview on human exposure, toxicity, solid-phase microextraction and adsorptive removal of perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs) from water matrices. *Environ Res.* 2023;231(Pt.2):116102. doi:10.1016/j.envres.2023.116102.
 64. Han JS, Jang S, Son HY, Kim YB, Kim Y, Noh JH, Kim MJ, Lee BS. Subacute dermal toxicity of perfluoroalkyl carboxylic acids: comparison with different carbon-chain lengths in human skin equivalents and systemic effects of perfluoroheptanoic acid in Sprague Dawley rats. *Arch Toxicol.* 2020;94(2):523-39. doi: 10.1007/s00204-019-02634-z.

ЗЕЛЕННЫЕ НАСАЖДЕНИЯ МАЛЫХ ГОРОДОВ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Д.В. Жучков^{1*}, В.П. Макаренко²

¹ Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН и ² Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, г. Биробиджан, Россия

* Эл. почта: dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; принята к печати 10.03.2025

В работе приведен анализ участия озеленения в проектах по комплексной модернизации территорий малых городов на юге Дальнего Востока России. Оценена динамика значений индекса качества городской среды и отдельных индикаторов, характеризующих озелененные пространства. Отмечена тенденция к улучшению условий проживания населения благодаря увеличению работ по благоустройству общественных пространств, в том числе озелененных. В то же время выявлено отсутствие системного подхода к проектированию и реконструкции городского озеленения. В большинстве мероприятий по благоустройству общественных пространств крупные озеленительные работы не предусмотрены. Благоустройство таких территорий ограничено созданием тротуарных сетей и велосипедных дорожек, организацией малых архитектурных форм, общим облагораживанием территории и посадкой цветочных клумб из декоративных однолетников. Работы по озеленению проводятся спонтанно без учета биологических особенностей высаживаемых видов. Выявлены недостатки отечественной системы индексирования качества городской среды в отношении блока «озелененные пространства». Не учитываются такие важные, на наш взгляд, показатели, как доля древесных насаждений, состояние экологического каркаса, жизненное состояние древесных насаждений, оценка рекреационной дигрессии общественных пространств и пр. Поэтому актуальным направлением в улучшении системы индексирования является создание более совершенных индикаторов. Еще одним недостатком анализируемой системы индексирования является то, что она представляет собой рейтинговый список городов. Некорректность рейтингового подхода заключается в том, что большинство городских населенных пунктов отличается друг от друга природно-климатическими условиями, уровнем освоенности городских земель, разницей финансовых ресурсов и другими особенностями. Работы по модернизации городского пространства должны стать первоочередными, а мониторинг качества городской среды – их основой.

Ключевые слова: качество городской среды, зеленые насаждения, озеленение, малый город, юг Дальнего Востока.

GREEN AREAS OF SMALL TOWNS IN THE SOUTHERN FAR EAST OF RUSSIA AS AN INDICATOR OF QUALITY OF URBAN ENVIRONMENT

D.V. Zhuchkov^{1*}, V.P. Makarenko²

¹ Institute of Comprehensive Analysis of Regional Problems, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, and
² Pryamursky State University named after Sholem Aleichem, Birebikan, Russia

* Email: dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru

The present discussion addresses the involvement of greenery planting in projects of comprehensive modernization of the territories of small towns in the south of Far East of Russia. The dynamics of the integral urban environment quality index and of its several components related to green spaces is assessed. A trend towards improving the living conditions in the towns due to development of public spaces, including green spaces, is evidenced. However, an integral comprehensive approach to designing and reconstructing of urban green spaces is still lacking. Large-scale greenery planting is not stipulated in most plans of improvement of public spaces. Usually, such plans are limited to developing of pathway networks for pedestrians and bicyclists, to erection of small architectural objects, to a general amelioration, and to making flowered beds. Such operations are often carried out spontaneously without accounting for the biological characteristics of vegetation intended for planting. Shortcomings concerning green spaces are found in the system of indexing of quality of the urban environment currently adopted in Russia. The indices do not account for such important parameters as the proportion of trees in vegetation, the condition of the environmental framework, the vital conditions of trees, and the degree of recreational digression of public spaces. Therefore, the development of more elaborate indices is warranted. Another shortcoming of indexing is that it is based on a ranked list of towns. The inadequacy of ranking is rooted in that most towns are different in their climatic, developmental, financial and other conditions. Modernization of urban spaces is a priority, which must be based on monitoring of their conditions.

Keywords: urban environment, green areas, landscape gardening, small town, the south of far East

Введение

Зеленые насаждения являются важной составной частью городской экосистемы [16, 28]. В работах отечественных и зарубежных специалистов подтверждается важная роль озеленения в повышении качества городской среды, условий проживания и уровня жизни населения [2, 3, 7, 9, 13, 15, 22, 25–30, 33–35, 39]. Зеленые насаждения способствуют стабилизации условий среды города, выполняя важные средоформирующие и средостабилизирующие функции [2, 14, 22, 25, 26, 28, 29, 34, 39]. Вопросы о функциях озеленения рассматриваются авторами в ряде публикаций, где подчеркнута особая связь между зелеными насаждениями и устойчивым городским развитием [10–12]. Следует отметить, что исследования, связанные с городским озеленением, являются одним из интенсивно развивающихся направлений в современной науке [23, 34].

Анализ публикаций за период 2010–2023 годов [23] позволил отметить достаточно высокую изученность зеленых насаждений больших и крупных городов. Для малых и средних городов этот вопрос только набирает популярность. Работы, посвященные малым городам, представляют собой незавершенные исследования, ограничивающиеся в большей степени инвентаризационными работами без дальнейшего теоретического и эмпирического анализа.

Малые города России выступают важным связующим звеном в градостроительном пространстве страны, выполняя при этом ключевую роль в расселении населения [4, 20, 34, 36, 38]. На долю малых городов приходится 71% общего количества городов нашей страны (1119). В этих городах проживает 30 млн человек, что составляет 27% численности населения страны.

В период ускоренных темпов развития промышленной базы на территории Дальнего Востока России (ДВР) именно малые города выступали ядрами формирования градостроительной сети региона [20, 36]. В настоящий момент основная часть городского населения концентрируется в южной части ДВР – 75%. Здесь расположены 35 малых городов (74,5%) из 45 имеющихся.

Для малых городов региона характерны общероссийские проблемы – отток населения в крупные региональные центры, бедность, спад производства, снижение качества городской среды из-за отсутствия материальных и финансовых средств на благоустройство и др. [38]. Президентом РФ определены ключевые направления по комплексному развитию малых городов. Предполагается проведение реконструкции устаревшей городской инфраструктуры – социальных объектов, жилых зон и общественных пространств (парки, скверы, бульвары). Важную позицию в этом вопросе занимает федеральный проект «Формиро-

вание комфортной городской среды»¹, принятый в 2018 году. Главная цель проекта¹ заключается в повышении среднего значения индекса качества городской среды (ИКГС) к 2024 году на 30% по сравнению с 2018 годом. Предполагается, что к 2030 году увеличение числа городов с комфортными условиями проживания будет способствовать удержанию населения в малых городах и привлечению в них новых жителей. В рамках проекта реализуются и другие направления, например, утверждены к реализации долгосрочные планы комплексного социально-экономического развития, а также разрабатываются мастер-планы по оптимизации пространственного развития городов.

Учитывая вышесказанное, в нашем исследовании главной целью стала оценка актуальности работ по озеленению применительно к малым городам юга Дальнего Востока России.

Материалы и методы исследования

Объектами для анализа в работе выступили малые города юга ДВР, которые отличаются друг от друга природно-климатическими условиями и процессами освоения территории [1, 20, 36]. К южной части ДВР относятся 6 субъектов (Забайкальский край, Республика Бурятия, Амурская область, Еврейская автономная область, Хабаровский край, Приморский край).

Для оценки степени комфортности городских условий использованы ежегодно публикуемые статистические отчеты ИКГС за период 2018–2023 годов¹. Проведен анализ отчетов, научных публикаций и проектов по благоустройству городов. Применялась методика расчета индекса, предполагающая учет нескольких показателей, среди которых выделен показатель озелененных пространств. Он включает 6 индикаторов (табл. 1), на основании значений которых формируется представление о благоприятности или неблагоприятности условий городской среды¹.

Результаты

Комфортные городские условия создаются в первую очередь для жителей города. Особую значимость данное направление приобрело в модернизации облика малых городов страны. Значение их ИКГС на фоне других городов продолжает оставаться низким. В 2018 году оно составило 157 баллов, но к 2022 году ситуация изменилась: прирост составил 31 балл, и значение увеличилось до 188 баллов (благоприятные городские условия). По состоянию на 2023 год среднее значение ИКГС в малых городах страны составляет 196 баллов¹.

Мероприятия по улучшению качества городской среды и ее привлекательности для горожан являются

¹ Индекс качества городской среды. URL: <https://индекс-городов.рф/#!/cities/10033> (дата обращения: 12.09.2024).

Табл. 1

Индикаторы для оценки состояния озелененных пространств городов [14]

Индикатор	Характеристика
Доля озелененных территорий общего пользования в общей площади зеленых насаждений	Индикатор рассчитывается путем деления площади озелененных территорий общего пользования на общую площадь зеленых насаждений города. Анализируемые территории должны характеризоваться несколькими ключевыми характеристиками – безопасность, привлекательность, благоустроенность и в целом комфортность.
Уровень озеленения	Расчет производится путем деления общей площади зеленых насаждений на площадь города. Используется для оценки роли зеленых насаждений в выполнении санитарно-гигиенических функций, в организации пространства и в создании зеленой инфраструктуры. Зеленые насаждения, расположенные между объектами функционального зонирования, объединяют их, придают целостность городу и оживляют городские ландшафты.
Состояние зеленых насаждений	Существует несколько подходов к оценке индикатора – использование типовых методик оценки жизненного состояния древесных и кустарниковых насаждений, санитарного состояния озеленения, а также применение данных дистанционного зондирования земли и расчета нормализованного вегетационного индекса растительности (NDVI). Результаты расчета позволяют оценить биопродуктивную способность зеленых насаждений, которая прямо связана с их способностью улучшать свойства атмосферы, почв и поверхностных вод в городе.
Привлекательность озелененных территорий	Используется для оценки разнообразия зеленых пространств. Считается, что чем больше создано условий для приятного времяпровождения в парках, скверах и др., тем такие территории считаются более привлекательными для жителей. Для оценки привлекательности используется информация (фотографии), размещенная в интернет-ресурсах, особенно в социальных сетях.
Разнообразие услуг на озелененных территориях	Индикатор оценивает современность городской среды, а также их роли в удовлетворении рекреационных и социальных потребностей жителей разных категорий.
Доля населения, имеющего доступ к озелененным территориям общего пользования, в общей численности населения	Анализирует уровень пешеходной доступности озелененных территорий общего пользования для любой категории жителей. Наибольшее значение индикатор получил в контексте задачи № 11 цели устойчивого развития. Для расчетов используется несколько уровней доступа – 5, 10, 15, 20 минут.

особенно актуальными для городов ДВР с их сложными природно-климатическими условиями и определенными социально-экономическими проблемами.

Индекс качества городской среды малых городов юга ДВР

В южной части ДВР число малых городов с неблагоприятной городской средой в 2018 году составляло 32, но в 2023 году оно снизилось до 23. В целом по регионам ситуация неоднозначна. На это влияют природно-климатические условия, история освоения и удаленность от региональных центров [36].

Значения ИКГС за изученный период ежегодно росли (табл. 2). В 2018 году значения для малых городов в рассматриваемых субъектах показали, что практически для всех были характерны неблагоприятные условия городской среды, за исключением одного – Циолковского в Амурской области, который набрал

204 балла. Значительный вклад здесь внесла активная строительная кампания, направленная на обновление жилого фонда и общественной инфраструктуры, в частности для рабочих, обслуживающих космодром «Восточный». Дополнительное влияние оказали работы по благоустройству общественных пространств, создание новых скверов и парков. В 2020 году к числу городов с благоприятными условиями для жизни присоединились Советская Гавань (Хабаровский край) и Фокино (Приморский край); в 2021 году – Дальнереченск (Приморский край); в 2022 году – Райчихинск (Амурская обл.) и Амурск (Хабаровский край).

К 2023 году ситуация в малых городах субъектов юга ДВР продолжала изменяться. Из-за снижения численности к категории «малые города» в 2023 году были отнесены г. Белогорск (Амурская обл.) и г. Арсеньев (Приморский край). По отношению к 2018 году число городов с благоприятной городской средой уве-

личилось в 12 раз (до 12 городов), а число малых городов с неблагоприятной средой сократилось в 1,5 раза (до 23 городов). Прирост значений индекса за анализируемый период составил 26% (со 137 до 173 баллов), что на 12% ниже аналогичного значения по стране.

Изменение показателей за шестилетний период не позволяет в полной мере оценить улучшение качества городской среды в малых городах. К примеру, в Забайкальском крае 8 малых городов, среди которых отме-

чается разница в темпах прироста значений ИКГС: от минимальных 1,8% в г. Могоче до максимального 41,5% в г. Шилке. В Еврейской автономной области единственным малым городом является Облучье с темпом прироста индекса 33,6%. Из-за неодинаковых численностей городов сравнение субъектов между собой не корректно. Для полноценного анализа ситуации необходим более детальный подход, учитывающий специфичность и уникальность каждого города.

Табл. 2

Малые города юга Дальнего Востока в системе индексирования качества городской среды [14]

Город	Население, тыс. чел. (2023)	Значения индекса качества городской среды, баллы						Изменение с 2018 по 2023 год, %
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Забайкальский край								
Балей	10,2	92	102	111	111	116	121	24,4
Борзя	29,3	124	124	124	135	153	156	
Могоча	12,3	162	145	151	154	165	165	
Нерчинск	15,1	110	122	123	133	141	141	
Петровск-Забайкальский	14,7	130	131	135	140	146	157	
Сретенск	6,0	130	148	149	151	170	177	
Хилок	9,8	104	114	122	124	123	133	
Республика Бурятия								
Бабушкин	4,3	116	136	149	156	160	161	28,1
Гусиноозерск	24,4	146	154	156	161	165	173	
Закаменск	11,1	124	124	131	139	151	167	
Кяхта	18,0	136	137	155	159	171	177	
Северобайкальск	24,4	152	165	155	171	180	185	
Амурская область								
Завитинск	9,3	142	150	157	159	164	163	19,7
Зея	18,9	139	146	155	164	170	173	
Райчихинск	15,9	161	157	172	180	193	193	
Сковородино	6,7	129	132	135	143	161	161	
Тында	28,2	136	137	151	157	165	166	
Циолковский	7,4	202	198	201	202	209	214	
Шимановск	16,2	159	168	171	182	179	190	
Еврейская автономная область								
Облучье	7,8	125	133	142	142	155	167	33,6
Хабаровский край								
Амурск	37,9	172	176	178	184	198	203	21,9
Бикин	15,9	140	138	153	158	177	179	
Вяземский	12,8	136	140	150	160	157	169	
Николаевск-на-Амуре	18,0	155	157	170	172	176	180	
Советская Гавань	23,8	171	178	181	192	206	216	
Приморский край								
Арсеньев	47,3	164	156	168	171	173	184	29,8
Большой Камень	40,4	160	151	161	161	177	177	
Дальнегорск	33,0	126	140	166	170	173	175	
Дальнереченск	23,0	129	146	166	181	184	188	
Партизанск	33,2	111	129	129	132	137	141	
Спасск-Дальний	35,1	138	149	160	161	168	182	
Фокино	19,4	157	161	182	187	189	195	

Предполагается, что в 2024 году среднее значение ИКГС по стране должно составить не менее 212 баллов¹. Основываясь на динамике прироста значений этого индекса в малых городах юга ДВР в 2018–2023 годах, мы определили, что его среднее значение в 2024 году должно быть 180 баллов. Однако среднее по стране не отражает в полной мере ситуацию для отдельно взятого города, особенно малого, что ограничивает возможности своевременно выявлять и решать имеющиеся проблемы. Статистические данные показывают, что численность населения малых городов юга ДВР с 2018 по 2023 год снизилась на 38,2 тыс. человек¹. Следовательно, можно сказать, что имеющиеся индикаторы в отношении анализируемых городов работают не в полной мере. Увеличение численности населения отмечалось только в 6 городах: Борзя и Нерчинск (Забайкальский край), Гусиноозерск и Северобайкальск (Республика Бурятия), Циолковский (Амурская область), Большой Камень (Приморский край). Стабильность численности населения в этих городах во многом зависит от наличия градообразующего предприятия, которое предоставляет основное количество рабочих мест.

Озелененные пространства как один из критериев качества городской среды малых городов юга ДВР

Сохранение природной среды для настоящего и будущих поколений является одной из важных задач устойчивого развития². Это значит, что озеленение городов обретает стратегическую значимость в обеспечении устойчивости городской среды, ее комфортности и благоустроенности. Некоторые авторы отмечают [10, 11, 14, 17, 18, 25, 27, 28, 39], что зеленые зоны большинства городов, особенно общественные озелененные пространства, не соответствуют требованиям благоустроенности и комфортности, количественные нормативы озеленения не соблюдаются. В связи с этим работы по реконструкции, модернизации и созданию новых озелененных территорий должны становиться первоочередными.

Рассмотрим ситуацию в малых городах юга ДВР. Вклады показателя «озелененные пространства» в формирование общего значения индекса качества городской среды в малых городах региона различаются (табл. 3). В 2018 году их озелененные пространства относились к группе проседающих среди всех показателей по уровню благоприятности среды. Среднее значение по всем анализируемым городам в 2018 году составляло 21,5 балла, что оказалось ниже порогового значения (30 баллов). К 2023 году величина критерия изменилась – среднее значение увеличилось до 31,5 балла.

В 2018 году наименьшая оценка озелененного пространства среди анализируемых городов была в г. Борзя (8 баллов), а наибольшее – в г. Могоча (44 балла). В 2023 году минимальная оценка зафиксирована в городах Белей и Спасск-Дальний (21 балл). В г. Борзя оценка увеличилось до 35 баллов. В городе реконструируются имеющиеся и появляются новые общественные пространства, проводится восстановление и обновление зеленого фонда. Например, проект благоустройства центра города «Игра света» предусматривает изменение облика Центральной площади и ее озеленение². Напротив, в Могоче оценка уменьшилось на 10 баллов. В проекте по развитию городского пространства заявлена низкая доля мероприятий по благоустройству общественных пространств. В целом ситуация по малым городам юга ДВР остается неоднозначной и противоречивой.

При всей пользе от системы индексирования качества городской среды у ряда специалистов [5, 6, 10, 11, 13, 15, 24, 31, 32, 37] возникают вопросы о корректности индикаторов, применяемых для оценки критерия «озелененные пространства» (табл. 1). Например, индикаторы, связанные с озелененными территориями общего пользования, получили актуальность наравне с задачами целей устойчивого развития (ЦУР). Существующая отечественная система индексирования включает в состав таких территорий городские леса и внутриквартальные объекты озеленения, которым не всегда свойствен должный уровень благоустройства и которые не могут быть одинаково доступны для всех категорий жителей города. Следовательно, если ежегодно за счет таких территорий происходит увеличение значений индикатора, это не в полной мере отражает реальную обстановку с озелененными территориями общего пользования и, следовательно, не адекватно задачам ЦУР. Для малых городов, расположенных в лесной зоне и имеющих небольшую площадь, индикатор доступности озелененных территорий общего пользования теряет свою актуальность. У жителей таких городов есть преимущество в посещении доступных городских лесов [11]. Однако природные антропогенно неизменные ландшафты города лишены благоустроенности. Маломобильные категории населения не могут использовать их для тех видов отдыха и активности, которые могут предоставить скверы и парки. Таким образом, возникает необходимость пересмотреть состав территорий, учитываемых при расчете этих индикаторов.

Индикаторы «разнообразие услуг на озелененных территориях» и «привлекательность озелененных территорий» можно рассматривать как субъективные, поскольку их оценка складывается на основе результатов социологических опросов и количества фото-

² Новый облик городов Дальнего Востока. URL: <https://25городов.pf/?ysclid=m2jn1rwkrj878556269> (дата обращения: 20.09.2024).

Табл. 3

Динамика значений показателя «озелененные пространства» в 2018–2023 гг.

Название малого города	Значение показателя по годам, баллы		Прирост, баллы
	2018	2023	
Забайкальский край			
Борзя	8	35	+27
Нерчинск	11	30	+19
Петровск-Забайкальский	12	24	+12
Могоча	44	34	-10
Шилка	25	40	+15
Балей	12	21	+9
Хилок	13	24	+11
Сретенск	43	46	+3
Республика Бурятия			
Закаменск	16	25	+9
Кяхта	21	24	+3
Бабушкин	25	28	+3
Гусиноозерск	20	25	+5
Северобайкальск	17	29	+12
Амурская область			
Свободный	25	35	+10
Тында	20	31	+11
Зея	20	30	+10
Шимановск	18	30	+12
Райчихинск	26	30	+4
Завитинск	20	35	+15
Циолковский	34	43	+9
Сковородино	12	31	+9
Еврейская автономная область			
Облучье	15	36	+21
Хабаровский край			
Амурск	29	39	+10
Советская Гавань	23	34	+11
Николаевск-на-Амуре	21	38	+17
Бикин	18	39	+21
Вяземский	26	36	+10
Приморский край			
Арсеньев	23	32	+9
Большой Камень	28	23	−5
Спасск-Дальний	18	21	+3
Лесозаводск	26	30	+4
Партизанск	23	30	+7
Дальнегорск	28	29	+1
Дальнереченск	19	27	+8
Фокино	24	35	+11

графий, опубликованных в социальных сетях. Специфика подобной оценки общественного пространства зависит от каждого человека, его восприятия действительности, его вкусов, эмоционального состояния и др., что может привести к искажению результатов оценки.

Индикатор «уровень озеленения» рядом авторов считается ключевым [10, 11, 14, 15, 19–21], так как с его помощью оценивается вклад зеленых насаждений в стабилизацию экологических условий город-

ской среды. Следует отметить, что в действующем СП 42.13330.2016 отсутствует норматив уровня озеленения в городской застройке. В прежней версии документа (СП 42.13330.2011) этот уровень должен был составлять не менее 40%. Мы предлагаем [10, 11] проводить отдельный расчет уровня озеленения города как в его административных границах, так и в городской застройке. Такие предложения встречаются и в ряде других публикаций [2, 8]. Обосновывается это тем, что по направлению от периферии города к

центру, где преобладает техногенная составляющая, как правило, фиксируется сокращение площадей озелененных территорий, что негативно сказывается на экологическом равновесии городской среды.

Отечественные специалисты [2, 6, 10, 11, 13, 24, 32, 37] вносят предложения по оптимизации системы индексирования качества городской среды, включая озелененные пространства. Существующие индикаторы способны оценивать в основном эстетические и декоративные характеристики зеленых насаждений, что исключает из внимания важные санитарно-гигиенические, экологические, микроклиматические и другие функции.

На наш взгляд, в перечень индикаторов, характеризующих озеленение городов, следует включить долю древесных насаждений, оценку санитарного (жизненного) состояния растений, процент инвазионных видов в структуре флоры, долю охраняемых природных территорий (при наличии) в структуре города и степень рекреационной дигрессии общественных озелененных пространств.

С другой стороны, в настоящий момент сложно проиллюстрировать применение индикаторов для всех городов юга ДВР. Ранее мы с коллегами провели расчет некоторых индикаторов озеленения для г. Облучье [11]. Результаты показали неравномерное распределение растительного покрова по участкам функциональных зон города. В пределах городской застройки зеленые насаждения составляют около 30% общей площади озеленения, в то время как оставшиеся 70% относятся к непреобразованным (открытым) пространствам на периферии города. Отмечена низкая доля озелененных территорий общего пользования, составляющая всего 1,6% общей площади зеленых насаждений Облучья [11]. Другие специалисты проводили расчет площади зеленых зон в малых городах юга ДВР. Их значения находятся в пределах от 40,1 (Сретенск, Забайкальский край) до 73,1% (Вяземский, Хабаровский край) [18]. Имеющиеся значения можно применять для расчета некоторых индикаторов в последующих исследованиях.

Место озеленения в документах и проектах по благоустройству малых городов юга ДВР

С 2018 года проводится ежегодный конкурс, реализуемый в рамках федерального проекта «Формирование комфортной городской среды». С 2023 года был введен отдельный трек для городов Дальневосточного федерального округа. В его рамках проводятся мероприятия по благоустройству общественных пространств (парки, скверы, набережные, бульвары и аллеи). Согласно СП 475.1325800.2020, под благоустройством территории подразумевается не только организация малых архитектурных форм, освещения

и сети тротуарных дорожек, но и озеленение.

В проекты благоустройства малых городов юга ДВР в основном включены работы по созданию объектов развлекательного комплекса, пешеходных и велосипедных дорожек и организации МАФ, освещения и зон отдыха. При этом работы по озеленению сведены к минимуму. Упоминается только создание цветников и газонов, омолаживающая стрижка зеленых насаждений (кронирование) и удаление аварийных экземпляров. Работы по высадке саженцев на территориях чаще всего проходят спонтанно без учета экологической устойчивости, функциональной значимости и других свойств высаживаемых видов.

Одним из направлений в развитии дальневосточных городов стало появление долгосрочного плана комплексного развития на период до 2030 года, утвержденного Правительством РФ в 2023 году. В список включены 16 городов юга ДВР, среди которых 3 малых (Арсеньев, Большой Камень и Свободный). В Арсеньеве до 2030 года предполагается реализовать около 40 мероприятий, направленных на модернизацию социальной, коммунальной, транспортной и промышленной инфраструктуры. В блок «Комфортная городская среда» включены мероприятия по благоустройству общественных озелененных пространств. Однако эти мероприятия касаются только работ по благоустройству без указания действий по озеленению. В Большом Камне и Свободном ситуация аналогичная. Для этих городов общими являются мероприятия по организации цветочного оформления на территории парков и скверов. Основные работы заключаются в создании коворкинг-пространств, организации малых архитектурных форм (МАФ), установке скамеек и прокладке тротуаров. В проектах по благоустройству акцент сделан на уже имеющиеся озелененные территории. Организация новых общественных зон и их озеленение упоминаются редко.

Другим направлением комплексного развития городов стали мастер-планы, на основании которых выбирается наиболее предпочтительный вариант функционального зонирования. На территории Дальнего Востока в разработку мастер-планов включено 25 городов, среди которых есть как крупные региональные центры, так и малые городские поселения. Для юга ДВР проект разработан и утвержден для 17 городов, среди которых 5 малых (Северобайкальск, Тында, Свободный, Арсеньев и Большой Камень). Мероприятия по реализации положений мастер-планов разрабатывались с учетом общественного мнения, включая социальные, экономические и экологические вопросы. Ключевыми направлениями выступают работы по благоустройству общественно озелененных пространств. В проектах развития территории в некоторых городах предусматриваются работы по озеленению, например, комплексный проект в г. Се-



веробайкальск – «Вернуть городу Байкал». В него включены работы по озеленению и развитию парковых зон с грамотным сочетанием объектов застройки и коммуникаций. На территории г. Большой Камень предполагается создать парки и скверы в пешеходной доступности от жилых домов. Предлагаемые работы по благоустройству общественно озелененных пространств вновь акцентируют внимание на мероприятиях по созданию объектов «серой инфраструктуры», нередко упуская важность нормативов озеленения [30].

Заключение

Не вызывает сомнений актуальность мероприятий, направленных на улучшение условий проживания населения в городах. Индексы качества городской среды в малых городах юга Дальнего Востока России показывают ежегодный рост. Увеличивается число городов с благоприятной городской средой. Разрабатываются и утверждаются мероприятия по благоустройству городского пространства. Во всех малых городах юга ДВР отмечается увеличение значений критерия «озелененные пространства». По со-

стоянию на 2023 год озелененные пространства 23 малых городов считаются благоустроенными и комфортными.

Однако рейтинговый подход не позволяет в целом охватить все имеющиеся проблемы в отдельно взятом населенном пункте. Отмечается, что некоторые индикаторы не способны объективно отразить сложившиеся условия городской среды и не позволяют своевременно разрабатывать качественные стратегии для решения имеющихся проблем. Теряются грани между городами, озелененными «достаточно» и «недостаточно», общественными пространствами «привлекательными» и «непривлекательными» и так далее. Существуют субъективные индикаторы, оценивающие привлекательность озелененных пространств на основании мнения человека (социальные опросы и данные интернет-ресурсов). Мероприятия по благоустройству рассматриваемых городов ограничиваются так называемой «серой инфраструктурой» (создание тротуаров, велосипедных дорожек, установки МАФ и прочее). Работы по озеленению чаще всего ограничиваются созданием цветников, газонов и кронированием древесных и кустарниковых насаждений.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Аношкин АВ. Потенциально опасные природные процессы и явления юга Дальнего Востока. Безопасность в техносфере. 2018;7(4):49-54.
2. Банникова ЛА, Хриченков АВ, Бурцев АГ, Тиганова ИА, Третьякова АС, Груданова НЮ, Владыкина ВД. Принципы формирования подхода к благоустройству озелененных пространств Екатеринбурга. Лесной вестник. 2022;26(6):106-13.
3. Витюк ЕЮ. Программа развития оздоровительного потенциала озелененных общественных пространств города. Архитектон Известия вузов. 2022;78(2).
4. Воропаева АВ, Коростелева ЛЮ. Время нового взгляда на малые города. ПОИСК Политика Обществоведение Искусство Социология Культура. 2024;102(1):51-62.
5. Герцберг ЛЯ. Является ли мастер-план эффективным инструментом развития территорий в России? Academia Архитектура и строительство. 2023;(2):5-14.
6. Гребнева ОА, Лавыгина ОЛ. Исследование индекса качества городской среды для жилых микрорайонов г. Иркутска. Известия вузов Инвестиции Строительство Недвижимость. 2024;14(48):56-69.
7. Дебелая ИД, Морозова ГЮ. Анализ структуры сети особо охраняемых природных территорий городских округов на примере Дальневосточного федерального округа. Вестник Забайкальского государственного университета. 2024;30(1):18-27.
8. Дейнега ЕА, Жмылев ПЮ. Озеленение г. Дубна: общая оценка. Евразийский союз ученых. 2015;13(4-10):14-6.
9. Ерзин ИВ, Разумовский ЮВ. О функциях системы озелененных и природных территорий: терминология и классификация. Лесной вестник. 2018;22(4):59-67.
10. Жучков ДВ, Фетисов ДМ. Оценка индикаторов устойчивого развития города Биробиджана: озелененные пространства. Региональные проблемы. 2023;26(2):23-36.
11. Жучков ДВ, Фетисов ДМ. Оценка современного состояния растительного покрова г. Облучье по мультиспектральным данным. Региональные проблемы. 2024;27(1):112-24.
12. Жучков ДВ, Фетисов ДМ, Макаренко ВП. Функции зеленых насаждений городов в обеспечении целей устойчивого развития. Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2023;51(2):38-60.

13. Злобин ДВ. Формирование зеленой инфраструктуры города. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024;782(2):121-35.
14. Калманова ВБ. Анализ формирования зеленого каркаса в планировочной структуре г. Биробиджана. Региональные проблемы. 2019;22(3):70-7.
15. Калманова ВБ. Выбор и обоснование показателей экологического состояния дендрофлоры в условиях городской среды. Региональные проблемы. 2014;17(2):65-70.
16. Калманова ВБ. Город как урбогеосистема. Региональные проблемы. 2009;(12):26-8.
17. Калманова ВБ. Открытые пространства в структуре урбанизированных территорий (на примере г. Биробиджана). Региональные проблемы. 2016;19(2):54-9.
18. Калманова ВБ. Открытые пространства городов юга Дальнего Востока как перспективные объекты стратегического планирования. В кн.: Город и его окружение: современные вызовы и перспективные пути развития. Москва: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; 2024. С. 279-87.
19. Калманова ВБ. Экологическое состояние дендрофлоры как показатель качества городской среды (на примере г. Биробиджана). Региональные проблемы. 2013;16(1):79-86.
20. Калманова ВБ. Экологические особенности функционально-планировочной структуры средних и малых городов юга Дальнего Востока (на примере г. Биробиджана). ИнтерКарто ИнтерГИС. 2016;22(2):273-86.
21. Кирьянова ЛВ, Атакишиева ГР. Регрессионный анализ озеленения городских населенных пунктов России. Экономика и предпринимательство. 2023;160(11):688-91.
22. Климанова ОА, Колбовский ЕЮ, Илларионова ОА. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития. Вестник Санкт-Петербургского университета Науки о земле. 2018;63(2):127-46.
23. Макаренко ВП, Фетисов ДМ, Жучков ДВ. Изучение растительного покрова малых и средних городов России: современное состояние. Региональные проблемы. 2022;25(1):3-15.
24. Мещерякова НА. Возможности совершенствования механизма повышения качества городской среды. Инновации и инвестиции. 2024;(2):398-401.
25. Мингалева ТА, Горячев АА, Мингалева ЕИ, Мингалев АИ. Социальные и экологические функции общественных парков малого города в условиях Севера (на примере г. Апатиты Мурманской области). Труды Кольского научного центра РАН. 2020;11(8):179-95.
26. Мирзеханова ЗГ. Экологический каркас территории: содержание, назначение, пути реализации. Проблемы региональной экологии. 2000;(4):42.
27. Морозова ГЮ. Анализ проблем озеленения современного города (на примере Хабаровска). Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2018;200(4):38-48.
28. Морозова ГЮ, Дебелая ИД. Зеленая инфраструктура как фактор обеспечения устойчивого развития Хабаровска. Экономика региона. 2018;14(2):562-74.
29. Морозова ГЮ, Нарбут НА, Бабуринов АА, Воронов БА, Скачков ВБ, Горнова МИ, Ахтямов МХ, Росликова ВИ. Концепция озеленения Хабаровска. Хабаровск: Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук; 2003.
30. Морозова ГЮ. Развитие парковых пространств как элемента планирования устойчивого города. Региональные проблемы. 2023;26(2):54-9.
31. Нарбут НА. Экологические показатели устойчивого развития. Региональные проблемы. 2022;25(3):51-3.
32. Ратьковская ТГ. Сибирские и дальневосточные города в общероссийском индексе качества городской среды. ЭКО. 2021;569(11):157-75.
33. Ревич БА. Планирование городских территорий и здоровье населения: аналитический обзор. Анализ риска здоровью. 2022;(1):157-69.
34. Третьякова АС, Баранова ОГ, Сенатор СА, Панасенко НН, Суткин АВ, Алихаджиев МХ. Урбанофлористика в России: современное состояние и перспективы. Turczaninowia. 2021;24(1):125-44.
35. Фетисов ДМ. Оценка рекреационного потенциала г. Биробиджана. Региональные проблемы. 2008;(9):69-74.
36. Фетисов ДМ, Комарова ТМ, Калинина ИВ. Типология сельско-городской местности юга Дальнего Востока России. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022;86(5):676-86.
37. Черных ВВ, Иванченко ВА. Анализ и направления совершенствования методики формирования индекса качества городской среды. Экономический вектор. 2021;25(2):128-37.
38. Черныш МФ, Маркин ВВ, Баймурзина ГР. Малые города России: новые вызовы, социальные проблемы и перспективы. Москва: Федеральный научно-исследовательский социологический центр Российской академии наук; 2021.

Общий список литературы/Reference List

1. Anoshkin AV. [Potentially dangerous natural processes and phenomena in the south of the Far East]. *Bezopasnost' v Tekhnosfere*. 2018;7(4):49-54. (In Russ.)
2. Bannikova LA, Khrichenkov AV, Burtsev AG, Tiganova IA, Tretyakova AS, Grudanov NYu, Vladykina VD. [Principles of developing an approach to landscaping of green spaces in Yekaterinburg]. *Lesnoy Vestnik Forestry Bulletin*. 2022;26(6):106-13. (In Russ.)
3. Vitiuk EYu. [The program for the development of the wellness potential of green public spaces of the city]. *Arkhitkton Izvestiya Vuzov*. 2022;78(2). (In Russ.)
4. Voropayeva AV, Korosteleva LYu. [It's time for a new look at small towns. POISK Politika Obschestvovedeniye Iskustvo Sotsiologiya Kultura]. 2024;102(1):51-62. (In Russ.)
5. Gertsberg LYa. [Is the master plan an effective tool for the development of territories in Russia?]. *Academia Arkhitektura i Stroitelstvo*. 2023;(2):5-14. (In Russ.)
6. Grebneva OA, Lavygina OL. [A study of the urban environment quality index for residential neighborhoods in Irkutsk]. *Izvestiya Vuzov Investitsii Stroitelstvo Nedvizhimost*. 2024;14(48):56-69. (In Russ.)
7. Debelaya ID, Morozova GYu. [Analysis of the structure of the network of protected natural territories of urban districts exemplified with the Far Eastern Federal District]. *Vestnik Zabaykalskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2024;30(1):18-27. (In Russ.)
8. Deynega EA, Zhmylev PYu. [Landscaping of Dubna: general assessment]. *Evrasiyskiy Soyuz Uchonykh*. 2015; 13(4-10):14-6. (In Russ.)
9. Yerzin IV, Razumovskiy YuV. [On the functions of the system of green and natural areas: terminology and classification]. *Lesnoy Vestnik Forestry Bulletin*. 2018;22(4):59-67. (In Russ.)
10. Zhuchkov DV, Fetisov DM. [Assessment of indicators of sustainable development of the city of Birobidzhan: green spaces]. *Regionalnye Problemy*. 2023;26(2):23-36. (In Russ.)
11. Zhuchkov DV, Fetisov DM. [Assessment of the current state of the vegetation cover of the city of Obluchye using multispectral data]. *Regionalnye Problemy*. 2024;27(1):112-24. (In Russ.)
12. Zhuchkov DV, Fetisov DM, Makarenko VP. [The functions of urban green spaces in ensuring sustainable development goals]. *Vestnik Priamurskogo Gosudarstvennogo Universiteta im Sholom-Aleykhema*. 2023;51(2):38-60. (In Russ.)
13. Zlobin DV. [Formation of the green infrastructure of the city]. *Stroitelstvo*. 024;782(2):121-35. (In Russ.)
14. Kalmanova VB. [Analysis of the formation of a green framework in the planning structure of Birobidzhan]. *Regionalnye Problemy*. 2019;22(3):70-7. (In Russ.)
15. Kalmanova VB. [Selection and justification of indicators of the ecological state of dendroflora in an urban environment]. *Regionalnye Problemy*. 2014;17(2):65-70. (In Russ.)
16. Kalmanova VB. [The city as an urban geosystem]. *Regionalnye Problemy*. 2009;(12):26-8. (In Russ.)
17. Kalmanova VB. [Open spaces in the structure of urbanized territories (using the example of Birobidzhan)]. *Regionalnye Problemy*. 2016;19(2):54-9. (In Russ.)
18. Kalmanova VB. [Open spaces of cities in the South of the Far East as promising objects of strategic planning]. In: *Gorod i Yego Okruzheniye Sovremennye Vyzovy i Perspektivnye Puti Razvitiya*. Moscow: MGU. 2024; P. 279-87. (In Russ.)
19. Kalmanova VB. [The ecological state of the dendroflora as an indicator of the quality of the urban environment (on the example of Birobidzhan)]. *Regionalnye Problemy*. 2013;16(1):79-86. (In Russ.)
20. Kalmanova VB. [Ecological features of the functional planning structure of medium and small towns in the south of the Far East (on the example of Birobidzhan)]. *InterKarto InterGIS*. 2016;22(2):273-86. (In Russ.)
21. Kiryanova LV, Atakishieva GR. [Regression analysis of greening of urban settlements in Russia]. *Ekonomika i Predprinimatelstvo*. 2023;160(11):688-91. (In Russ.)
22. Klimanova OA, Kolbovskiy EYu, Illarionova OA. [The ecological framework of the largest cities of the Russian Federation: modern structure, territorial planning and development problems]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta Nauki o Zemle*. 2018;63(2):127-46. (In Russ.)
23. Makarenko VP, Fetisov DM, Zhuchkov DV. [Studying the vegetation cover of small and medium-sized cities in Russia: current status]. *Regionalnye Problemy*. 2022;25(1):3-15. (In Russ.)
24. Meshcheriakova NA. [The possibilities of refining the mechanism for improving the quality of the urban environment]. *Innovatsii i Investitsii*. 2024;(2):398-401. (In Russ.)
25. Mingaleva TA, Goriachev AA, Mingaleva EI, Mingalev AI. [Social and environmental functions of small town public parks in the conditions of the North (on the example of Apatity, Murmansk

- region)]. Trudy Kolskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2020;11(8):179-95. (In Russ.)
26. Mirzekhanova ZG. [Ecological framework of the territory: content, purpose, ways of implementation]. Problemy Regionalnoy Ekologii. 2000;(4):42. (In Russ.)
 27. Morozova GYu. [Analysis of the problems of greening a modern city (on the example of Khabarovsk)]. Vestnik Dalnevostochnogo Otdeleniya Rossiyskoy Akademii Nauk. 2018; 200(4):38-48. (In Russ.)
 28. Morozova GYu., Debelaya ID. [Green infrastructure as a factor in ensuring the sustainable development of Khabarovsk]. Ekonomika Regiona. 2018;14(2):562-74. (In Russ.)
 29. Morozova GYu, Narbut NA, Baburin AA, Voronov BA, Skachkov VB, Gornova MI, Akhtyamov MKh, Roslikova VI. Kontseptsiya Ozeleneniya Khabarovska. Khabarovsk: IVEP FEB RAS; 2003. (In Russ.)
 30. Morozova GYu. [Development of park spaces as an element of sustainable city planning]. Regionalnye Problemy. 2023;26(2):54-9. (In Russ.)
 31. Narbut NA. [Environmental indicators of sustainable development]. Regionalnye Problemy. 2022;25(3):51-3. (In Russ.)
 32. Ratkovskaya TG. [Siberian and Far Eastern cities in the All-Russian Urban Environment]. EKO. 2021;569(11):157-75. (In Russ.)
 33. Revich BA. [The importance of green spaces for protecting the health of urban populations]. Analiz Riska Zdorovyu. 2023;(2):168-85. (In Russ.)
 34. Tretiakova AS, Baranova OG, Senator SA, Panasenkov NN, Sutkin AV, Alikhadzhiyev MKh. [Urban floristics in Russia: current state and prospects]. Turczaninowia. 2021;24(1):125-44. (In Russ.)
 35. Fetisov DM. Assessment of the recreational potential of Birobidzhan. Regionalnye Problemy. 2008;(9):69-74. (In Russ.)
 36. Fetisov DM, Komarova TM, Kalinina IV. [Typology of rural-urban areas in the south of the Russian Far East]. Izvestiya Rossiyskoj Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2022;86(5):676-86. (In Russ.)
 37. Chernykh VV, Ivanchenko VA. [Analysis and directions of improvement of the methodology for the formation of the urban environment quality index]. Ekonomicheskij Vektor. 2021;25(2):128-37. (In Russ.)
 38. Chernysh MF, Markin VV, Baymurzina GR. Malye Goroda Rossii Novye Vyzovy Sotsialnye Problemy i Perspektivy. Moscow: FSRSC RAS; 2021.
 39. Forman RTT. Urban Ecology: Science of Cities. Cambridge University Press; 2014.



СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ГУМАТОВ И РИЗОБАКТЕРИЙ НА РОСТ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ САЖЕНЦЕВ СПИРЕИ ЯПОНСКОЙ (*SPIRAEA JAPONICA*, L.F.)

Р.С. Иванов^{1*}, М.Д. Тимергалин¹, С.П. Четвериков¹,
Н.А. Рязанова², З.Х. Шигапов², А.М. Назаров³,
Г.Р. Кудоярова¹

¹ Уфимский институт биологии и ² Южно-Уральский ботанический сад-институт
Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия;

³ Уфимский государственный нефтяной технологический университет, Уфа, Россия

* Эл. почта: ivanovirs@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.03.2025; принята к печати 07.04.2025

Кустарник спирея японская (*Spiraea japonica*, L.F.) широко используется в городском озеленении. Для улучшения качества саженцев применяют препараты гуминовых веществ и рост-стимулирующих бактерий. Гуминовые вещества осуществляют транспорт, защиту бактерий и облегчают им колонизацию корней, а также стимулируют высвобождение органических кислот из корней растений, которые являются источником питания для этих бактерий. Ризобактерии, стимулирующие рост растений, со своей стороны повышают доступность питательных веществ, выработку фитогормонов, развитие побегов и корней и могут помочь растениям противостоять биотическим и абиотическим стрессам. В настоящей работе был показан кумулятивный положительный эффект применения препаратов гуминовых веществ и штаммов ризосферных рост-стимулирующих бактерий *Pseudomonas chlororaphis* 4CH и *Pseudomonas protegens* DA1.2 на рост и состояние саженцев спиреи. В частности, растения после комбинированных обработок гуматами и бактериями имели наибольшую массу побега и корня, повышенное содержание хлорофилла и индекс азотного баланса. Стимулирующее действие бактерий связано, по данным литературы, с их способностью продуцировать ауксины, а рост-стимулирующее действие гуминовых веществ — с возможным присутствием в их составе ауксинподобных веществ. Показана перспективность совместного использования бактериальных препаратов с гуматами для повышения жизнестойкости и скорости роста саженцев спиреи японской и, возможно, других декоративных кустарников. **Ключевые слова:** спирея японская (*Spiraea japonica*, L.F.); гуминовые вещества; ризобактерии; *Pseudomonas chlororaphis* 4CH; *Pseudomonas protegens* DA1.2.

JOINT EFFECTS OF HUMATES AND RHIZOBACTERIA ON THE GROWTH AND VIABILITY OF JAPANESE SPIRAEA (*SPIRAEA JAPONICA*, L.F.) SEEDLINGS

R.S. Ivanov^{1*}, M.D. Timerlagin¹, S.P. Chetverikov¹, N.A. Riazanova², Z.H. Shigapov²,
A.M. Nazarov³, G.D. Kudoyarova¹

¹ Ufa Institute of Biology and ² South-Urals Botanical Garden Institute of Ufa Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, The Russian Federation; ³ Ufa State Oil Technology University, Ufa,
the Russian Federation

Email: ivanovirs@mail.ru

The shrubs Japanese spiraea (*Spiraea japonica*, L.F.) is widely used in urban gardening. To improve the quality of seedlings, humates and growth-stimulating bacteria preparations are often applied. Humates enhance bacterial transport, bacterial safety, and colonization of roots by bacteria and stimulate organic acid release from roots, the acids serving as nutrients for bacteria. Rhizobacteria stimulate plant development by facilitating nutrient availability, phytohormone production, and roots and branches sprouting and by enhancing plant ability to tolerate biotic and abiotic stresses. We have demonstrated a cumulative effect of applying a humate preparation combined with growth stimulatory rhizobacteria strains *Pseudomonas chlororaphis* 4CH and *Pseudomonas protegens* DA1.2 on the condition and growth of spiraea seedlings. In particular, the plants subjected to the joint effect of both agents exhibit the highest shoot and root sizes, chlorophyll content, and nitrogen balance index. The stimulatory effect of bacteria is associated, according to literature, with their ability to produce auxins, and the growth-stimulating effect of humic substances is associated with the possible presence of auxin-like substances in their composition. The combined use of humates and rhizobacteria preparations is a promising approach to improving the viability and growth of Japanese spiraea and probably other decorative shrubs.

Keywords: Japanese spiraea (*Spiraea japonica*, L.F.), humates, rhizobacteria, *Pseudomonas chlororaphis* 4CH; *Pseudomonas protegens* DA1.2.

Введение

Для озеленения городов необходимо достаточное количество и качество саженцев. Использование биостимуляторов является перспективным подходом для повышения количества и качества посадочного материала. Среди биостимуляторов, применяемых для улучшения качества саженцев, чаще других упоминаются препараты гуминовых веществ (продуктов разложения органического вещества, извлеченного из бурых углей, торфа и других источников) [1, 16] и рост-стимулирующих бактерий [11, 36]. Гуминовые вещества (ГВ) относительно устойчивы к микробной активности, действуют как переносчик микроорганизмов в своих гидрофобных доменах [15]. Кроме того, ГВ способны стимулировать высвобождение органических кислот из корней растений. Эти соединения являются источником питания для рост-стимулирующих бактерий, что может усиливать рост корней растений и их колонизацию микроорганизмами, создавая ряд преимуществ как для здоровья растений, так и для почвы [26, 31]. Положительное влияние ГВ на метаболизм растений проявляется в функционировании клеточных мембран и стимуляции поглощения питательных веществ [25, 40]. ГВ также влияют на рост растений как гормон-подобные вещества [9, 24].

Ризобактерии, стимулирующие рост растений, повышают доступность питательных веществ, выработку фитогормонов, развитие побегов и корней и могут помочь растениям противостоять биотическим и абиотическим стрессам [14]. Эти бактерии могут способствовать росту растений, используя собственный метаболизм (растворяя фосфаты, вырабатывая гормоны), или прямо влиять на метаболизм растений, увеличивая поглощение воды и минералов [33, 42]. Часто препараты ГВ [27, 45] и бактерий [6, 8] используют в растениеводстве на посевах травянистых растений, однако в большинстве случаев гуматы и бактерии применялись по отдельности. Вместе с тем, немногочисленные исследования показали, что сочетание препаратов бактерий и гуматов позволяет получить более выраженный рост-стимулирующий эффект как на травянистых [15, 31], так и на древесных растениях [28, 29], чем при обработке каждым из препаратов по отдельности.

Целью нашего исследования является изучение эффекта применения препаратов гуминовых веществ, штаммов бактерий *Pseudomonas chlororaphis* 4CH и *Pseudomonas protegens* DA1.2, а также их сочетания на рост и развитие саженцев листопадных декоративных кустарников спиреи японской (*Spiraea japonica*, L.F.). Ранее нами было изучено влияние бактерий этих штаммов и их сочетания с гуматами на рост саженцев деревьев [2] и была выявлена зависимость действия этих биостимуляторов от вида растений [29]. В дан-

ной работе впервые в качестве объекта были изучены кустарниковые растения.

Материалы и методы исследований

Бактериальные штаммы и среды для их культивирования. В работе использовали два штамма грамотрицательных бактерий из коллекции микроорганизмов Уфимского института биологии, выделенные из природных источников: *Pseudomonas protegens* DA1.2 (депонирован во Всероссийской коллекции микроорганизмов В-3542D), описан в статье Четверикова и др. [12] и *Pseudomonas chlororaphis* 4CH (депонирован в коллекции микроорганизмов УИБ-57 [3]). Эти штаммы бактерий были выбраны для обработки саженцев спиреи японской (*Spiraea japonica*, L.F.), поскольку в предыдущих опытах их сочетание с гуматами стимулировало рост саженцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), тополя (*Populus italica pyralis* × *P. nigra*), липы крупнолистной (*Tilia platyphyllos* Scop.) и каштана конского (*Aesculus hippocastanum* L.) [29]. Бактерии культивировали в колбах Эрленмейера на среде Кинга Б (2% пептона, 1% глицерина, 0,15% K_2HPO_4 , 0,15% $MgSO_4 \cdot 7H_2O$) на шейкере Innova 40R (Нью-Брансуик, Нью-Джерси, США) при 160 об/мин в течение 48 ч при 28 °C [18]. Количество клеток в культурах измеряли нанесением серийных разведений на среду Кинга Б с агар-агаром (15 г/л) и последующим подсчетом количества колониеобразующих единиц (КОЕ) [18]. Бактериальную культуру разбавляли стерильной водой и получали раствор для обработки растений.

Извлечение гуминовых веществ. В качестве источника ГВ веществ использовался бурый уголь (Тюльганское месторождение, Оренбургская обл., РФ). Уголь смешивали с 0,1 М КОН в соотношении 1:10 и ГВ экстрагировали в течение двух часов при перемешивании при 1500 об/мин. Осадок удаляли центрифугированием при 12000 об/мин в течение 10 мин [18].

Условия роста растений, обработка и измерения. В нашем исследовании была применена стандартная технология выращивания саженцев деревьев в питомниках, однако совместная обработка саженцев кустарников бактериями и гуматами использовалась впервые. Мы адаптировали методику, ранее успешно применявшуюся на пшенице [18]. Эксперименты проводились на территории Южно-Уральского Ботанического сада-института УФИЦ РАН. Для опыта использовали черенки сорта «Gold mound» спиреи японской (*Spiraea japonica*, L.F.) – листопадных декоративных кустарников семейства Розовые. Этот сорт является популярным благодаря своей круглогодичной декоративности, стилистической гибкости, неприхотливости и высокой выносливости, что делает его широко востребованным в городском озеленении. Размножение проводили полуодревесневшими

черенками. В первой декаде июля срезали однолетние побеги, толщиной 3–5 мм. Из них нарезами черенки длиной 10–15 см. Черенки высаживали в грунт на 2/3 их длины под углом 45° к поверхности земли. Укоренение производили в парниках с туманообразующей установкой. В почвенную смесь (чернозем, песок, перегной в соотношении 3:1:1) в горшках объемом 1 л с черенками вносили по 100 мл бактериальной взвеси ($(4 \pm 0,5) \times 10^9$ КОЕ/мл) и ГВ (2 г/л) по отдельности или в комбинации раз в месяц. Контрольные растения обрабатывали таким же количеством воды без добавок. Растения поливали регулярно. Через два месяца устьичную проводимость измеряли с помощью порометра/флуориметра LI-600 (LI-COR Biosciences, Линкольн, Небраска, США). Определяли содержание хлорофилла и флавоноидов в листьях и проводили расчет индекса азотного баланса (NBI) с помощью прибора DUALEX SCIENTIFIC+ (FORCE-A, Париж, Франция). Через три месяца после посадки саженцев измеряли сырую массу побегов и корней.

Определение содержания ауксина в культуральной среде. Концентрацию индолилуксусной кислоты (ИУК), действующей на растения как ауксин, измеряли в бактериальных средах на второй день культивирования, следуя методике Veselov et al. [41]. Для этого 1 мл бактериальной культуральной среды разбавляли дистиллированной водой до 6 мл и подкисляли с помощью HCl до pH 2,5 для экстракции ИУК диэтиловым эфиром. Затем ИУК извлекали из диэтилового эфира в раствор NaHCO₃ и повторно экстрагировали диэтиловым эфиром из подкисленной водной фазы. Анализ ИУК проводился иммуноферментным методом, используя специфические антитела против ИУК, как описано в Arkhipova et al. [7]. Надежность метода обеспечивается специфичностью антител к ИУК и эффективностью экстракции, позволяющей

минимизировать количество примесей за счет уменьшения объема экстрагентов на каждом этапе разделения растворителей. Эффективность очистки ИУК перед иммуноферментным анализом подтверждена хроматографией: пики иммунореактивности совпадали только со стандартами ИУК.

Статистика. Данные были обработаны с использованием программы Statistica версии 10 (Statsoft, Москва, Россия) и представлены как средние значения $\pm$ стандартная ошибка. Статистическая значимость различий между средними была оценена с помощью дисперсионного анализа при использовании критерия Дункана. Значимыми считали различия при ($p < 0,05$). На графиках средние значения, которые статистически различаются, обозначены разными буквами. Число повторений (n) указано в подписях к рисункам.

Работа проводилась с использованием оборудования центра коллективного пользования УФИЦ РАН «Агидель».

Результаты и обсуждение

Результаты определения концентрации ИУК в культуральной жидкости бактерий *P. protegens* DA1.2 и *P. chlororaphis* 4CH (868 ± 52 и 842 ± 47 нг/мл соответственно) свидетельствуют об одинаковой способности синтезировать этот ауксин изученными штаммами.

Как видно на рис. 1, все виды обработок привели к заметному увеличению размера побегов и корней при сравнении с контролем.

Масса побега и корня также увеличилась при всех видах обработок (рис. 2).

У растений после комбинированных обработок с использованием DA1.2+ГВ и 4CH+ГВ массы побега (10 ± 1 и $11,0 \pm 0,3$ г соответственно) и корня ($8,0 \pm 0,7$ и $8,0 \pm 0,3$ г) были наибольшими, у растений из контрольной группы – наименьшими ($3,0 \pm 0,9$ и $2,0 \pm 0,4$ г),



Рис. 1. Фото трехмесячных саженцев спиреи японской после обработок суспензией бактерий *P. chlororaphis* 4CH, *P. protegens* DA1.2 и гуминовыми веществами (ГВ) отдельно и в комбинациях с бактериями (4CH + ГВ и DA1.2 + ГВ)

у обработанных по отдельности ГВ ($7,0 \pm 1,2$ и $6,0 \pm 0,6$ г) или DA1.2. ($8,0 \pm 1,1$ и $6,0 \pm 0,5$ г) и 4СН (6 ± 1 и $4,0 \pm 0,3$ г) – промежуточными. Растения, обработанные биостимуляторами по отдельности, не различались между собой по массе побега. Прибавка массы корней в сравнении с контролем была минимальной у растений, обработанных штаммом 4СН.

Ранее было показано, что в условиях засухи рост-стимулирующие бактерии приводили в сочетании с гуминовыми веществами к более сильному накоплению корневой массы, чем по отдельности [4, 38]. Стимулирующее действие бактерий на рост корней объясняют их способностью продуцировать ауксины [20], а рост-стимулирующее действие гуминовых веществ – присутствием в их составе ауксинподобных веществ [39]. Аргументом в пользу роли ауксинов в действии препаратов ГВ и бактерий на рост корней является хорошо известная способность этих гормонов влиять на ветвление корневой системы [23]. Более высокую эффективность комбинированного препарата бактерии и ГВ по сравнению с применением каждого из них по отдельности можно объяснить не только простым повышением уровня ауксинов в результате суммирования бактериальных и содержащихся в составе ГВ гормонов, но и способностью ГВ стимулировать экссудацию корнями органических веществ, являющихся субстратом для роста бактерий, а также продукции ими ауксинов из выделяемого корнями триптофана [19]. Также ГВ способны повышать уровень колонизации корней бактериями, модифицируя структуру клеточных стенок с помощью АТФ-азы, активность которой возрастает под влиянием ГВ [31].

Представляет интерес тот факт, что при обработке растений спиреи бактерии штамма 4СН в меньшей

степени способствовала активации роста корней, чем бактерии штамма DA1.2, в то время как *in vitro* эти штаммы продуцировали одинаковое количество ауксинов. Ранее было показано, что влияние бактерий на содержание ауксинов в растениях и активацию роста корней зависит не только от их потенциальной способности продуцировать ауксины *in vitro*, но и от способности колонизировать корни растений [21]. Результаты оценки влияния изученных нами штаммов бактерий на рост корней зависели от вида растений: при обработке саженцев сосны большая способность стимулировать рост корней была зарегистрирована у штамма DA1.2, а в случае растений каштана конского – у штамма 4СН [29]. Таким образом, можно предполагать, что более низкая способность штамма 4СН стимулировать рост корней могла быть обусловлена пониженной колонизацией корней спиреи бактериями этого штамма.

Измерение устьичной проводимости (рис. 3) показало, что все виды обработок увеличивали этот показатель в той или иной степени, что должно было привести к увеличению потерь воды с транспирацией и в то же время способствовать повышению газообмена и фотосинтеза. В наибольшей степени устьичная проводимость возрастала под влиянием обработки растений штаммом 4СН.

Стимулирующее влияние ГВ на рост побега объясняют увеличением устьичной проводимости под влиянием ауксинов, содержащихся в их составе [34]. Эти гормоны могут влиять на состояние устьиц через изменение концентрации кальция в цитоплазме клеток при участии циклического гуанозинмонофосфата в качестве вторичного мессенджера [13]. Высокая устьичная проводимость, зарегистрированная у ра-

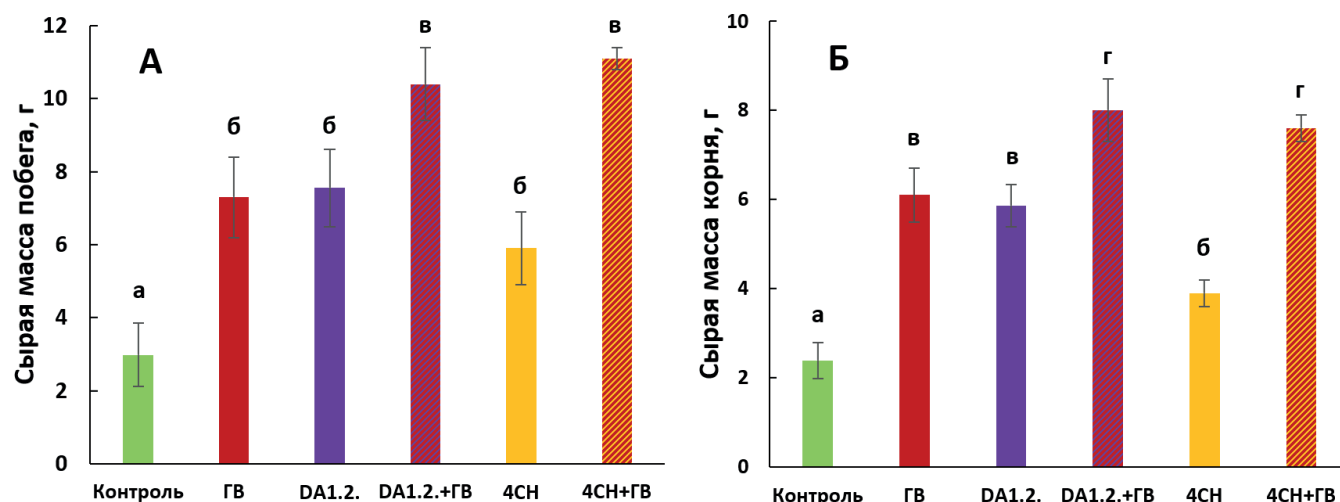


Рис. 2. Сырая масса побега (А) и корня (Б) трехмесячных саженцев спиреи японской после обработок суспензией бактерий *P. chlororaphis* 4СН и *P. protegens* DA1.2 и гуминовыми веществами (ГВ) отдельно и в комбинациях с бактериями (4СН + ГВ и DA1.2 + ГВ). Значимо различающиеся данные помечены разными буквами; $n = 10$

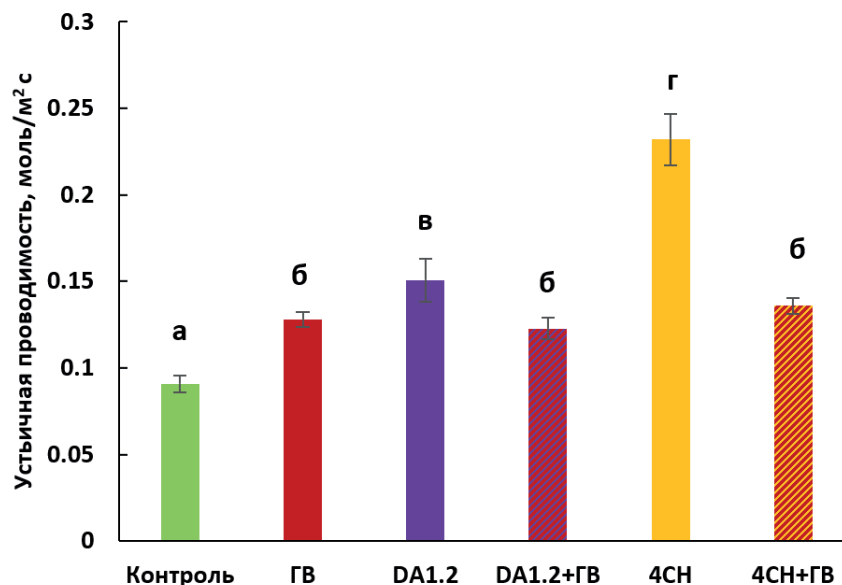


Рис. 3. Устьичная проводимость трехмесячных саженцев спиреи японской после обработок суспензией бактерий *P. chlororaphis* 4СН и *P. protegens* DA1.2 и гуминовыми веществами (ГВ) отдельно и в комбинациях с бактериями (4СН + ГВ и DA1.2 + ГВ). Значимо различающиеся данные помечены разными буквами; $n = 20$

стений, обработанных штаммом 4СН, косвенно указывает на высокую концентрацию ауксинов в побегах этих растений, в то время как их концентрация в корнях, видимо, была пониженной. Ранее нами была показана способность бактерий влиять на распределение гормонов между побегом и корнем [7]. Распределение гормонов между органами и тканями растений зависит от активности переносчиков [32], а бактерии способны влиять на экспрессию генов, кодирующих переносчики ауксинов [35]. В дальнейшей работе важно оценить как содержание ауксинов в побегах и корнях древесных растений, обработанных бактериями и ГВ, так и влияние биостимуляторов на экспрессию и активность переносчиков гормонов.

Таким образом, повышение устьичной проводимости под влиянием изученных нами биостимуляторов вполне объяснимо способностью использованных бактерий синтезировать образование ауксинов и известным из литературы присутствием ауксинов в составе ГВ [39]. Вместе с тем, требует объяснения тот факт, что обработка штаммом 4СН, который в наибольшей степени влиял на устьичную проводимость сеянцев спиреи, не приводила к большей стимуляции роста побега при сравнении с растениями, обработанными по отдельности штаммом DA1.2 и ГВ. Для поддержания устьичной проводимости и роста растений повышение транспирации в результате увеличения устьичной проводимости должно быть скомпенсировано возрастанием притока воды из корней за счет активации их роста. Как отмечалось выше, прибавка в весе корней у растений, обработанных штаммом 4СН,

была минимальной и возможно недостаточной для балансирования возросшей транспирации адекватным притоком воды. В дальнейшей работе важно учитывать влияние обработок биостимуляторами на оводненность тканей побега для того, чтобы более ясно понять механизм их рост-стимулирующего действия.

Оценка уровня хлорофиллов не выявила повышения их содержания под влиянием как бактерий, так и ГВ при их раздельном применении (рис. 4). Тем не менее, увеличение массы побегов под влиянием этих обработок свидетельствует о том, что продукция пигментов в расчете на целое растение должно было возрастать. Бактерии в сочетании с гуминовыми веществами значительно повышали суммарный уровень хлорофилла (рис. 4). Поскольку в состав хлорофиллов входит азот, предпосылкой для поддержания уровня этих пигментов является увеличение доступности азота для растений [43]. Таким образом, данные по содержанию хлорофиллов у растений свидетельствуют о повышении доступности этого элемента под влиянием биостимуляторов.

Содержание флавоноидов снижалось под влиянием обработки растений штаммом 4СН как отдельно, так и в сочетании с ГВ, а также при комбинации штамма DA1.2 и ГВ (рис. 5). Известно, что содержание флавоноидов возрастает при дефиците азота и фосфора [37]. Поэтому снижение их уровня можно рассматривать как индикатор повышенной обеспеченности растений этими элементами. Бактерии повышают содержание азота в почве благодаря из способности фиксировать азот [5], и такая способность была заре-

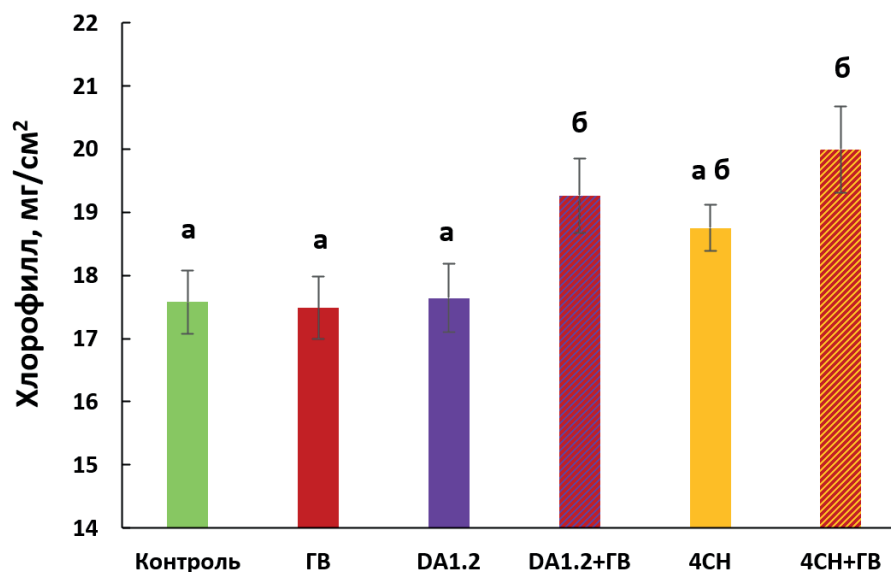


Рис. 4. Содержание хлорофилла в листьях спиреи японской через 2 месяца после посадки и обработок суспензией бактерий *P. chlororaphis* 4СН и *P. protegens* DA1.2 и гуминовыми веществами (ГВ) отдельно и в комбинациях с бактериями (4СН + ГВ и DA1.2 + ГВ). Значимо различающиеся данные помечены разными буквами; $n = 30$

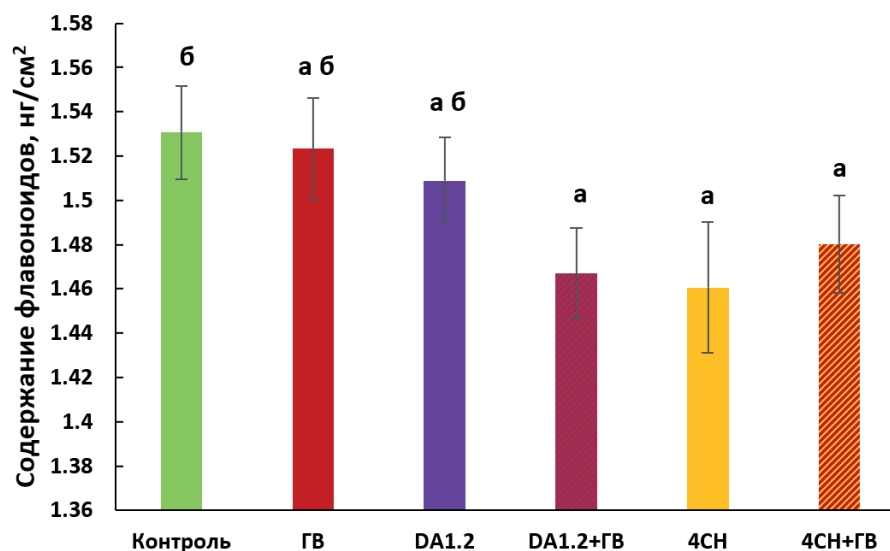


Рис. 5. Содержание флавоноидов в листьях спиреи японской через 2 месяца после посадки и обработок суспензией бактерий *P. chlororaphis* 4СН и *P. protegens* DA1.2 и гуминовыми веществами (ГВ), отдельно и в комбинациях с бактериями (4СН + ГВ и DA1.2 + ГВ). Значимо различающиеся данные помечены разными буквами; $n = 30$

гистрирована у штаммов бактерий, которые были использованы для обработки растений спиреи [28]. ГВ повышают доступность азота для растений, стимулируя рост азотфиксирующих бактерий [17], которые присутствуют в почве, обработанной гуминовыми веществами. Также известна способность бактерий солиubilизировать фосфаты [19], и это их свойство

было выявлено у штаммов бактерий, которыми обрабатывали растения спиреи [28]. ГВ также проявляют это свойство благодаря их способности активировать транспортные АТФазы, стимулируя выброс протонов из клеток корней, подкисляющих почвенный раствор, повышая тем самым растворимость содержащихся в почве фосфатов [30].

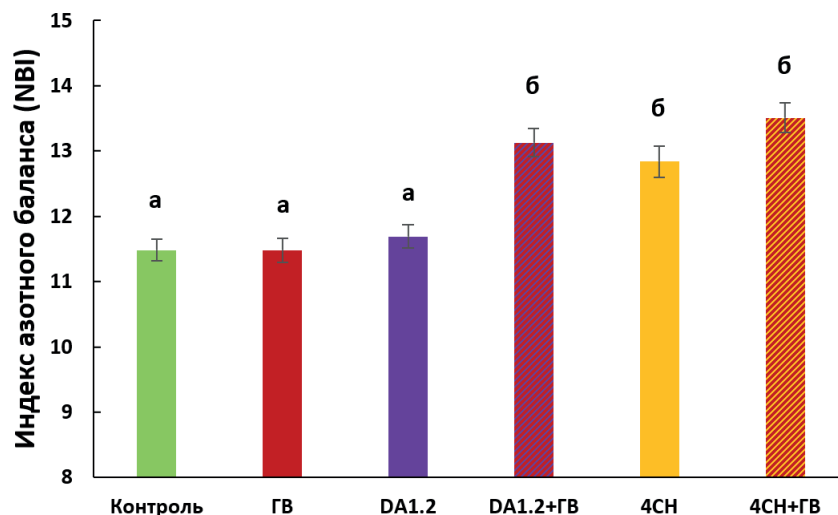


Рис. 6. Индекс азотного баланса (NBI) в листьях спиреи японской через 2 месяца после посадки и обработок суспензиями бактерий *P. chlororaphis* 4СН и *P. protegens* DA1.2 и гуминовыми веществами (ГВ) отдельно и в комбинациях с бактериями (4СН + ГВ и DA1.2 + ГВ). Значимо различающиеся данные помечены разными буквами; $n = 30$

Предположение о повышении обеспеченности растений азотом, которое проявлялось в поддержании уровня хлорофиллов на фоне активации роста растений и в повышении их уровня при обработке растений сочетанием бактерий и ГВ, подтверждалось при оценке индекса азотного баланса (рис. 6), который возрос под влиянием штамма 4СН как отдельно, так и в сочетании с ГВ, а также при комбинации штамма DA1.2 и ГВ.

Выводы

Исследование показало, что бактерии и гуминовые вещества оказывали значительное влияние на рост и развитие спиреи японской. Все виды обработок способствовали увеличению массы побегов и корней по сравнению с контрольной группой: *P. chlororaphis* 4СН, *P. protegens* DA1.2, гуминовые вещества – в 2 и более раза; а при совместных обработках бакте-

риями и гуминовыми веществами (ГВ): 4СН+ГВ и DA1.2+ГВ – примерно в 3,5 раза, что свидетельствует о синергетическом действии этих компонентов. Все препараты, действующие по отдельности и совместно, увеличивали устьичную проводимость, а комбинации бактерий и гуминовых веществ значительно повышали уровень хлорофиллов. Штамм 4СН и совместное применение обоих штаммов с гуматами улучшали азотное питание растений, снижали содержание флавоноидов. Оба штамма бактерий в сочетании с гуматами были в равной степени эффективными. Таким образом, применение комбинированных сочетаний бактерий совместно с гуминовыми веществами обладает высоким потенциалом для улучшения выживаемости и ускорения роста саженцев.

Исследования поддержаны Российским Научным Фондом (грант № 25-26-00171).

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Горбунова СВ, Сеньков АО, Файзулин ДХ. Опыт применения гуминового препарата при выращивании сеянцев хвойных пород с закрытой корневой системой в условиях Архангельской области. Сибирский лесной журнал. 2022; 1:41-51. <http://doi.org/10.15372/SJFS20220104>.
2. Назаров АМ, Туктарова ИО, Четвериков СП, Иванов РС, Тимергалин М, Рязанова НА, Кудрярова ГР. Препараты на основе бактерий и гуматов для лесовосстановления и повышения депонирования углерода древесными растениями. Биосфера. 2023;15(4):308-16. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i4.866>.
3. Тимергалин МД, Феоктистова АВ, Рамеев ТВ, Бакаева МД, Стариков СН, Султангазин ЗР, Четвериков СП. Влияние ризосферных бактерий, способных к биосинтезу и/или де-

струкции фитогормонов, на ростовые характеристики и гормональный статус растений пшеницы в условиях дефицита воды. *Агрохимия*. 2024;9:51-7. <https://doi.org/10.31857/S0002188124090068>.

4. Феоктистова АВ, Тимергалин МД, Рамеев ТВ, Четвериков СП. Совместное воздействие штамма PGPB *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D и гуминовых веществ на рост, содержание фотосинтетических пигментов и фитогормонов в растениях пшеницы в условиях засухи. *Агрохимия*. 2023;9:28-36. <https://doi.org/10.31857/S0002188123090065>.

Общий список литературы/Reference List

1. Gorbunova SV, Sen'kov AO, Fajzulin DH. [The experience of using a humic preparation for growing coniferous ball-rooted seedlings in the conditions of Arkhangelsk oblast]. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal*. 2022;1:41-51. <http://doi.org/10.15372/SJFS20220104>. (In Russ.)
2. Nazarov AM, Tuktarova IO, Chetverikov SP, Ivanov RS, Timergalin M, Ryazanova NA, Kudoyarova GR. [Bacteria- and humate-based preparations for forest restoration and for enhancing carbon sequestration by trees]. *Biosfera*. 2023;15(4):308-16. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v15i4.866>. (In Russ.)
3. Timergalin MD, Feoktistova AV, Rameev TV, Bakaeva MD, Starikov SN, Sultangazin ZR, Chetverikov SP. [Effect of rhizospheric bacteria capable of biosynthesis and/or destruction of phytohormones on the growth characteristics and hormonal status of wheat plants in conditions of water scarcity]. *Agrokhimiya*. 2024;9:51-7. <https://doi.org/10.31857/S0002188124090068>. (In Russ.)
4. Feoktistova AV, Timergalin MD, Rameev TV, Chetverikov SP. [Combined effect of PGPR strains *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and humic substances on the growth, content of photosynthetic pigments and phytohormones in wheat plants in drought conditions]. *Agrokhimiya*. 2023;9:28-36. <https://doi.org/10.31857/S0002188123090065>. (In Russ.)
5. Aasfar A, Meftah Kadmiri I, Azaroual SE, Lemriss S, Mernissi NE, Bargaz A, Zeroual Y, Hilali A. Agronomic advantage of bacterial biological nitrogen fixation on wheat plant growth under contrasting nitrogen and phosphorus regimes. *Front Plant Sci*. 2024;15:1388775. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1388775>.
6. Arkhipova TN, Galimsyanova NF, Yu KL, Vysotskaya LB, Sidorova LV, Gabbasova IM, Melentiev AI, Kudoyarova GR. Effect of seed bacterization with plant growth-promoting bacteria on wheat productivity and phosphorus mobility in the rhizosphere. *Plant Soil Environ*. 2019;65(6):313-9. <https://doi.org/10.17221/752/2018-PSE>.
7. Arkhipova T, Martynenko E, Sharipova G, Kuzmina L, Ivanov I, Garipova M, Kudoyarova G. Effects of plant growth promoting rhizobacteria on the content of abscisic acid and salt resistance of wheat plants. *Plants*. 2020;9:1429. <https://doi.org/10.3390/plants9111429>.
8. Belimov AA, Dodd IC, Safronova VI, Dumova VA, Shaposhnikov AI, Ladatko AG, Davies WJ. Abscisic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth. *Plant Physiol Biochem*. 2014; 74: 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.032>.
9. Cahyo AN, Ardika R, Saputra J, Wijaya T. Acceleration on the growth of rubber planting materials by using foliar application of humic acid. *J Agric Sci*. 2014;36:112-9. <http://doi.org/10.17503/agrivita.v36i2.397>.
10. Calvo P, Nelson L, Kloepper JW. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 2014;383:30-41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
11. Chaiya L, Gavinlertvatana P, Teaumroong N, Pathomaree W, Chaiyasen A, Sungthong R, Lumyong S. Enhancing Teak (*Tectona grandis*) seedling growth by rhizosphere microbes: A sustainable way to optimize agroforestry. *Microorganisms*. 2021;9:1990. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091990>.
12. Chetverikov SP, Chetverikova DV, Bakaeva MD, Kenjieva AA, Starikov SN, Sultangazin ZR. A promising herbicide-resistant bacterial strain of *Pseudomonas protegens* for stimulation of the growth of agricultural cereal grains. *Appl Biochem Microbiol*. 2021;57:110-6. <https://doi.org/10.1134/S0003683821010051>.
13. Cousson A, Vavasour A. Putative involvement of cytosolic Ca₂C and GTP-binding proteins in cyclic-GMP-mediated induction of stomatal opening by auxin in *Commelina communis* L. *Planta*. 1998;206:308-14.
14. de Andrade LA, Santos CHB, Frezarin ET, Sales LR, Rigobelo EC. Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*. 2023;11(4):1088. <http://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>.
15. da Silva MSRA, dos Santos BdMS, da Silva CSRA, da Silva CSRA, Antunes LFS, dos Santos RM, Santos CHB, Rigobelo EC. Humic substances in combination with plant growth-promoting bacteria as an alternative for sustainable agriculture. *Front Microbiol*. 2021;12:719653. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.719653>.

16. Ennab HA, Mohamed AH, El-Hoseiny HM, Omar AA, Hassan IF, Gaballah MS, Khalil SE, Mira AM, Abd El-Khalek AF, Alam-Eldein SM. Humic acid improves the resilience to salinity stress of drip-irrigated Mexican lime trees in saline clay soils. *Agronomy*. 2023;13(7):1680. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071680>.
17. Ertani A, Pizzeghello D, Baglieri A, Cadili V, Tambone F, Gennari M, Nardi S, Humic-like substances from agro-industrial residues affect growth and nitrogen assimilation in maize (*Zea mays* L.) plantlets. *J Geochem Explor*. 2013;129:103-11. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.001>.
18. Feoktistova A, Bakaeva M, Timergalin M, Chetverikova D, Kendjieva A, Rameev T, Hkudaygulov G, Nazarov A, Kudoyarova G, Chetverikov S. Effects of humic substances on the growth of *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and wheat plants inoculated with this strain. *Microorganisms*. 2022;10:1066. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10051066>.
19. Jindo K, Canellas LP, Albacete A, Santos LF, Rocha RLF, Baia DC, Canellas NOA, Goron TL, Olivares FL. Interaction between humic substances and plant hormones for phosphorous acquisition. *Agronomy*. 2020;10:640. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050640>.
20. Kudoyarova G, Arkhipova T, Korshunova T, Bakaeva M, Loginov O, Dodd IC. Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses. *Front Plant Sci*. 2019;10:1368. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01368>.
21. Kudoyarova GR, Vysotskaya LB, Arkhipova TN, Kuzmina LYu, Galimsyanova NF, Sidorova LV, Gabbasova IM, Melentiev AI, Veselov SYu. Effect of auxin producing and phosphate solubilizing bacteria on mobility of soil phosphorus, growth rate, and P acquisition by wheat plants. *Acta Physiol Plant*. 2017;39:253 <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2556-9>.
22. Lahlou M, Harms H, Springael D, Ortega-Calvo J-J. Influence of soil components on the transport of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria through saturated porous. *Media Environ Sci Technol*. 2000;34:3649-56. <https://doi.org/10.1021/es000021t>.
23. Meier M, Liu Y, Lay-Pruitt KS, Takahashi H, von Wirén N. Auxin-mediated root branching is determined by the form of available nitrogen. *Nat. Plants* 2020;6:1136-45. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00756-2>.
24. Muscolo A, Cutrupi S, Nardi S. IAA detection in humic substances. *Soil Biol. Biochem*. 1998;30(8/9):1199-201. <https://doi.org/10.1007/s10886-006-9206-9>.
25. Nardi S, Pizzeghello D, Muscolo A, Vianello A. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Bio. Biochem*. 2002;34:1527-36. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8).
26. Nardi S, Schiavon M, Francioso O. Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters. *Molecules*. 2021;26:2256. <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>.
27. Nazarov AM, Garankov IN, Tuktarova IO, Salmanova ER, Arkhipova TN, Ivanov II, Feoktistova AV, Prostyakova ZG, Kudoyarova GR. Hormone balance and shoot growth in wheat (*Triticum durum* Desf.) plants as influenced by sodium humates of the granulated organic fertilizer. *Agric Biol*. 2020;55:945-55. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.5.945eng>.
28. Nazarov S, Chetverikov D, Chetverikova I, Tuktarova R, Ivanov R, Urazgildin I, Garankov G, Kudoyarova A. Microbial preparations combined with humic substances improve the quality of tree planting material needed for reforestation to increase carbon sequestration. *Sustainability*. 2023;15:7709. <https://doi.org/10.3390/su15097709>.
29. Nazarov A, Chetverikov S, Timergalin M, Ivanov R, Ryazanova N, Shigapov Z, Tuktarova I, Urazgildin R, Kudoyarova G. Improving tree seedling quality using humates combined with bacteria to address decarbonization challenges through forest restoration. *Plants*. 2024;13:1452. <https://doi.org/10.3390/plants13111452>.
30. Olaetxea M, Mora V, Bacaicoa E, Baigorri R, Garnica M, Fuentes M, Zamarreño AM, Spíchal L, García-Mina JM. Root ABA and H⁺-ATPase are key players in the root and shoot growth-promoting action of humic acids. *Plant Direct*. 2019;3(10):e00175. <https://doi.org/10.1002/pld3.175>.
31. Olivares FL, Busato JG, de Paula AM, da Silva LL, Aguiar NO, Canellas LP. Plant growth promoting bacteria and humic substances: crop promotion and mechanisms of action. *Chem Biol Technol Agric*. 2017;4:30 <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0112-x>.
32. Park J, Lee Y, Martinoia E, Geisler M. Plant hormone transporters: what we know and what we would like to know. *BMC Biol*. 2017;15:93. <https://doi.org/10.1186/s12915-017-0443-x>.
33. Perez-Montano F, Alias-Villegas C, Bellogin RA, del Cerro P, Espuny MR, Jimenez-Guerrero I, Lopez-Baena FJ, Ollero FJ, Cubo T. Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural

- important plants: From microorganism capacities to crop production. *Microbiol Res.* 2014;169:325-36. <http://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.011>.
34. Russell L, Stokes AR, Macdonald H, Muscolo A, Nardi S. Stomatal responses to humic substances and auxin are sensitive to inhibitors of phospholipase A₂. *Plant Soil.* 2006;283:175-85. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0011-6>.
 35. Shen C, Yue R, Bai Y, Feng R, Sun T, Wang X, Yang Y, Tie S, Wang H. Identification and analysis of *Medicago truncatula* auxin transporter gene families uncover their roles in responses to *Sinorhizobium meliloti* infection. *Plant Cell Physiol.* 2015;56(10):1930-43. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcv113>.
 36. Shinde S, Cumming JR, Collart FR, Noirot PH, Larsen PE. *Pseudomonas fluorescens* transportome is linked to strain-specific plant growth promotion in aspen seedlings under nutrient stress. *Front Plant Sci.* 2017;8:348. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00348>.
 37. Stewart AJ, Chapman W, Jenkins GI, Graham I, Martin T, Crozier A. The effect of nitrogen and phosphorus deficiency on flavonol accumulation in plant tissues. *Plant Cell Environ.* 2001;24:1189-97. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00768.x>.
 38. Timergalin MD, Feoktistova AV, Kendjieva AA, Nazarov AM, Chetverikov SP, Kudoyarova GR. The effect of bacterial treatment in combination with humic substances on growth, indicators of oxidative stress and water relations of wheat plants under soil water shortage. *Russ J Plant Physiol.* 2023;70:200. <https://doi.org/10.1134/S1021443723602409>.
 39. Trevisan S, Pizzeghello D, Ruperti B, Francioso O, Sassi A, Palme K, Quaggiotti S, Nardi S. Humic substances induce lateral root formation and the expression of the early auxin-responsive IAA19 gene and DR5 synthetic element in *Arabidopsis*. *Plant Biol.* 2010;12:604-14. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00248.x>.
 40. Varanini Z, Pinton R. Humic substances and plant nutrition. In: Lüttge U, (Ed.), *Progr Bot.* 1995;56:97-117. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79249-6_5.
 41. Veselov DS, Sharipova GV, Veselov SU, Kudoyarova GR. The effects of NaCl treatment on water relations, growth and ABA content in barley cultivars differing in drought tolerance. *J Plant Growth Regul.* 2008;27:380-6. <https://doi.org/10.1007/s00344-008-9064-5>.
 42. Vocciante M, Grifoni M, Fusini D, Petruzzelli G, Franchi E. The role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Appl Sci.* 2022;12:1231. <http://doi.org/10.3390/app12031231>.
 43. Wang N, Fu F, Wang H, Wang P, He S, Shao H, Ni Z, Zhang X. Effects of irrigation and nitrogen on chlorophyll content, dry matter and nitrogen accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Sci Rep.* 2021;11:16651. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95792-z>.
 44. Yang H, Kim H, Tong M. Influence of humic acid on the transport behavior of bacteria in quartz sand. *Colloids Surf. B Biointerfaces.* 2012;91:122-9.
 45. Zandonadi DB, Santos MP, Busato JG, Peres LEP, Façanha AR. Plant physiology as affected by humified organic matter. *Theor Exp Plant Phys.* 2013;25:12-25. <https://doi.org/10.1590/S2197-00252013000100003>.



ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА ПРИВОДИТ К УВЕЛИЧЕНИЮ ЧИСЛЕННОСТИ БЕРЕГОВЫХ ЛЕЖБИЩ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ (*PUSA SIBIRICA* GM.)

Е.А. Петров^{1*}, А.Б. Купчинский¹, М.Е. Овдин^{1, 2},
А.В. Шаблов³

¹ Байкальский музей СО РАН, пос. Листвянка, Иркутская обл., Россия;

² Заповедное Подлеморье, пос. Усть-Баргузин, Баргузинский район, Бурятия, Россия;

³ Московский государственный технический университет гражданской авиации (Иркутский филиал),
г. Иркутск, Россия

* Эл. почта: evgen-p@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; принята к печати 15.02.2025

С целью выяснить, использует ли байкальская нерпа *Pusa sibirica* Gm. береговые лежбища, расположенные не на Ушканьих островах, в 2024 году мы обследовали берега оз. Байкал с помощью беспилотных воздушных аппаратов (БПЛА) и зафиксировали не описанные ранее локации береговых лежбищ на п-ове Святой Нос, на восточной стороне о-ва Ольхон и трех островах в проливе Малое море. Численность зверей на этих лежбищах на момент обследования составляла около 7 тыс. особей, что говорит о большой значимости этого биотопа в жизни байкальской нерпы. С помощью фотоловушек, установленных на п-ове Святой Нос, мы показали, что одно из обнаруженных лежбищ функционировало на протяжении всего лета, описана динамика численности зверей на лежбище и активность нерп в течение суток. Предполагается, что вновь найденные локации береговых лежбищ байкальская нерпа использовала десятки лет назад, после чего их роль сошла на нет. Однако в связи с изменениями ледового режима, обусловленными потеплением климата, численность нерп, испытывающих физиологическую потребность пребывания в условиях берега, значительно увеличилась, что и привело к возрождению многих береговых лежбищ, прежде всего, не испытывающих критического антропогенного влияния.

Ключевые слова: байкальская нерпа, ледовый режим, Байкал, потепление, береговые лежбища, антропогенное влияние.

CLIMATE WARMING LEADS TO INCREASE IN THE NUMBER OF SHORE ROOKERIES OF BAIKAL SEAL (*PUSA SIBIRICA* GM.)

Е.А. Petrov^{1*}, А.В. Kupchinsky¹, М.Е. Ovdin^{1, 2}, А.В. Shablov³

¹ Baikal Museum SB RAS, Listvyanka, Irkutsk region, Russia;

² Zapovednoye Podlemorye, Ust-Barguzin, Barguzinsky District, Buryatia, Russia;

³ Moscow State Technical University of Civil Aviation (Irkutsk branch), Irkutsk, Russia

* E-mail: evgen-p@yandex.ru

To find out whether the Baikal seal *Pusa sibirica* Gm. uses coastal rookeries located outside of Ushkany Islands, we surveyed in 2024 the shores of Lake Baikal using unmanned aerial vehicles (UAV). We recorded previously undescribed locations of coastal rookeries on Sviatoy Nos Peninsula, on the eastern side of Olkhon Island, and on three islands in Maloye More Strait. At the time of the survey, the number of seals at these rookeries amounted to 7 thousand individuals. Therefore, this biotope is highly important for Baikal seal. Using camera traps installed on Sviatoy Nos Peninsula, we showed that one of the newly discovered rookeries functioned throughout the summer. The dynamics of animal counts at the rookery and the 24-h activity of seals are reported. It is supposed that the newly discovered locations of coastal rookeries were used by Baikal seals decades ago, and later their role came to naught. However, due to the changes in ice regimen caused by global warming, the number of seals experiencing a physiological need to stay in coastal conditions increased significantly. This has led to the revival of many coastal rookeries, primarily those not experiencing critical anthropogenic influence.

Key words: Baikal seal, ice regime, Baikal, warming, coastal rookeries, anthropogenic influence.

Введение

В мировой литературе признано, что глобальное изменение климата становится самой серьезной угрозой

для ластоногих во всем мире [13]. Изменение климата, наряду с химическим загрязнением, морским мусором и шумом, входит в понятие «загрязнение» и в

оценке Международного союза охраны природы оно классифицировано как основная угроза для морских млекопитающих, в том числе для байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gmelin, 1778), отнесенной к категории видов, вызывающих наименьшие опасения [12]. Изменение климата усугубляет антропогенные воздействия и физиологический стресс у морских млекопитающих из-за ускоренной потери среды обитания и снижения продуктивности морей, вызывая сдвиги в ареале и численности пищевых объектов морских млекопитающих, а также увеличивая частоту и серьезность токсичного цветения водорослей и вспышек патогенов (обзор: [17]). Изменения, связанные с климатом, могут быть основной угрозой для ластоногих через изменения в экологических процессах, особенно в полярных регионах (обзор: [11]); например, описаны примеры поведенческой пластичности кольчатой нерпы *Pusa hispida* на Шпицбергене в ответ на изменения среды обитания [16] и снижение рождаемости беломорской популяции гренландского тюленя *Pagophilus groenlandicus* в 2008 году из-за деградации ледового покрова [10]. Наличие и состояние ледового покрова оказывают влияние на лимнологические и биологические процессы в Байкале, и не исключено, что в результате возрастающей нестабильности, меняющейся сезонной продолжительности и изменения других параметров ледового покрова продуктивность озера увеличивается, что обеспечивает предполагаемый рост численности популяции высшего хищника – байкальской нерпы. Но те же процессы несут и определенные угрозы ластоногим, возможно в большей мере видам, обитающим во внутренних водоемах [13]. В предыдущих работах мы неоднократно продвигали гипотезу, согласно которой потепление климата, следствием которого является изменение ледового режима озера Байкал, оказывает заметное влияние на популяцию льдолюбивой байкальской нерпы [16].

В частности, динамика ледолома (от начала вскрытия ледового покрова до полного исчезновения дрейфующих льдов) существенно влияет на поведение и бюджет времени у по крайней мере больших особей и тех, которые нуждаются в условиях, способствующих завершению линьки. В безледный период такие условия можно найти только на береговых лежбищах, куда и направляются упомянутые категории зверей [5, 6], численность которых в последнее время увеличилась. В 2023 и 2024 годах ледовый режим на стадии ледолома (апрель–май) значительно различался не только по срокам деформации ледового покрова, но и по ледовитости, а в южной части озера весной 2023 года еще и необычным характером разрушения ледового покрова. Последняя ситуация, когда чистая акватория средней части озера с юга и севера граничит с практически не деформированным ледовым покровом (см. ниже), вызывала особый интерес. Бай-

кальская нерпа избегает формировать линные залежки в глубине ледяных «полей» [4], то есть при сплошности льдов 7–8 баллов, когда дрейфующий лед состоит из отдельных льдин, большинство которых соприкасаются друг с другом [2]. Поэтому звери, обитающие на момент разрушения льда в средней части озера и не успевшие вылинять на «своих» плавающих льдах, должны либо мигрировать на юг или на север ко льдам, либо выходить на береговые лежбища.

Мы ставили перед собой цель установить, используют ли байкальские нерпы другие локации для залегания (кроме известных лежбищ на Ушканьих островах) в случаях, когда сезонные гидрометеорологические условия не позволяют значимой части популяции провести весеннюю линьку на плавающих льдах. Учитывая опыт 2020 года [8, 9]¹, когда ледовый покров сошел чрезвычайно рано (к 13 мая по всему озеру), мы предполагали, что с увеличением количества животных, испытывающих физиологическую потребность пребывания в условиях комфортных и адекватных для смены волосяного покрова, байкальские нерпы будут осваивать другие береговые локации, поскольку маловероятно, чтобы звери, оказавшиеся на момент исчезновения плавающих льдов в сотнях километрах от лежбищ на Ушканьих островах, непременно устремились бы к ним.

Материалы и методы

Съемку береговой линии оз. Байкал проводили с экспедиционного судна «Профессор А.А. Тресков» в 2023 и 2024 годах по одному и тому же маршруту. Начиная с пос. Листвянка, вдоль западного берега в северном направлении, судно следовало в 200–300 м от берега со скоростью 17–18 км/ч. Обследование берегов проводили комбинированным методом, сочетающим визуальные наблюдения в бинокль и обследование перспективных береговых локаций или визуально замеченных залежек нерп с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Применялись БПЛА компании DJI: Mavic 2 Zoom и Air 2S. В процессе фотосъемки использовалось оптическое и цифровое зумирование, включая двукратный оптический зум и двукратный и четырехкратный цифровые зумы. Видеоматериалы снимались с разрешением 4K при частоте 25 кадров в секунду. Весь процесс видео- и фотосъемки осуществлялся с использованием глобальной системы позиционирования (GPS), что обеспечивало не только высокую точность геопозиционирования и стабильность полета БПЛА, но и сохранение в цифровых фотоматериалах метаданных с указанием геолокации (GPS координаты). Для запуска БПЛА судно ложилось в дрейф, определялись скорость и на-

¹ В 2020 году в конце июля на восточной стороне о-ва Ольхон мы обнаружили 18–20 залежек, на которых залегали около 1000 нерп (визуальная оценка).

правление ветра, и квадрокоптер стартовал. Съемку проводили с высоты 60 м, в некоторых случаях при снижении до 40 м, стараясь не испугивать лежащих зверей. В некоторых случаях режим съемок меняли, например, оператор аккуратно опускал коптер ниже. Результаты этих экспериментальных полетов описаны ниже. Стремясь минимизировать влияние туристических судов, обследование островов в Малом море проводили в утреннее время до 10 ч, при тихой погоде: на воде штиль или легкое волнение, скорость ветра – до 5 м/с (0–1 балл по шкале Бофорта). Остров Ольхон обследовали в произвольное время по мере продвижения судна вдоль его береговой линии (около 84 км), применяя БПЛА при скорости ветра <10 м/с.

С помощью БПЛА были обследованы острова в проливе Малое море, восточная сторона о-ва Ольхон и отдельные участки западного берега п-ова Святой Нос. В 2023 году съемку проводили 21, 25 и 27 мая и 5 июня; объем видеоматериалов составил 43,4 Гб (62 мин). В мае на скалистых берегах о-ва Ольхон еще сохранялись наледи, а в открытой акватории, прилегающей к острову с восточной стороны, были обнаружены остатки дрейфующих льдов, на которых залежали нерпы. В 2024 году объем отснятых видеоматериалов составил около 45 Гб (65 мин). 29 мая БПЛА обследовали берег о-ва Ольхон в районе мыса Ижимей, 8 июня – в районе северной оконечности острова (м. Хобой), 9 июня обследован весь остров,

Табл. 1

**Локации залежек* байкальских нерп на о-ве Ольхон в 2024 году
(численность особей и время обнаружения)**

Координаты залежек		Время суток	Число нерп
Северная долгота N ^o	Восточная широта E ^o		
8 июня 2024 года			
53.413247	107.788661	11:41	431
53.413356	107.790198	11:43	9
53.399447	107.790906	12:03	117
9 июня 2024 года			
53.023901	107.017071	11:27	30
53.024309	107.020346	11:29	25
53.204952	107.611399	11:39	214
53.041044	107.073991	11:57	432
53.040764	107.086978	12:02	1184
53.042642	107.093196	12:07	1576
53.046525	107.127534	12:27	51
53.046163	107.121073	12:29	192
53.226227	107.708070	12:39	304
53.048663	107.139392	14:31	170
53.051573	107.157983	14:36	20
53.050542	107.157629	14:38	303
53.054008	107.169078	14:51	152
53.116411	107.459424	14:56	81
53.075091	107.397322	16:10	75
53.057177	107.179044	16:10	380
53.074494	107.405813	16:13	365
53.024310	107.020347	16:13	26
53.117330	107.461758	16:53	62
53.117136	107.461741	16:53	35
53.206548	107.617621	17:54	172
53.205371	107.613058	17:57	7
53.206980	107.619523	17:59	80
53.208229	107.625781	18:32	46
53.226402	107.711581	18:40	23
53.375024	107.779455	19:52	66
53.376182	107.781240	19:53	82
53.398025	107.790865	20:19	42
53.412383	107.787000	20:38	9
53.411239	107.787919	20:39	9

* Локации, координаты которых выделены полужирным шрифтом, расцениваются как береговые лежбища.

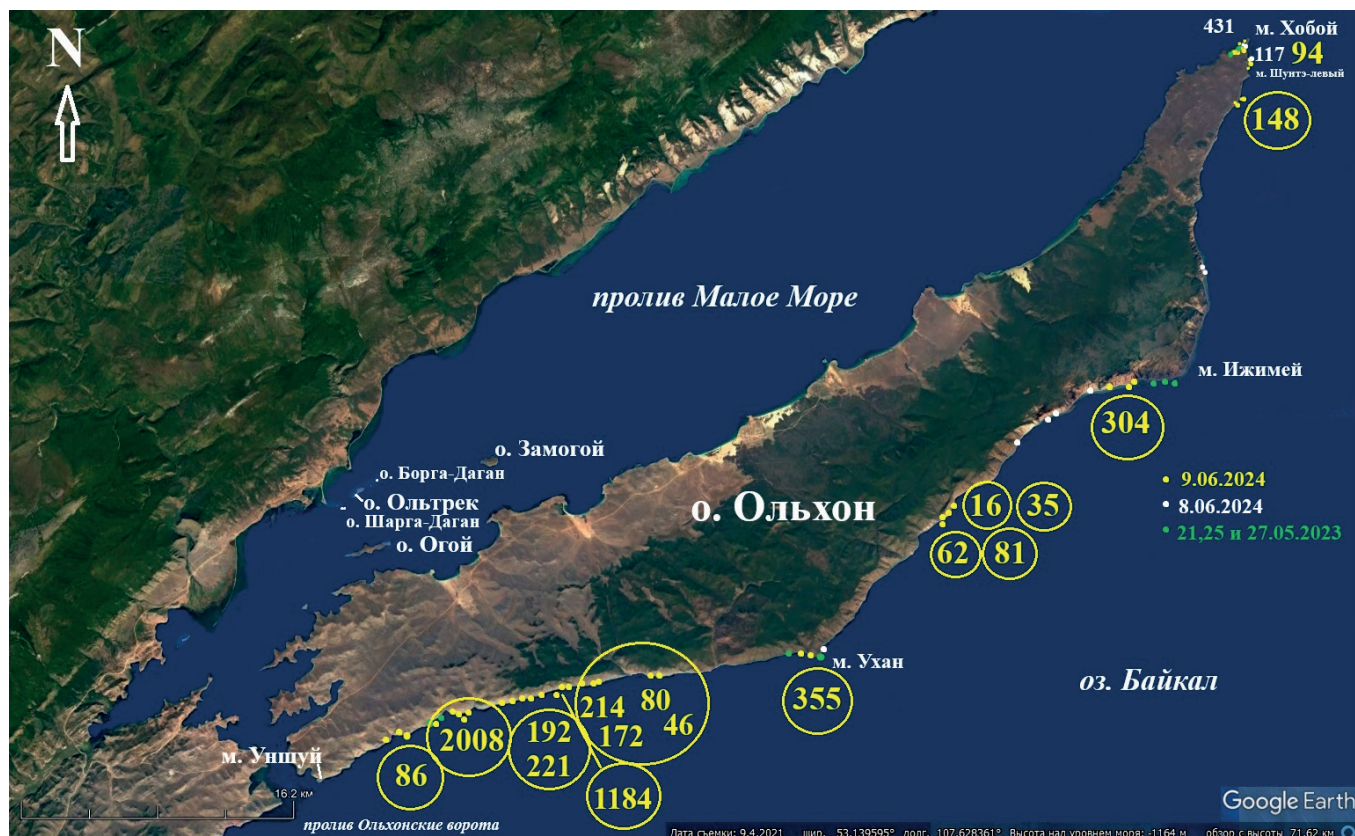


Рис. 1. Обследование береговой линии о-ва Ольхон с восточной стороны и обследованные острова в проливе Малое море. Точками помечены основные обследованные с помощью БВС локации в 2023 и 2024 годах, цифрами – численности байкальских нерп на отдельных участках залегания (белым цветом за 8 июня, желтым – за 9 июня 2024 года); данные приведены не в полном объеме (см. таблицу 1)

а 21 и 27 августа выполнены 5 облетов БПЛА только берегов в районе мыса Хобой (нерп не было) (рис. 1). Конкретные локации, где обнаружены залежки нерп на о-ве Ольхон и численность этих залежек, приведены в таблице 1.

Геоморфология и литология о-ва Ольхон и островов в Малом море описаны ранее [8]. Геоморфологический облик западной стороны горста Святой Нос в основном представлен аккумулятивным типом берега, сложенным продуктами разрушения горных пород. На всем протяжении береговой линии (≈58 км) преобладают галечно-валунные пляжи (низкие, но широкие). Каменистые пляжи относительно ровного берега, не имеющего ни заливов (губ), ни выдающихся мысов, перемежаются с небольшими песчаными пляжами, на которых четко прослеживаются многочисленные следы медведей. На основании нашей условной классификации берегов [8]² перечисленные виды берега относятся к не «нерпичьим». Однако на многих участках в зоне прилива лежат многочислен-

² Мы выделили три «типа» берегов, или биотопов: «нерпичьи», условно «нерпичьи» и не «нерпичьи» берега, на которые звери практически никогда не выходят или не наблюдались.

ные глыбы, большинство из которых могут служить субстратом для нерп. На береговой линии п-ова Святой Нос геоморфологически выделяются две локации. Примерно в 19 км (по береговой линии) от северной оконечности (мыс Верхнее Изголовье) находится мыс Орлова (53.85°N, 108.89°E) – небольшой выступ низкого, заболоченного берега, заканчивающийся разбросанными в прибрежье глыбовыми структурами; такие же камни усеивают обширное мелководье, прилегающее к мысу. Вторая локация – мыс Маркова (53.69°N, 108.70°E) в ≈26 км от южной оконечности полуострова (м. Нижнее Изголовье). В отличие от первого мыса он более каменистый, но также низкий, обрамленный большим количеством глыбообразных камней, которые также разбросаны в литоральной зоне довольно далеко от берега.

Результаты Полуостров Святой Нос

Во время наших предыдущих спорадических обследований отдельных участков полуострова берега мы ни разу не обнаруживали не только залежек нерп, но и не наблюдали нерп в воде. В 2024 году 29 мая мы

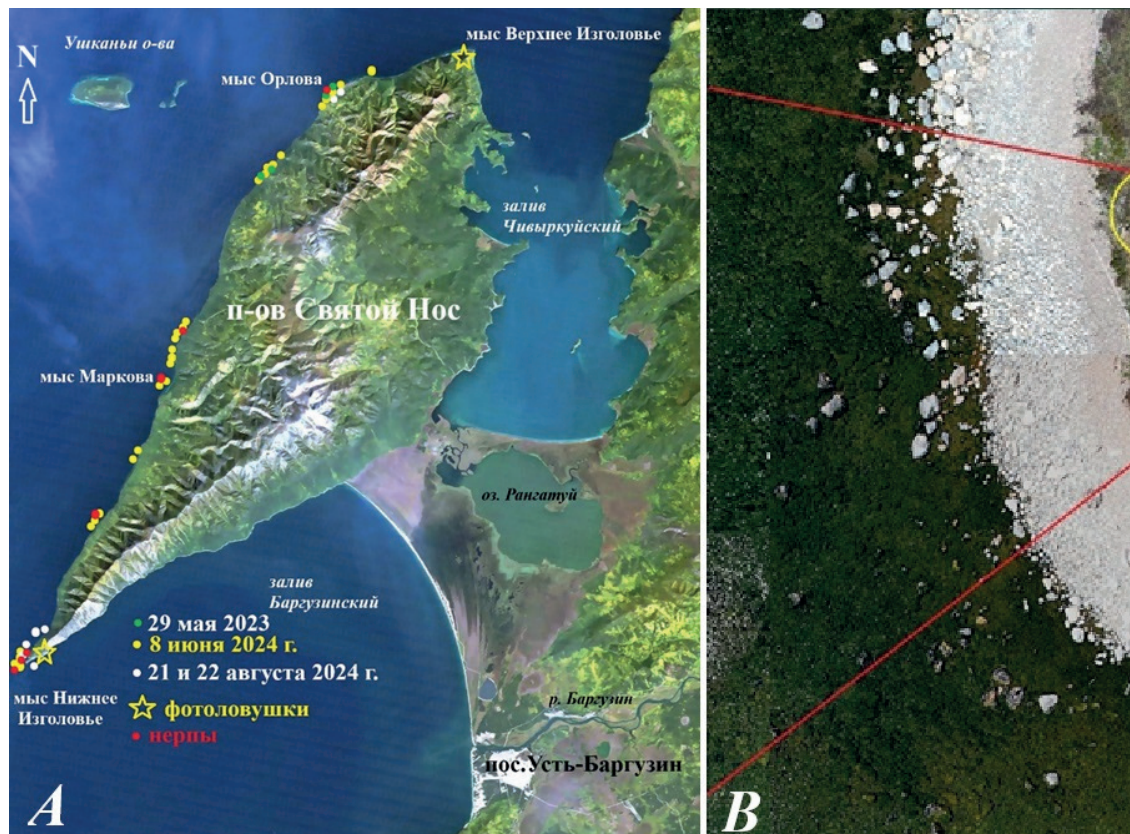


Рис. 2. Обследование береговой линии п-ова Святой Нос с западной стороны (А) и сектор наблюдения фотоловушкой на мысу Нижнее Изголовье (В). Точками помечены основные обследованные с помощью БВС локации в 2023 и 2024 годах

отметили около 15 нерп в районе м. Орлова (несколько особей на камнях, остальные в воде поблизости), а позже, 8 июня, у мыса Нижнее Изголовье были обнаружены около 80 особей, большинство из которых залежали на камнях. Единичные взрослые нерпы замечены на удаленных от берега камнях в 11 км к северу от упомянутого мыса (53.57°N, 108.59°E) и дальше в районе мыса Маркова (53.71°N, 108.71°E). 21 августа снова обследовали берег в районе мыса Нижнее Изголовье протяженностью около 1900 м и отметили не менее 17 нерп (12 на камнях), а 22 августа – обследовали мыс Орлова (1860 м), нерп не было.

Немного позже на п-ове Святой Нос были установлены две фотоловушки – на мысах Верхнее и Нижнее Изголовья (рис. 2). Данные, полученные с фотоловушки, установленной на северном конце полуострова (м. Верхнее Изголовье), говорят об отсутствии лежбища на этом мысу. На полученных 298 стоп-кадрах звери 24 раза зафиксированы утром (в 6 и 9 ч), 5 раз – в 18 ч, и 2 раза – в 21 ч. Общая численность нерп на стоп-кадрах составила всего 40 особей (залежка состояла из 1–2 особей), звери всегда лежали на одном и том же камне. В целом такой результат не удивителен с учетом того, что мимо этой локации регулярно кур-

сирует множество туристических судов, заходящих и выходящих из Чивыркуйского залива. Кроме того, вероятно, было неудачно выбрано место установки фотоловушки.

На лежбище на мысу Нижнее Изголовье звери присутствовали практически ежедневно за исключением дней, когда выходу на берег препятствовали неблагоприятные погодные условия (главным образом волнение). Максимальная численность зверей на камнях, одномоментно зафиксированная на стоп-кадре, в июне составила 165 особей (примерно как на рис. 4А), июле – 111, августе – 35 и в сентябре – 29 особей. Средняя численность нерп, зафиксированных фотоловушкой за сутки, составляла в июне $270 \pm 55,1$ ($n = 18$ дней), в июле $151 \pm 21,6$ ($n = 31$) и в августе – $20 \pm 5,5$ особей ($n = 31$); среднесуточные значения численности зверей, посещающих лежбище, и активность посещения приведены в таблице 2, а на рис. 3 показана посуточная динамика общей численности нерп в июне и июле, когда нерпы особенно активно посещали лежбище. Видно, что численность зверей на лежбище в июле была заметно меньше, чем в июне, но выраженной динамики в обоих случаях не прослеживалось. В июне их максимальное количество в кадре

составляло 97, в июле – только 40, а в августе и сентябре все желающие имели возможность выйти на камни и в воде нерп почти не наблюдали.

Уже в августе нерпы стали посещать лежбище значительно реже, чем в начале сезона, число стоп-кадров без нерп увеличилось вдвое, а общая численность зверей сократилась в 7 раз по сравнению с июлем. Тенденция сохранялась и в сентябре, а в октябре нерпы посетили лежбище в количестве 26–28 особей только дважды – 7 и 8 октября несмотря на то, что и в сентябре, и в октябре бывали дни с благоприятной погодой.

Эта динамика продолжилась в сентябре (табл. 2), и тем не менее нерпы лежбище не забывали. В июне и июле суточная активность нерп была схожей: с ранних утренних сумерек (минимум 4–5 ч) численность нерп была уже большой, к 8–11 ч – повышалась и потом несколько уменьшалась, однако звери оставались на лежбище по крайней мере до 20 ч (следующий стоп-кадр, как правило, был темным). Скорее всего, звери оставались на лежбище и на ночь, как это уже не раз отмечалось.

Уровень воды в Байкале с начала наблюдения (13 июня) повышался, но медленно, и к 13 сентября увеличился с 456,41 до 456,78 м над у. м., т. е. на 37 см, и тем не менее этого оказалось достаточно, чтобы заметно затопить камни, служащие субстратом для нерп (рис. 4). Возможно, что и по этой причине численность зверей на лежбище сокращалась, но примечательно, что нерпы залегали только на литоральных камнях, практически не выходя на пляж. Кроме того, необходимо уточнить, что в поле зрения фотообъектива попадала лишь часть лежбища (рис. 2В), за его пределами тоже лежали нерпы. Другими словами, емкость обнаруженного лежбища относительно большая, не менее 200 особей.

Остров Ольхон

Визуальное обследование восточного берега о-ва Ольхон и облеты БПЛА береговой линии в районе мыса Ижимей проводили 29 мая 2024 года; байкальские нерпы обнаружены не были. Однако 8 июня в районе северной оконечности острова (м. Хобой) были обнаружены залежки общей численностью 548 особей (рис. 1). В течение 9 июня была обследована вся береговая линия с восточной стороны острова комбинированным методом (с севера на юг). В первой половине дня, с 11:30 до 12:30 ч, были найдены и зафиксированы на видео многочисленные залежки в южной части острова. Общая численность животных на твердом субстрате и в воде рядом составила 3994 особи (рис. 1).

Во второй половине дня (с 14.30 до 20.30 ч) обследование продолжили и были найдены залежки зверей общей численностью 3424 нерпы. Нерпы небольшими группами залегали на камнях, выступающих из воды (то есть их численность определялась размерами субстрата), и на отдельных участках берега залежки тянулись на сотни метров.

Острова Малого моря

В мае 2023 года при обследовании западного берега Байкала, включая восточный берег о-ва Ольхон, и островов, расположенных в проливе Малое море (острова Огой, Замогой, Ольтрек/Борокчан и другие) залежки байкальской нерпы обнаружены не были. В 2024 году 9 июня при обследовании островов БПЛА в проливе Малое море были обнаружены залежки байкальской нерпы (рис. 5). На о-ве Замогой (53,18°N, 107,11°E), самом удаленном от Ольхонских ворот, где работает паромная переправа с материка на о-в Ольхон (рис. 1), – учтены 666 нерп, лежащих на прибреж-

Табл. 2

**Посещаемость байкальской нерпой лежбища на мысу Нижнее Изголовье (п-ов Святой Нос)
(численность нерп на кадре)**

Показатель	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Число дней наблюдения	18	31	31	30
Число дней без нерп (%)	2** (11)	3** + 1 (13)	6** + 13 (61)	15** + 5 (67)
Число стоп-кадров (n), включая кадры без нерп* (%)	107 (35)	186 (41)	180 (84)	146 (87)
Количество нерп на камнях на одном кадре за сутки	38,6 ± 4,65	19,7 ± 1,86	2,6 ± 0,46	1,3 ± 0,40
Количество нерп в воде на одном кадре за сутки (%)	7,0 ± 1,11(15)	5,4 ± 0,51 (21)	0,9 ± 0,19 (25)	0,27 ± 0,09 (17)
Количество нерп на камнях и в воде на одном кадре за сутки	45,8 ± 5,08	25,2 ± 2,13	3,4 ± 0,62	1,6 ± 0,46

* Общая численность <5 особей; ** – непогода.

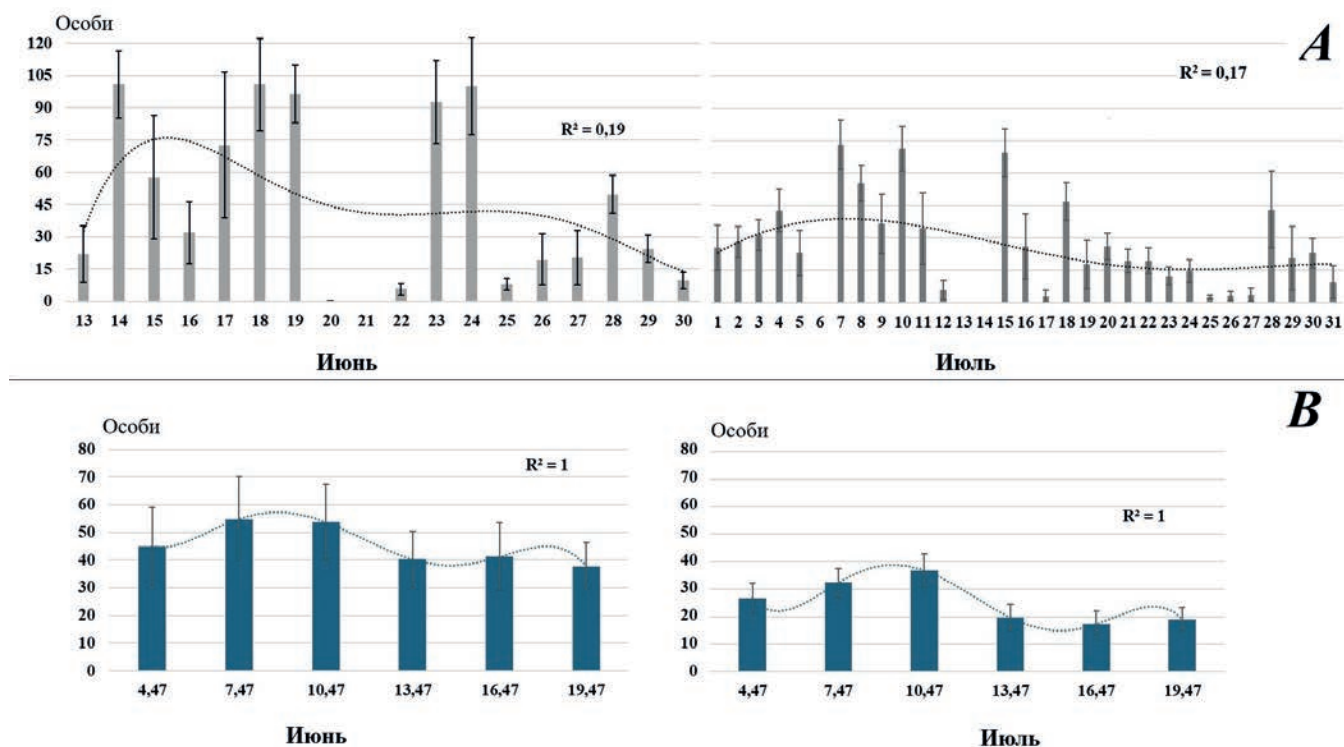


Рис. 3. Суточная динамика средней численности байкальской нерпы (А) и динамика средней численности нерп в течение суток (В) в июне-июле 2024 года на лежбище на мысу Нижнее Изголовье п-ова Святой Нос по данным фотоловушки (приведены полиномиальные линии тренда и R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации)



Рис. 4. Общий вид лежбища на п-ове Святой Нос при разном уровне воды (А – 9 июля, 456.53 и В – 8 октября 2024 года, 456.76 м над у. м.) (данные с сайта <https://rushydro.ru/informer>)

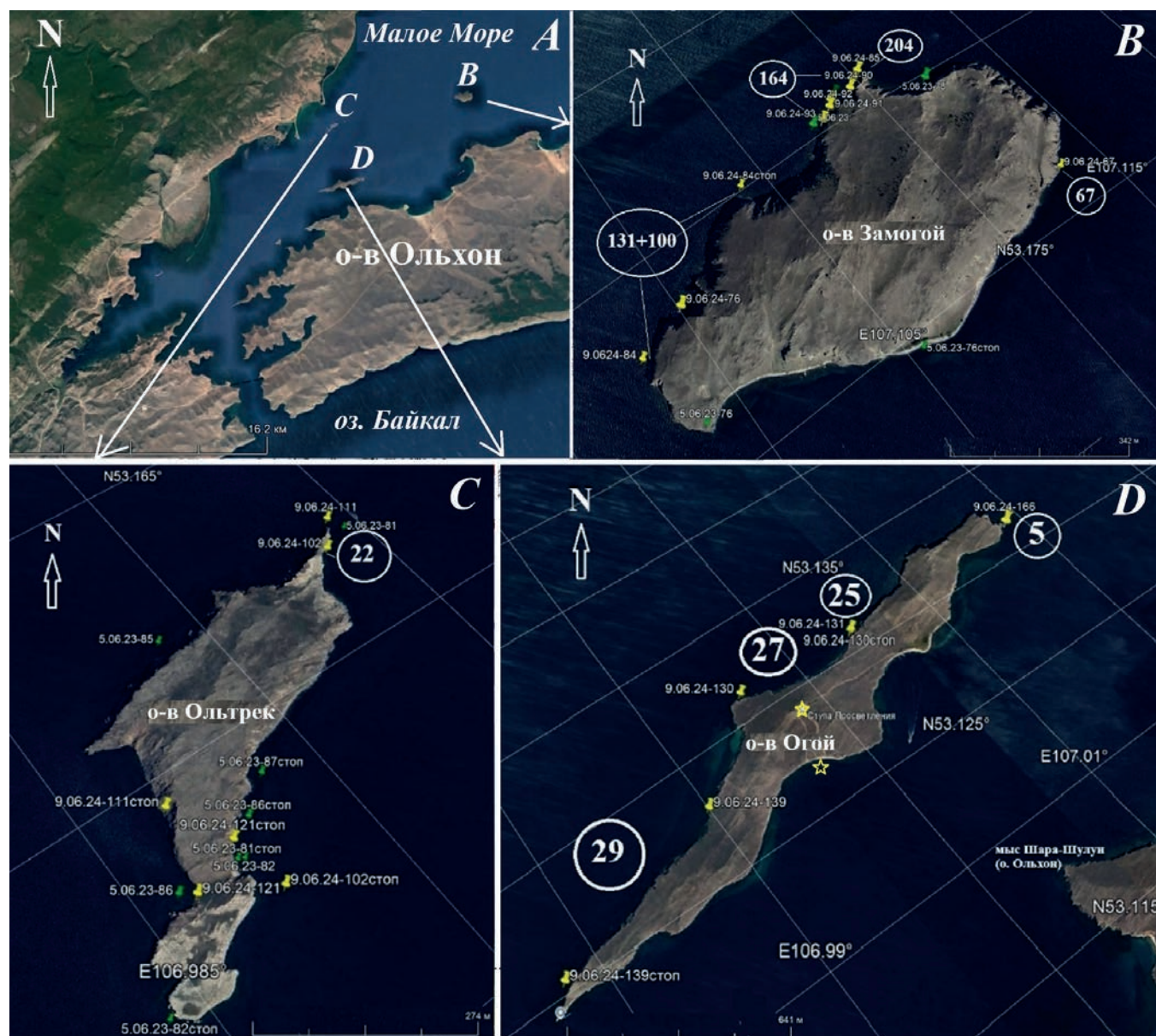


Рис. 5. Обследование береговой линии трех островов в проливе Малое море 9 июня 2024 года: А – географическое местоположение островов; В, С, D – вид каждого острова (основа Google Earth Pro). В кружках указана суммарная численность байкальских нерп в залежках; «кнопками» указаны места старта и финиша БВС, номера файлов и дата обследования; звездочками помечены туристический объект и место причаливания туристических судов

ных камнях и скалах (не на берегу) и плавающих в непосредственной близости от залежек. Звери концентрировались на северной и северо-западной сторонах острова, рассредоточившись на береговой полосе протяженностью около 1800 м.

Небольшая залежка из 22 нерп обнаружена на северной оконечности о-ва Ольтрек (Борокчин) (53,16°N, 106,99°E), где 5 июня 2023 года также была обнаружена залежка из 14 нерп, находящихся на разных стадиях линьки [8].

На соседних очень маленьких островах-останцах (севернее – Борга-Даган, 53,16°N 106,99°E, южнее – Шарга-Даган, 53,15°N 106,97°E) нерп не было, но располагались колонии большого баклана (*Phalacrocorax carbo*). На о-ве Огой (53,13°N 107,00°E) несмотря на то, что на нем находятся туристические объекты и остров в летний сезон посещают сотни туристов в день (июнь считается невысоким сезоном), на северо-западной стороне (противоположной северо-восточной стороне, куда

подходят туристические суда) обнаружены несколько залежек нерп общей численностью 86 особей. Как и на других островах, нерпы лежали исключительно на полузатопленных прибрежных камнях (скалах) рядом с берегом.

Обсуждение

При аналогичных обследованиях значительной части береговой линии Байкала, включая острова Малого моря и о-в Ольхон, проведенных в 2021–2023 годах, были выявлены и описаны места, которые по геоморфологическим и литологическим параметрам пригодны для использования нерпами в качестве потенциальных лежбищ, однако новых локаций залегания нерп, за исключением залежки, упомянутой выше, обнаружено не было [7, 8]. Многочисленные залежки нерп на о-ве Ольхон, обнаруженные в августе 2020 года, мы расценили как временные, появившиеся предположительно в июне, если не в мае, поскольку плавающие льды в южном и среднем Байкале полностью исчезли уже к 7 мая. Их наличие позволило нам утверждать, что о-в Ольхон может служить относительно спокойным пристанищем для тысяч байкальских нерп, если в этом возникает необходимость [8]. Мы предположили, что залежки нерп возникли на месте ранее существовавших лежбищ (а не вновь образованные, новые), а обилие нерпы на восточном берегу о. Ольхон квалифицировали как редкое явление [8]. Обследование острова в 2024 году опровергло последнее утверждение. Учитывая многочисленность нерп в залежках и их местоположение на о-ве Ольхон, часть локаций, указанных в табл. 1, мы рассматриваем как возрождающиеся береговые лежбища. О наличии таковых упоминается в нескольких источниках, однако относительно конкретные локации приведены только в монографии [4], где упомянуты лежбища на островных мысах Хобой, Саган и Шоройте-Хушун. Мыс Шоройте-Хушун (= гора Толгой, 53.327°N, 107.749°E) ограничивает с севера залив Хара-Яман, на берегу которого давно существует пос. Узуры (и вероятно, местные жители и сообщили о залежках нерп). Первоначально там находилась только метеостанция, но теперь это довольно шумное место, посещаемое туристами, и вряд ли может привлечь нерп. Под мысом Саган, очевидно, имелся в виду мыс Саган-Хушун. Этот мыс на западной стороне острова является популярным туристическим объектом (скала Три брата). Таким образом, эти локации легко доступны, к ним имеются дороги, и они активно посещаются туристами, что исключает формирование там полноценных лежбищ. Большое число зверей, обнаруженных нами на мысу Хобой, подтверждают литературные данные о наличии там лежбища [4], но этот природный памятник посещают буквально все туристы, приезжающие на о-в Ольхон, и фактор беспокойства там большой.

Поэтому нерпы посещают упомянутые локации спорадически, а в данном случае – сразу после исчезновения льдов и пока мало туристов.

Характер функционирования нового лежбища на п-ве Святой Нос в целом такой же, какой мы отмечали для лежбищ на Ушканьих островах. В частности, значительные колебания численности нерп (рис. 3А) на лежбище мы объясняли одновременным подходом и уходом зверей, в нагульный период мигрирующих в пелагиали озера в составе более или менее обособленных групп [5]. Этот феномен, как и суточная динамика (рис. 3В), похожая на описанную ранее [3, 5], подтверждают, что изучаемый участок берега действительно является лежбищем нерп. Численность нерп в воде, на наш взгляд, показывает заинтересованность зверей в твердом субстрате. Очевидно, что эти особи намереваются выйти на береговое лежбище и плавают в поисках места. Кроме того, множество нерп и в воде, и на камнях свидетельствует о большой численности животных, единовременно подошедших к лежбищу [3].

Почти все вновь обнаруженные локации залегания байкальской нерпы расположены в районах с минимальным уровнем потенциального антропогенного влияния. В мае и в начале июня на Байкале, и, в частности, в Малом море туристов еще немного, и беспокойство нерпам приносят в основном браконьерские лодки и единичные суда, однако летом фактор беспокойства зашкаливает, и основным его источником является водный транспорт [8]. Поэтому рассматривать обнаруженные на островах локации в качестве береговых лежбищ (то есть мест, где звери ежегодно и регулярно устраивают залежки), по-видимому, неверно – скорее это временные места обитания зверей. У нас нет сомнений, что летом фактор беспокойства, со стороны судоходства, в проливе настолько большой, что исключает регулярное использование нерпами островов. На о. Ольхон практически все обнаруженные залежки байкальской нерпы, как в 2020 году, так и в 2024 году находились на восточной стороне острова, вдали от мест, используемых для рекреационных целей. Поскольку основные природные достопримечательности находятся в Малом море, то и маршруты туристических судов редко проходят вдоль восточной стороны острова и фактор беспокойства (главным образом в виде шума) там незначительный. Это справедливо и в отношении «диких» туристов.

Также очевидно, что байкальская нерпа предпочитает отдаленные, уединенные места на островах, на которых отсутствуют крупные наземные хищники. Биотопы лисиц (*Vulpes*), волков (*Canis lupus*), хорьков и горностаев (*Mustela*), обитающих на о-ве Ольхон [9], не соприкасаются с местами временного нахождения нерп на восточном берегу, хотя волки на острове не редкость. Исключением является полуостров Святой



Рис. 6. Взрослый медведь на берегу Байкала и залежка байкальских нерп на камне (фото С.Л. Шабурова)

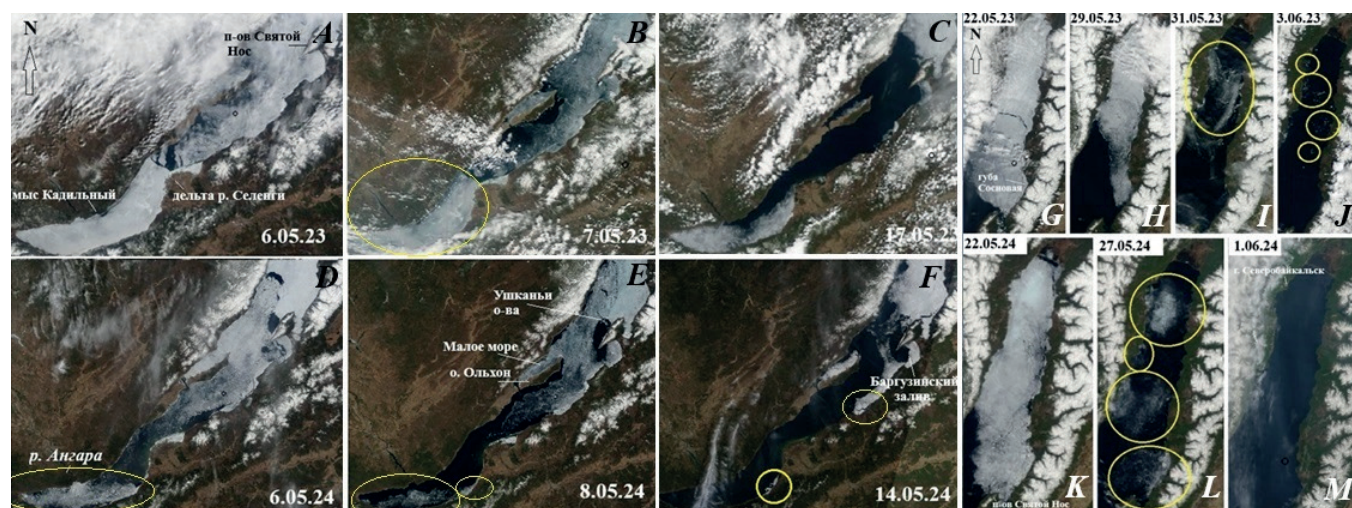


Рис. 7. Ледолом в южной (A-C; D-F) и северной (G-J; K-M) частях оз. Байкал в 2023 и 2024 годах (основа: скриншоты с сайта <https://multimaps.ru>; в кружках – остатки льда)

Нос, в лесах которого обитает немало бурых медведей (*Ursus arctos*), причем известны случаи, когда медведь выходил на лед Чивыркуйского залива. В литературе есть упоминания о попытках медведя скрасть (добыть, поймать) нерпу, лежащую на берегу [1], и ввиду количества медведей, наблюдаемых нами на берегу полуострова во время наших экспедиций, не исключено, что такие события случаются (рис. 6). Возможно, что обычное отсутствие нерп на лежбищах в начале лета (с третьей декады мая) связано с обилием медведей, регулярно выходящих на берег, где они слизывают с камней в урзе воды имаго ручейников (*Trichoptera*).

Изложенные выше материалы позволяют нам говорить о появлении и регистрации нового, или по крайней мере не используемого на протяжении многих лет, лежбища на полуострове Святой Нос. Примечательно, что, судя по литературным данным, на полуострове некогда существовали береговые лежбища на мысах Орлова и Маркова [4], однако нерпы почему-то «не вспомнили» о них, а предпочли освоить новое.

Скорее всего, это лежбище когда-то уже функционировало, но после появления на мысу Нижнее Изголовье метеостанции и роста фактора беспокойства звери перестали его посещать, подобно тому, как это произошло с лежбищем на Большом острове архипелага Ушканьи острова [4]. Метеостанция на Нижнем Изголовье существовала с начала прошлого века и была демонтирована в 1990-х годах.

Возникает вопрос, почему в 2021–2023 годах нерп на упомянутых выше островах и на п-ове Святой Нос не было, а в 2024 году были обнаружены массовые залежки, насчитывающие в сумме тысячи зверей. Примечательно, что если численность нерп на восточном берегу о-ва Ольхон 9 июня составляла 6,2 тыс. (табл. 1), то 8 июня на лежбищах на трех малых Ушканьих островах она превышала 9,5 тыс. (наши неопубликованные данные)³, то есть в эти дни около 16 тыс. нерп были сконцентрированы в районах указанных береговых лежбищ. Отсюда понятно, что береговые лежбища весьма востребованы и их значение в условиях потепления климата только увеличивается. Если исключить фактор случайности, точнее стечения обстоятельств, когда мы и байкальские нерпы оказались одновременно в одном месте, то ответ на поставленный вопрос надо искать в особенностях ледового режима.

Вариативность времени ледовых явлений и продолжительности ледового покрова в целом на Байкале очень высокая, что связано со сложностью лежащих в его основе природных факторов. Наиболее изменчивым параметром являются даты образования льда, когда различия между двумя соседними годами могут

³ К сожалению, 9 июня мы не успели провести полную съемку берега Ольхона (табл. 2).

достигать 40 дней [18], но и даты освобождения озера ото льда значительно различаются. Межгодовая динамика вскрытия льда в масштабе бассейна определяет ледовитость (количество и продолжительность существования плавающих льдов) южного и северного Байкала, которая была выше в 2023 году, чем в 2024 году, что и отразилось на количестве не успевших вылынять нерп и численности береговых залежек.

Южная часть Байкала. В 2024 году признаки ледолома появились в те же сроки (22–24 апреля), что в предыдущем году: на Селенгинском мелководье возникли трещины с берега на берег, а 28–29 апреля образовались узкие участки чистой воды вдоль западного берега, начиная с мыса Кадильный. С 1 на 2 мая произошла подвижка и началась интенсивная деформация льда от южной оконечности озера до о-ва Ольхон; 5–6 мая на всей южной части преобладал битый лед, местами в виде ледовых «полей» (рис. 7).

Полностью Южный Байкал освободился от дрейфующих льдов к 18 мая, однако по формальному признаку (100% отсутствие льда) – только к 21 мая после того, как исчезли узкие полосы льда у восточного берега от дер. Сухая до пос. Максимиха, достаточно урбанизированного, чтобы нерпы в массе не использовали прибрежные льды для залегания. В 2023 году ледовый покров начал разрушаться с одновременного появления открытой воды у мыса Кадильный (что обычно) и поперечных щелей севернее Селенгинского мелководья [3]. Однако в дальнейшем разрушение льда интенсивно шло севернее мелководья и очень медленно на юге. Быстро распространяясь, к 6 мая оно охватило всю среднюю часть озера вплоть до Ушканьих островов; 7 мая появились большие участки чистой воды, а 16–17 мая исчезли дрейфующие льды. При этом в южной оконечности озера целостность ледового покрова почти не была нарушена до 12 мая (рис. 7), а акватория очистилась от плавающего льда только к 25 мая [3]. Таким образом, в южном Байкале продолжительность ледолома (до полного освобождения акватории от льда) в 2024 году была короче, чем в 2023 году (28 и 32 дня соответственно), а ледовитость существенно выше. Предполагаемое время существования плавающих льдов в 2024 году не превышало 12 дней, а в 2023 году севернее Селенгинского мелководья – около 10 дней, на акватории южнее мелководья – около 12 дней.

Северная часть Байкала (рис. 7). В 2024 году процессы деформации льда начались в районе Ушканьих островов рано, 3–4 мая, но, распространяясь вдоль западного берега в северном направлении, они почти не затрагивали остальной акватории, которая оставалась под единым малоподвижным ледовым массивом. 19 мая все ледяное поле оторвалось от берегов и сдвинулось в южном направлении, освободив акваторию северной оконечности ото льда, оставаясь единым

массивом. С 26–27 мая можно говорить о преобладании дрейфующих льдов, которые, судя по космическим снимкам, предположительно исчезли уже к 28–29 мая. Большая облачность не позволила установить точную дату, но по данным натурных наблюдений отдельные льдины сохранялись до 4–5 июня. В 2023 году практически не деформированный ледовый покров сохранялся до 21 мая, его разрушение шло медленно, плавающие льды сохранялись до 5–6 июня, а отдельные белые льдины (не наблюдаемые на спутниковых снимках) встречались до 9–10 июня [3]. Таким образом, период ледолома в 2024 году составил около 30 дней и прошёл в более ранние сроки, чем в 2023 году, а период, когда нерпы могли линять на плавающих льдах в 2024 году, был меньше 10 дней.

Заключение

Описанная динамика разрушения ледового покрова на заключительном этапе ледолома позволяет предполагать, что в 2024 году, по сравнению с ситуацией, наблюдаемой в 2023 году [3], значительная часть популяции байкальской нерпы не смогла завершить линьку на льдах. Это вынудило зверей образовывать многочисленные береговые залежки, выбирая для них локации, наиболее удаленные от потенциальных угроз антропогенного характера (преимущественно острова). В то же время были освоены наиболее близко расположенные локации от места нахождения нерп, многие из которых следует рассматривать как временные лежбища, потребность в которых в 2024 году оказалась больше, чем обычно. Обнаруженные места залегания нерп мы не расцениваем как новые, не существующие ранее, лежбища. С учетом литературных источников,

с большой вероятностью можно утверждать, что байкальская нерпа возобновила использование прежних, не функционирующих многие годы, лежбищ, выбрав наиболее удаленные от человека, а потому спокойные места (п-ов Святой Нос, о-в Ольхон). В частности, восточная сторона о-ва Ольхон послужила относительно спокойным пристанищем для тысяч байкальских нерп. Исследование продемонстрировало адекватную реакцию популяции в ответ на меняющиеся ледовые условия. С учетом длительной эволюции вида в постоянно меняющихся климатических условиях плейстоцена [15] этот феномен можно расценивать как пример экологической пластичности, выработанной за время обитания предков нерпы в оз. Байкал.

Благодарности. Авторы благодарят команду научно-исследовательского судна «Профессор А.А. Тресков» за добросовестную работу во время проведения экспедиционных рейсов, а также внешних пилотов – студентов МГТУ ГА (Иркутский филиал).

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 121032900077-4 «Экологическая диагностика изменений некоторых элементов биогеоценозов территории Восточной Сибири». В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования «Научно-экспедиционный центр Байкал» (<https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3213559>).

Соблюдение этических норм. Настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов экспериментальных исследований.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Иванов ТМ. Байкальская нерпа, ее биология и промысел. Известия биолого-географического НИИ при Восточно-Сибирском государственном университете. 1938;8(1–2):1–119.
2. Бреховской ЮП, ред. Номенклатура морских льдов. Условные обозначения для ледовых карт. Л.: Гидрометеиздат; 1974.
3. Овдин МЕ, Петров ЕА. Особенности освоения байкальской нерпой (*Pusa sibirica* Gm.) береговых лежбищ на Ушканьих островах (оз. Байкал) весной 2023 года по данным фотоловушек. Международный научно-исследовательский журнал. 2024;12(150):1–8.
4. Пастухов ВД. Байкальская нерпа: биологические основы рационального использования и охраны ресурсов. Новосибирск: Наука; 1993.
5. Петров ЕА, Купчинский АБ, Фиалков ВА, Бадардинов АА. Значение берега в жизни байкальской нерпы (Gmelin, 1788, Pinnipedia). № 3. Функционирование лежбищ байкальской нерпы на о. Тонкий (Ушканьи острова, оз. Байкал) по материалам видеонаблюдений // Зоологический журнал. 2021. Т. 100. № 7. С. 823–40.
6. Петров ЕА, Купчинский АБ. Основная причина выхода байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gm.) на береговые лежбища – растянутая смена волосяного покрова (линька) на фоне потепления. Зоологический журнал. 2023;102(2):201–14.
7. Петров ЕА, Купчинский АБ, Овдин МЕ. Северо-восточное побережье оз. Байкал как место обитания байкальской не-

- рпы (*Pusa sibirica* Gm., 1778) в летний период. Известия ТИНРО. 2023;203(2):371–91.
8. Петров ЕА, Купчинский АБ. Западное побережье оз. Байкал как место обитания байкальской нерпы *Pusa sibirica* в летний период. Известия ТИНРО. 2024;204(1):112–33.
 9. Риттер К. Землеведение Азии. География стран, входящих в состав Азиатской России или пограничных с нею. Восточная Сибирь: озеро Байкал и прибайкальские страны, Забайкалье и степь Гоби. Вып. 2, часть 2. С.-Петербург, 1879.
 10. Черноок ВИ, Болтнев АИ. Регулярный инструментальный авиамониторинг зафиксировал резкое снижение рождаемости беломорской популяции гренландского тюленя. В кн.: Морские млекопитающие Голарктики. М.: РОО Совет по морским млекопитающим; 2008. С. 100–4.
- Общий список литературы/Reference**
1. Ivanov TM. [Baikal seal, its biology and trade]. Izvestiya Biologo-Geograficheskogo NII pri Vostochno-Sibirskom Gosudarstvennom Universitete. 1938;8(1-2):5-119. (In Russ.)
 2. Brekhovskiy YuP, ed. Nomenklatura Morskikh Ldov. [Nomenclature of Sea Ice. Conventional Designations for Ice Maps]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1974. (In Russ.)
 3. Ovdin ME, Petrov EA. [Features of the development of coastal rookeries on the Ushkany Islands (Lake Baikal) by the Baikal seal (*Pusa sibirica* Gm.) in the spring of 2023 according to camera trap data]. Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal. 2024;12(150):1-8. (In Russ.)
 4. Pastukhov VD. Baykal'skaya Nerpa: Biologicheskiye Osnovy Ratsionalnogo Ispolzovaniya i Okhrany Resursov. [Baikal Seal: Biological Basis for the Rational Use and Protection of Resources]. Novosibirsk: Nauka; 1993. (In Russ.)
 5. Petrov EA, Kupchinsky AB, Fialkov VA, Badardinov AA. The Importance of the Coast in the Life of the Baikal Seal (Gmelin, 1788, Pinnipedia). No. 3. Functioning of Baikal Seal Rookeries on Tonkiy Island (Ushkany Islands, Lake Baikal) Based on Video Observations // Zoologicheskii Zhurnal. 2021;100(7):823-40. (In Russ.)
 6. Petrov EA, Kupchinsky AB. [The main reason for the Baikal seal (*Pusa sibirica* Gm.) coming to coastal rookeries is the extended change of hair cover (molt-ing) against the background of warming]. Zoologicheskii Zhurnal. 2023;102(2):201-14. (In Russ.)
 7. Petrov EA, Kupchinsky AB, Ovdin ME. [Northeast-ern coast of Lake Baikal as a habitat of the Baikal seal (*Pusa sibirica* Gm., 1778) in summer]. Izvestiya TINRO. 2023;203(2):371-91. (In Russ.)
 8. Petrov EA, Kupchinsky AB. [The western coast of Lake Baikal as a habitat for the Baikal seal *Pusa sibirica* in summer]. Izvestiya TINRO. 2024;204(1):112-33. (In Russ.)
 9. Ritter K. Zemlevedeniye Azii. Geografiya stran, Vkhodyashchikh v Sostav Aziatskoy Rossii ili Pogranichnykh s Neyu. Vostochnaya Sibir: Ozero Baykal i Pribaykalskiye Strany, Zabaykalye i Step Gobi. [Geoscience of Asia. Geography of the Countries that are Part of Asian Russia or Border it. Eastern Siberia: Lake Baikal and the Baikal countries, Transbaikalia and the Gobi steppe]. Issue 2, part 2. Saint Petersburg; 1879. (In Russ.)
 10. Chernook VI, Boltnev AI. [Regular instrumental aerial monitoring recorded a sharp decline in the birth rate of the White Sea population of harp seals]. In: Morskiye Mlekovpitayushchiye Golarktiki. Moscow: ROO «Sovet po Morskim Mlekovpitayushchim»; 2008. P. 100–4. (In Russ.)
 11. Blanchet M-A, Vincent C, Womble JN, Steingass SM, Desportes G. Harbour seals: population structure, status, and threats in a rapidly changing environment. Oceans. 2021;2:41-63.
 12. Goodman S. *Pusa sibirica*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016:e.T41676A45231738.
 13. Kovacs KM, Aguilar A, Aurioles D, Burkanov V, Campagna C, Gales N, Gelatt T, Goldsworthy SD, Goodman SJ, Hofmeyr GJG, Onen TH, Lowry L, Lydersen Ch, Schipper J, Sipila T, Southwell C, Stuart S, Thompson D, Trillmich F. Global threats to pinnipeds. Marine Mammal Sci. 2012;28(2):414-36.
 14. Kouraev AV, Semovski SV, Shimaraev MN, Mognard NM, Legresy B, Remy F. The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data: Relationship to air temperature, dynamical, and other factors. Limnol Oceanogr. 2007; 52(3):1268-86.
 15. Petrov EA, Kupchinsky AB, Fialkov VA. Summer coastal rookeries and perspectives of the Baikal seal (*Pusa sibirica*) population in the conditions of the global warming. Biosyst Divers. 2021; 29(4):387-92.
 16. Vacquie-Garcia J, Lydersen Ch, Lydersen E, Christensen GN, Guinet C, Kovacs KM. Seasonal habitat use of a lagoon by ringed seals *Pusa hispida* in Svalbard, Norway. Marine Ecol Progr Sers. 2021; 675:153-64.
 17. Vazquez JM, Khudyakov JI, Madelaire CB, Godard-Codding CA, Routti H, Lam EK, Piotrowski ER, Merrill GB, Wisse JH, Allen KN, Conner J, Blevin P, Spyropoulos DD, Goksøyr A, Vazquez-Medina JP. Ex vivo and in vitro methods as a platform for studying anthropogenic effects on marine mammals: four challenges and how to meet them. Front Mar Sci. 2024;11:1466968.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРАВОНАРУШЕНИЙ В ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ ТУРИЗМА

Ю.И. Баева*, Н.А. Черных

Московский государственный институт международных отношений Министерства иностранных дел Российской Федерации (МГИМО МИД России), Москва, Россия

Эл. почта: yu.baeva@inno.mgimo.ru

Статья поступила в редакцию 29.01.2025; принята к печати 07.03.2025

В работе рассмотрены основные экологические проблемы, связанные с негативным воздействием туризма, главным образом неорганизованного, на уникальные природные комплексы одного из крупнейших объектов туризма, спорта, рыболовства и охоты Центральной России – оз. Селигер. Проведен анализ официальных статистических данных по количеству экологических правонарушений, совершаемых на туристических территориях Тверской области. Показано, что отдыхающие, особенно неорганизованные, оказывают негативное влияние на береговую и прибрежную зоны, а также на открытую поверхность озера. К числу самых распространенных нарушений природоохранного законодательства в местах неорганизованного отдыха на территории озера Селигер относятся вытаптывание почвенного покрова и его загрязнение отходами потребления, а также незаконные рубки и браконьерство. Для минимизации негативного воздействия рекреации и для сохранения уникальных природных комплексов оз. Селигер необходима системная и комплексная работа, базирующаяся на объективной оценке реальной и на определении допустимой рекреационной нагрузки на природную систему «водосбор-озеро». Помимо соблюдения нормативов рекреационных нагрузок в местах массового неорганизованного отдыха, следует благоустроить береговые и прибрежные зоны, наладить систематический вывоз отходов и усилить контроль соблюдения природоохранного законодательства. При этом ключевой задачей охраны окружающей среды в регионе является принятие административных мер и управленческих решений по оценке, регулированию и ограничению туристических потоков на данной территории.

Ключевые слова: неорганизованный туризм, озеро Селигер, почвенный покров, лесные экосистемы, экологические правонарушения.

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF ENVIRONMENTAL VIOLATIONS IN TVER REGION IN THE CONTEXT OF TOURISM DEVELOPMENT

Yu.I. Baeva*, N.A. Chernykh

MGIMO University, Moscow, Russia

Эл. почта: yu.baeva@inno.mgimo.ru

The study considers the main ecological challenges associated with the adverse impact of tourism, mostly unregulated, on the distinctive natural ecosystems of the lake Seliger, a prominent destination for tourism, sporting activities, fishing and hunting in Central Russia. Official statistical data pertaining to environmental violations within the tourist zones of the Tver region was examined. The analysis revealed that unorganized recreation produces a detrimental effect on the shoreline and coastal zones, as well as on the open surface of the lake. The study identified the most prevalent types of violations of environmental legislation in unorganized recreation areas around the lake Seliger, which are soil trampling and littering with waste, illegal logging, and poaching. To mitigate the adverse effects of recreation and to safeguard the distinctive natural ecosystems of Seliger, it is imperative to adhere to a comprehensive approach based on objective evaluation of the real conditions and on estimation of permissible recreational load on the natural system of the lake and its catchment area. In addition to ensuring compliance with the established standards for recreational loads in designated areas of unorganized mass recreation, it is imperative to enhance coastal and coastal zone management. This should include implementation of systematic waste removal programs and augmentation of surveillance on adherence to environmental legislation. The primary objective of environmental protection in the region is to implement administrative measures and management decisions that facilitate the assessment, regulation and restriction of tourist flows within the designated area.

Key words: unorganised tourism, Lake Seliger, soil cover, forest ecosystems, environmental violations.

Введение

Одной из самых быстрорастущих отраслей современной мировой экономики является туризм. По

данным Всемирной туристической организации (UNWTO) в 2024 году мировые расходы на туризм достигли 2 триллионов долларов США, а общий эко-

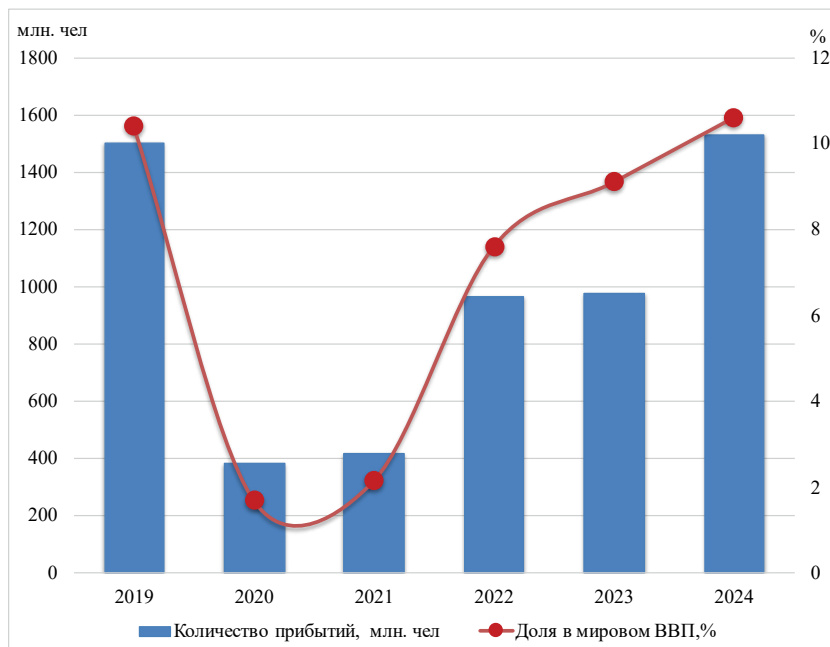


Рис. 1. Динамика развития мирового туризма. Источник: составлено авторами на основе Global Tourism Statistics 2024: Facts and Forecasts. – URL: <https://wptravel.io/global-tourism-industry-statistics/#h-international-tourist-arrivals-in-2024>

номический вклад по различным оценкам составил от 3 до 11% мирового ВВП¹. При этом в 2024 году по всему миру путешествовали более 1,53 миллиарда туристов² (рис. 1).

Развитие туризма оказывает значительное влияние на социально-экономическую сферу Российской Федерации, затрагивая различные аспекты экономики страны и жизни общества. Туристическая индустрия является важным источником доходов для государства, способствует созданию рабочих мест, стимулирует развитие инфраструктуры и улучшает качество жизни населения. Так, по данным Росстата³ в 2023 году доля туризма в ВВП РФ составила 2,8%, а объем туристических услуг достиг 285,9 млрд руб.

Введение санкций и социально-политическая изоляция России в 2022–2024 годах существенно снизили возможности зарубежного отдыха для россиян, поэтому основные направления путешествий в данный период пришлось на внутренние поездки (рис. 2). Кроме того, из-за ограничения перелетов в южных ре-

гионах страны произошла диверсификация маршрутов внутреннего туризма – для отдыха люди стали чаще рассматривать Русский Север, Карелию, Сибирь и Арктику. Увеличился запрос на авторские этнические туры, где можно ближе познакомиться с образом жизни коренных малых народов России, их ремеслом, кухней и природой. Вырос интерес к отдыху в «диких условиях» без мобильной связи и интернета⁴.

Для ряда регионов России туризм стал одним из основных источников доходов бюджета. Так, например, показатель внутреннего регионального продукта туристической индустрии по Тверской области с 2016 по 2022 год вырос на 57% (с 12,9 млрд руб. до 20,2 млрд руб.), а доля отрасли в ВРП региона в 2022 году составила 3,2%. При этом с 2018 по 2022 год общий турпоток в регион составил 9,5 млн человек⁵. В 2023 году Тверскую область посетило порядка 2,8 млн туристов: по сравнению с 2016 годом число гостей, приезжающих в Верхневолжье, выросло в два раза⁶.

Согласно рейтингам, составленным на основе данных по бронированию жилья российским сервисом бронирования жилья для отдыха Tvil.ru, одной из

¹ World Tourism Barometer 2024. Vol. 22. Issue 1. – URL: <https://www.unwto.org/un-tourism-world-tourism-barometer-data>. Global Tourism Statistics 2024: Facts and Forecasts. – URL: <https://wptravel.io/global-tourism-industry-statistics/#h-international-tourist-arrivals-in-2024>.

² Travel & Tourism Development Index 2024. World Economic Forum. URL: <https://www.weforum.org/publications/travel-tourism-development-index-2024/>.

³ Статистический бюллетень Росстата к Всемирному дню туризма – 2024. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/turizm/comments>.

⁴ Анализ рынка туризма в России в 2019–2023 гг., прогноз на 2024–2028 гг. – URL: <https://businessstat.ru/>.

⁵ Туризм. Официальная статистика. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/turizm>.

⁶ Туризм и индустрия гостеприимства. Национальные проекты России. – URL: <https://национальныепроекты.рф/news/v-2023-godu-tverskuyu-oblast-posetili-2-8-milliona-turistov/>.

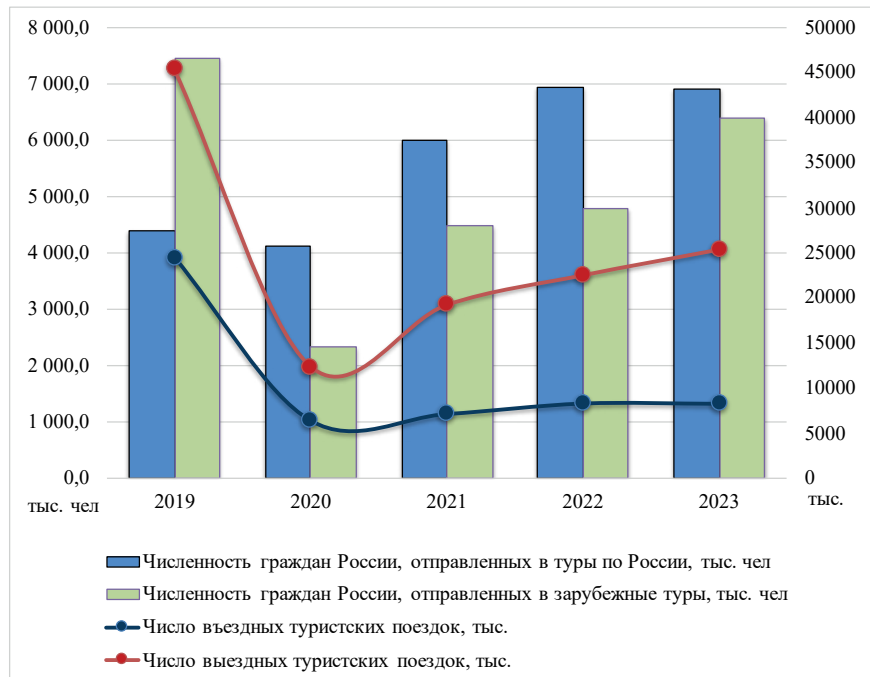


Рис. 2. Показатели развития туризма в России. Источник: составлено авторами на основе данных Федеральной службы государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/turizm>

наиболее перспективных территорий для развития туризма в Тверской области является Осташковский городской округ, а город Осташков – одним из самых посещаемых городов России⁷.

Осташковский городской округ обладает большим историко-культурным и природно-рекреационным потенциалом, составляющим основу туристских ресурсов местности. Территория Осташковского городского округа входит в границы уникального комплекса, расположенного на Валдайской возвышенности на берегах озера Селигер, у истоков рек Волги и Западной Двины. Главная достопримечательность края – озеро Селигер, самое крупное в области и одно из крупнейших в Европе. Его площадь – 260 км², в том числе под островами – 38 км². Длина озера – 66 км, длина береговой линии – 528 км, средняя глубина – около 6 м, а максимальная – 24 м. Это многоплесовое озеро с изрезанной береговой линией. Водная система Селигера включает более 20 обособленных плесов и озер, соединенных между собой протоками и проливами и имеет 220 островов.

Территория озера Селигер представляет собой один из крупнейших объектов туризма, спорта, рыболовства и охоты Центральной России. Еще в 1974 году район озера был включен в перечень курортов, имеющих республиканское значение⁸. В настоящее время Се-

лигер наряду с Верхневолжскими озерами имеет статус курорта местного значения «Селигер» в Тверской области⁹. При этом отличительной чертой отдыха на Селигере является преобладание неорганизованных «диких» туристов. На побережье озера существуют места массового скопления отдыхающих, где на ограниченном участке берега одновременно могут находиться десятки автомобилей с установленными вблизи туристическими палатками. В качестве примера можно привести территории между деревнями Пачково и Пески, Слобода и Никола Рожок, Бараново и Неприе, Заплавье и др.

Массовый туризм, особенно неорганизованный, сопровождается, как правило, значительным негативным воздействием на окружающую среду [4, 12]. Однако выявить вклад именно «диких» туристов в рекреационную деградацию природных экосистем достаточно сложно. Поэтому весьма информативным показателем при оценке рекреационной нагрузки вследствие неорганизованного туризма может являться количество экологических правонарушений. Перечень основных нарушений природоохранного законодательства, как правило, совершаемых отдыхающими, приведен в табл. 1.

природных богатств в бассейне озера Селигер Калининской области, а также развитию зоны отдыха и туризма в этом районе».

⁷ Официальный сайт Tvil.ru. – URL: <https://tvil.ru/blog/reitingi>.

⁸ Постановление Совета Министров РСФСР от 13.02.1974 № 104 «О мерах по усилению охраны природы и улучшению использования

⁹ Постановление Администрации Тверской области от 11.09.2002 № 305-па «О признании территории озера Селигер и Верхневолжских озер курортом местного значения „Селигер“ в Тверской области».

Табл. 1

Экологические правонарушения, как правило, совершаемые «дикими» туристами

Статьи Кодекса об административных правонарушениях РФ	Статьи Уголовного кодекса РФ
8.2. Несоблюдение требований в области охраны окружающей среды при обращении с отходами производства и потребления	247. Нарушение правил обращения экологически опасных веществ и отходов
8.6. Порча земель	254. Порча земли
8.13. Нарушение правил охраны водных объектов	250. Загрязнение вод
8.25. Нарушение правил использования лесов	261. Уничтожение или повреждение лесных насаждений
8.26. Самовольное использование лесов, нарушение правил использования лесов для ведения сельского хозяйства, уничтожение лесных ресурсов	
8.31. Нарушение правил санитарной безопасности в лесах	
8.32. Нарушение правил пожарной безопасности в лесах	
8.28. Незаконная рубка, повреждение лесных насаждений или самовольное выкапывание в лесах деревьев, кустарников, лиан	260. Незаконная рубка лесных насаждений
Ст. 8.29. Уничтожение мест обитания животных	Ст. 259. Уничтожение критических местообитаний для организмов, занесенных в Красную книгу РФ
8.33. Нарушение правил охраны среды обитания или путей миграции объектов животного мира и водных биологических ресурсов	
8.35. Причинение вреда редким и находящимся под угрозой исчезновения видам животных, растений или других организмов, занесенных в Красную книгу РФ и (или) охраняемых международными договорами РФ, в том числе их уничтожение	258.1. Незаконные добыча и оборот особо ценных диких животных и водных биологических ресурсов, принадлежащих к видам, занесенным в Красную книгу РФ и (или) охраняемым международными договорами РФ
	260.1. Умышленные уничтожение или повреждение, а равно незаконные добыча, сбор и оборот особо ценных растений и грибов, принадлежащих к видам, занесенным в Красную книгу РФ и (или) охраняемым международными договорами РФ
8.37. Нарушение правил охоты, правил, регламентирующих рыболовство и другие виды пользования объектами животного мира	258. Незаконная охота
Ст. 8.38. Нарушение правил охраны водных биологических ресурсов	256. Незаконная добыча (вылов) водных биологических ресурсов
8.39. Нарушение правил охраны и использования природных ресурсов на особо охраняемых природных территориях	262. Нарушение режима особо охраняемых природных территорий и природных объектов
8.42. Нарушение специального режима осуществления хозяйственной и иной деятельности на прибрежной защитной полосе водного объекта, водоохранной зоны водного объекта либо режима осуществления хозяйственной и иной деятельности на территории зоны санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения	

Объекты и методы

Анализ динамики экологических правонарушений проводился на основе открытых данных официальных источников Министерства природных ресурсов и экологии Тверской области, Управления Россельхознадзора по Тверской и Ярославской областям, Министерства лесного комплекса Тверской области и Московско-Окского Территориального управления Федерального агентства по рыболовству.

В качестве объектов исследования, наглядно иллюстрирующих негативное воздействие рекреационной

деятельности, выступали «дикие» туристические стоянки побережья озера Селигер (рис. 3): стоянка 1 – на южной окраине дер. Слобода (в границах прибрежной защитной полосы и земельного участка сельскохозяйственного назначения с кадастровым номером 69:24:0000014:930, площадь – 2930 м²); стоянка 2 – на южной окраине дер. Слобода (в границах прибрежной защитной полосы и земельного участка сельскохозяйственного назначения с кадастровым номером 69:24:0000014:1609, площадь – 3800 м²); стоянки 3–5 – между дер. Слобода и Никола Рожок (в границах



Рис. 3. Расположение изучаемых «диких» туристических стоянок на озере Селигер

прибрежной защитной полосы и земельного участка сельскохозяйственного назначения с кадастровым номером 69:24:0000014:1608, площади – 1690, 7410 и 1290 м²).

Основные категории повреждения поверхности почвенного покрова определяли в соответствии с Временной методикой определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временными нормами этих нагрузок¹⁰: I – слабо измененная поверхность; II – средне измененная поверхность; III – сильно измененная поверхность; IV – кострища; V – участки, захламленные мусором. Соотношения площадей различных категорий уста-

¹⁰ Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок. М.: Изд-е Госкомлеса СССР, 1987. 34 с.

навливали трансектным методом при длине трансект не менее 50 м на каждые 100 м² обследуемой площади.

Размер вреда, причиненного почвенному покрову местами несанкционированного размещения отходов на туристических стоянках 1 и 4 (рис. 3), исчисляли в соответствии с п. 10 Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды¹¹.

Результаты исследования

Рекреационное воздействие является многогранным в силу трансформации в той или иной степени всех компонентов природных комплексов – почвы, воды, растительного и животного мира [1, 2, 6, 7, 10, 13–15, 17, 21]. Выделяют как прямое воздействие ту-

¹¹ Приказ Минприроды России от 08.07.2010 № 238 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды».

ризма на окружающую среду, так и косвенное [11, 24]. Прямое воздействие включает: уничтожение естественных условий обитания (вырубка леса, вытаптывание и т. д.); истребление представителей флоры и фауны в процессе охоты, рыболовства; привнесение и распространение инфекций, заболеваний через продукты жизнедеятельности человека и хозяйственную деятельность (экскременты, органические пищевые отходы); вмешательство в естественные процессы жизнедеятельности растений и животных путем их кормления, наблюдения за ними, содержания в искусственно созданных условиях, разрушение гнезд, нор, физического воздействия на объекты животного мира (шумовое, световое загрязнение) и т. д. К косвенному воздействию относится: антропогенное загрязнение атмосферного воздуха, почвы и поверхностных вод, захламление территории отходами производства и потребления; изменение естественной среды обитания в результате хозяйственной деятельности; искусственное разведение животных, биологические инвазии, создание человеком животных и растений с заданными свойствами [5]. Потенциальное воздействие туристической деятельности на озерные экосистемы более подробно отражено в таблице 2.

Отдыхающие, особенно при неорганизованном отдыхе, оказывают негативное влияние на береговую и прибрежную зоны, а также на открытую поверхность озера [9, 16, 18–23]. В береговой зоне данных территорий вследствие вытаптывания отдыхающими и воздействия транспортных средств на почвенный покров происходит изменение почвенно-растительного комплекса: уплотнение и истирание верхнего го-

ризонта почвы, снижение ее влажности, воздухо- и водопроницаемости, нарушение структуры, развитие эрозионных процессов. Происходит заметная трансформация растительного покрова, которая выражается в его механических повреждениях, снижении обилия и проективного покрытия, смене видового состава и экологических групп как травянистой, так и древесной растительности. Так, на территории всех изученных в данном исследовании туристических стоянок повреждение поверхности почвенного покрова относится к III категории – сильно измененная поверхность (тропы и участки с полностью вытоптаным напочвенным покровом и подстилкой). При этом площадь таких вытоптаных участков составила более 90% (рис. 4).

Наибольший ущерб природной среде в береговой зоне Селигера наносит неорганизованный отдых при отсутствии необходимой инфраструктуры (туалетов, контейнеров для сбора отходов). При этом один из самых распространенных типов нарушений – загрязнение почвенного покрова отходами. На рис. 5 представлена динамика основных видов экологических правонарушений в Тверской области за последние 10 лет. По данным Министерства природных ресурсов и экологии Тверской области на фоне общего снижения количества зарегистрированных правонарушений в их структуре по-прежнему преобладают нарушения в области обращения с отходами. Так, согласно информации, представленной Управлением Россельхознадзора по Тверской и Ярославской областям, в 2023 году количество зарегистрированных фактов загрязнения сельскохозяйственных земель от-

Табл. 2

Прямое и косвенное воздействие туристической деятельности на озера [15]

Прямое воздействие	Косвенное воздействие
Поступление биогенных элементов	Поступление питательных веществ с водосбора
Сброс жидких отходов	Поступление сточных и ливневых вод
Бактериальное загрязнение	Увеличение внутренней нагрузки на водоем
Перемешивание донных отложений	Химическое загрязнение
Волновые эффекты	Повышение уровня паводковых вод
Уничтожение водных растений	Изменение уровня воды
Изменение и уничтожение береговой растительности	Исчезновение отдельных видов водной растительности
Интродукция чужеродных видов	Снижение биоразнообразия
Изменения в видовом составе рыб	
Разведение рыбы	
Береговые сооружения (жилье, причалы для лодок и т. п.)	
Захламление мусором	Забор воды (из озера или подземных вод)
Разрушение берегов	Изменение системы землепользования на водосборе
Нарушение среды обитания диких животных	Рост уровня урбанизации
	Уплотнение почвенного покрова
	Эмиссия газов
	Уничтожение местообитаний животных и растений



Рис. 4. Почвенно-растительный покров на месте «диких» туристических стоянок (локации указаны на рис. 4) оз. Селигер (фото авторов, 2023 год)

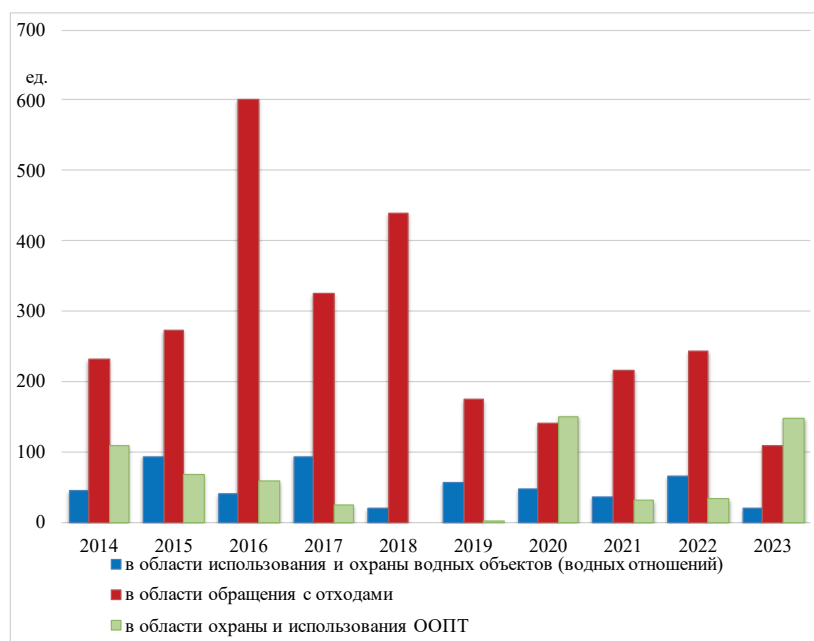


Рис. 5. Число экологических правонарушений в Тверской области. Источник: составлено авторами на основе данных Министерства природных ресурсов и экологии Тверской области и Государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» в 2014–2023 годах. - URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady



Рис. 6. Незаконные свалки бытовых отходов вблизи «диких» туристических стоянок 1 и 4 на берегу оз. Селигер (фото авторов, 2023 год)

ходами производства и потребления снизилось на 24% по сравнению с 2020 годом. При этом площадь незаконных свалок увеличилась в 88,4 раза и составила 4862 га¹².

На рис. 6 изображены места несанкционированных свалок бытовых отходов на территории стихийных туристических стоянок 1 и 4 на западном побережье Слободского плеса оз. Селигер. Площадь навалов – 100,2 и 113,3 м². Исчисленный в стоимостной форме размер вреда в результате порчи почв при перекрытии ее поверхности местами несанкционированного размещения отходов составил 287614 руб. и 325216 руб. соответственно.

Для обустройства временных туристических стоянок отдыхающие часто используют растущие по берегам озера деревья (рис. 7) без необходимых на то разрешительных документов, что является, по сути, незаконными рубками.

Так, по данным Министерства лесного комплекса Тверской области, в 2023 году на землях лесного

фонда региона выявлено 85 фактов незаконной рубки лесных насаждений с объемом вырубленной древесины 5116,1 м³; причиненный ущерб лесному фонду составил 105 млн 569 тыс. руб.¹³ При этом количество незаконных рубок на территории Осташковского лесничества составило 8, объем вырубленной древесины – 25 368 м³, сумма ущерба – 8,1 млн руб.¹⁴ Динамика количества нарушений в области лесопользования в Осташковском лесничестве Тверской области за последние 10 лет приведена на рис. 8.

На основании анализа представленных данных следует отметить большой объем древесины, утраченной из-за незаконных рубок лесных насаждений в 2021 и 2022 годах, на фоне отсутствия роста числа нарушений. При этом в период с 2016 по 2022 год четко

¹³ Ежегодный отчет о деятельности Министерства лесного комплекса Тверской области за 2023 год. – URL: <https://минлес.тверскаяобласть.рф/deyatelnost-iogv/egagod-otchet.php>

¹⁴ Отчеты о деятельности в сфере федерального государственного лесного контроля (надзора), лесной охраны на землях лесного фонда на территории Тверской области в 2014–2023 годах. – URL: <https://минлес.tverreg.ru/deyatelnost-iogv/federalnyy-gosudarstvennyy-lesnoy-nadzor/otcet-federalnyy-gosudarstvennyy-lesnoy-nadzor.php>

¹² Отчеты о деятельности Управления Россельхознадзора по Тверской и Ярославской областям за 2020–2023 гг. // Официальный сайт. – URL: <https://69.fsvps.gov.ru/files/>.



Рис. 7. Постройки на территории «диких» туристических стоянок 1 и 2 на берегу оз. Селигер (фото авторов, 2023 год)

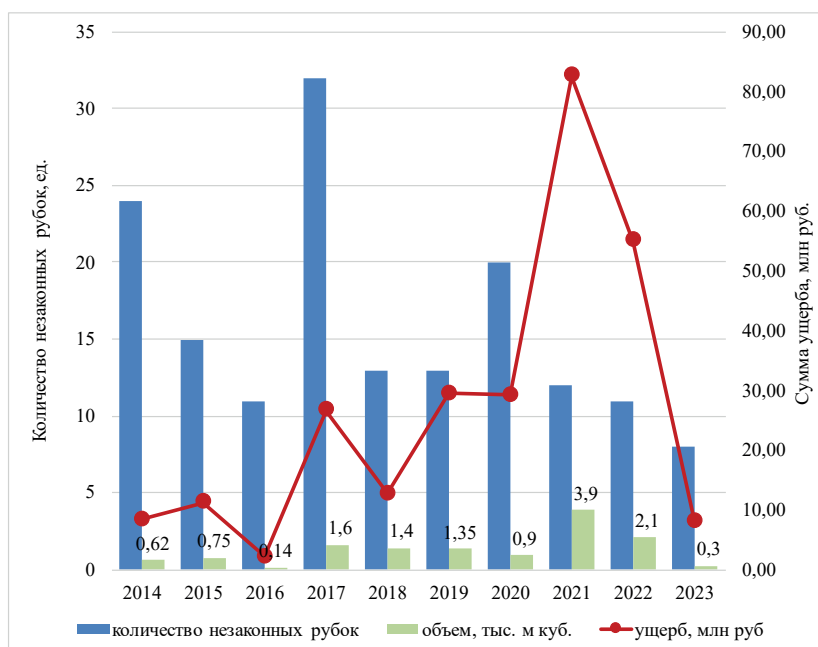


Рис. 8. Число и объем лесонарушений в Осташковском лесничестве Тверской области. Источник: составлено авторами на основе данных отчетов о деятельности в сфере федерального государственного лесного контроля (надзора), лесной охраны на землях лесного фонда на территории Тверской области за 2014–2023 годы. – URL: <https://minles.tverreg.ru/deyatelnost-iogv/federalnyy-gosudarstvennyy-lesnoy-nadzor/otcet-federalnyy-gosudarstvennyy-lesnoy-nadzor.php>

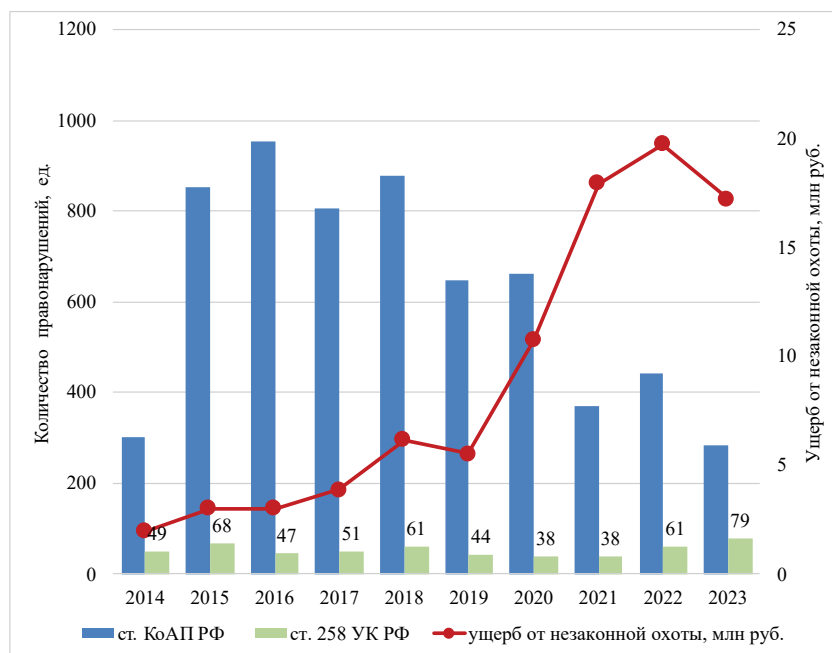


Рис. 9. Число и объем нарушений в области охраны животного мира в Тверской области. Источник: составлено авторами на основе Государственных докладов о состоянии и охране окружающей среды в Тверской области в 2014–2023 годы

прослеживается тенденция увеличения размера взысканий с нарушителей природоохранного законодательства, что свидетельствует о повышении эффективности работы надзорных органов.

От «дикого» туризма страдает наряду с растительностью и животный мир. Присутствие людей может вызвать существенные нарушения в поведении диких животных: шум от портативных радиоприемников, моторных лодок и автотранспорта является сильнейшим фактором беспокойства для диких животных и птиц.

Кроме этого, массовая рекреация сопровождается фактами незаконной охоты. На рис. 9 приведена динамика нарушений законодательства в сфере охраны объектов животного мира Тверской области.

Положительным с точки зрения усиления работы по привлечению к ответственности за причинение вреда животному миру представляется неуклонный рост взысканий с нарушителей законодательства в этой сфере с 2014 по 2023 год. Однако необходимо подчеркнуть, что высокий уровень экологической преступности за рассматриваемый период времени при этом не снижается. Так, в 2023 году государственными инспекторами охотничьего надзора выявлено 285 административных правонарушений, а органами внутренних дел по выявленным фактам браконьерства возбуждено 79 уголовных дел по признакам преступления, предусмотренного ст. 258 УК РФ «Незаконная охота». Взыскания по ущербу объектам животного мира от незаконных действий и от хозяйственной

деятельности человека составили 17 млн 210 тыс. рублей¹⁵.

Еще один вид экологических правонарушений, совершаемых туристами в прибрежной зоне и открытой акватории оз. Селигер, относится к рыболовству и сохранению водных биологических ресурсов. Так, по данным Отдела государственного контроля, надзора и охраны водных биологических ресурсов по Тверской области в 2023 году на водных объектах рыбохозяйственного значения было выявлено 1624 административных проступка в области рыболовства и сохранения водных биологических ресурсов, в том числе 1158 – нарушения правил рыболовства. Возбуждено 36 уголовных дел по ст. 256 УК РФ «Незаконная добыча (вылов) водных биологических ресурсов». При этом сумма ущерба составила 1 млн 168 тыс. руб.¹⁶

Экологические последствия любительского рыболовства связаны наряду с прямым истреблением рыбных ресурсов также с поступлением загрязнений в водоем. Рыболовы-любители сбрасывают в воду бытовые отходы и подкормки для рыбы, вместе с которыми в водный объект попадают взвешенные вещества, аммонийный азот, минеральный фосфор, хлориды и другие вещества [3].

¹⁵ Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Тверской области в 2023 году. – Тверь, 2024. 135 с.

¹⁶ Сайт Московско-Окского Территориального управления Федерального агентства по рыболовству. – URL: <http://www.moktu.ru/ob-upravlenii/territorial-divisions/po-tverskoj-oblasti>



Рис. 10. Прибрежно-водная растительность в районе государственного природного заказника «Муравьиный заказник Селигерский» (А) и на территории «дикой» туристической стоянки 2 (Б) (фото авторов, 2023 год)

В прибрежной зоне озера за счет выноса с поверхностным стоком взвешенных, биогенных и загрязняющих веществ с мест туристических стоянок усиливается заиление и появляются признаки эвтрофирования. Маломерный флот с моторами вызывает загрязнение воды нефтепродуктами, приводит к уничтожению литоральных фитоценозов в результате механического воздействия (винты моторов, вытаскивание лодок), способствует взмучиванию донных отложений и обогащению воды биогенными элемен-

тами. Под влиянием загрязнения наряду с изменением физико-химических параметров природных вод происходят изменения в качественном и количественном составе прибрежно-водных фитоценозов: одни виды, более чувствительные, исчезают, другие, более устойчивые, появляются и достигают значительного развития. Одним из достоверных показателей эвтрофирования водоема является появление зарастания с массовым развитием видов, нуждающихся в повышенном содержании питательных веществ [8]. Так,

в наиболее популярных у «диких» туристов местах оз. Селигер происходит вытеснение фонового вида – тростника обыкновенного *Phragmites australis* (Cav.) такими видами, как манник большой *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., рдест гребенчатый *Potamogeton pectinatus* L., горец земноводный *Polygonum amphibium* L., камыш озерный *Scirpus lacustris* L. и рогоз широколистный *Typha latifolia* L. (рис. 10).

Заключение

В условиях напряженной геополитической ситуации в мире внутренний туризм становится неотъемлемой, а подчас и ведущей частью социально-экономического развития регионов России. Однако массовая рекреация – это возможный, а часто и реальный фактор ухудшения состояния природной среды. Основной особенностью туристической отрасли в Тверской области в целом и на территории озера Селигер в частности является значительное преобладание «дикого» туризма над регулируемым. Недостаток гостиничного фонда и отсутствие благоустроенной инфраструктуры приводит к неравномерному распределению отдыхающих по берегам озера и их скоплению в наиболее удобных местах, что влечет за собой чрезмерное увеличение рекреационной нагрузки.

Наиболее распространенными видами нарушений природоохранного законодательства в Тверской области, особенно в местах неорганизованного отдыха, таких как оз. Селигер, являются загрязнение почвенного покрова отходами потребления, незаконные рубки и браконьерство. При этом позитивной тенденцией за последние десять лет является повышение результативности работы надзорных органов по привлечению к ответственности за причиненный экосистемам вред. Однако для минимизации негативного воздействия рекреации и сохранения уникальных природных комплексов оз. Селигер необходима системная и комплексная работа по снижению числа правонарушений. Весьма важным представляется принятие административных мер и управленческих решений по ограничению и регулированию туристических потоков на данной территории, основанных на объективной оценке реальной и определении допустимой рекреационной нагрузки на природную систему «водосбор-озеро». Помимо соблюдения нормативов рекреационных нагрузок в местах массового неорганизованного отдыха, следует благоустроить береговые и прибрежные зоны, наладить систематический вывоз отходов и усилить контроль соблюдения природоохранного законодательства.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Астанин ДМ. Институциональные факторы развития экологического туризма. Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021;7(2):128-45.
2. Банникова ОИ, Мердешева ЕВ, Шитов АВ, Черемисин АА. Воздействие рекреационной деятельности на природные объекты Республики Алтай. Научный вестник Арктики. 2023; (15):93-100.
3. Васильев ЮС, Кукушкин ВА. Использование водоемов и рек в целях рекреации. Л.; 1988.
4. Емельянов АГ, Тихомиров ОА, Муравьева ЛВ. Экологический мониторинг как предпосылка для рационального использования рекреационных ресурсов региона (на примере Тверской области). Проблемы региональной экологии. 2014;(4):143-6.
5. Жаркова ЕС. Воздействие туризма (рекреации) на природный комплекс: к проблеме прогнозирования последствий. Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 9: Исследования молодых ученых. 2015;(13):50-3.
6. Кучумов АВ, Сафронов МА, Богров ИВ, Еремичева ПЮ. Исследование проблемы антропо-

генного влияния в экологическом туризме. Экономический вектор. 2024;36(1):85-91.

7. Оборин МС. Отрицательные последствия массового туризма для принимающих территорий. Сервис plus. 2020;14(1):18-26.
8. Опекунова МГ. Биоиндикация загрязнений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2016.
9. Прыткова МЯ. Научные основы и методы восстановления озерных экосистем при различных видах антропогенного воздействия. СПб.: Наука; 2002.
10. Чупина ИП, Зарубина ЕВ, Симачкова НН, Журавлева ЛА, Фатеева НБ. Охрана окружающей среды как основное направление экологического туризма. Int Agricult J. 2024;67(1).

Общий список литературы/Reference List

1. Astanin DM. [Institutional factors development of ecological tourism]. Geopolitika i Ekogeodinamika Regionov. 2021;7(2):128-45. (In Russ.)
2. Bannikova OI, Merdesheva YeV, Shitov AV, Cheremisin AA. [The impact of recreational activities on natural objects of the Altai Republic]. Nauchnyi Vestnik Arktiki. 2023;(15):93-100. (In Russ.)

3. Vasilyev YuS, Kukushkin VA. Ispolzovaniye Vodoyemov i Rek v Tselyakh Rekreatsii. Leningrad; 1988. (In Russ.)
4. Yemelyanov AG, Tikhomirov OA, Muravyeva LV. [Environmental monitoring as a prerequisite for the rational use of recreational resources of a region: a case study of the Tver region]. *Problemy Regionalnoy Ekologii*. 2014;(4):143-6. (In Russ.)
5. Zharkova YeS. [Impact of tourism influence (recreation) on natural systems: toward forecast of consequences]. *Vestnik Volgogradskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya 9: Issledovaniya Molodykh Uchenykh*. 2015;(13):50-3. (In Russ.)
6. Kuchumov AV, Safronov MA, Bogrov IV, Yeremicheva PYu. [Research of the problem of anthropogenic influence in ecological tourism]. *Ekonomicheskii Vektor*. 2024;36(1):85-91. (In Russ.)
7. Oborin MS. [Negative consequences of mass tourism for host territory]. *Servis Plus*. 2020;14(1):18-26. (In Russ.)
8. Opekunova MG. *Bioindikatsiya Zagryazneniy*. Saint Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo Universiteta; 2016. (In Russ.)
9. Prytkova MYa. *Nauchnye Osnovy i Metody Vosstanovleniya Ozer nykh Ekosistem pri Razlichnykh Vidakh Antropogennogo Vozdeystviya*. Saint Petersburg: Nauka; 2002. (In Russ.)
10. Chupina IP, Zarubina YeV, Simachkova NN, Zhuravleva LA, Fateyeva NB. [Environmental protection as a main direction of ecological tourism]. *Int Agricult J*. 2024;67(1). (In Russ.)
11. Adewumi IB, Usui R, Funck C. Perceptions of multiple stakeholders about environmental issues at a nature-based tourism destination: the case of Yakushima Island, Japan. *Environments*. 2019;6:93.
12. Asha E. Impact of tourism on environment: responding to global challenges. *Pauline J Res Stud*. 2013;1(1):169-82.
13. Baloch QB, Shah SN, Iqbal N. Impact of tourism development upon environmental sustainability: a suggested framework for sustainable ecotourism. *Environ Sci Pollut Res*. 2023;30:5917-30.
14. Briassoulis H. Environmental impacts of tourism: a framework for analysis and evaluation. In: Briassoulis H, van der Straaten J, eds. *Tourism and the Environment*. Environment and Assessment, vol 6. Springer, Dordrecht; 2000.
15. Dokulil M. Environmental impacts of tourism on lakes. In: Ansari A, Gill S, eds. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control*. Springer, Dordrecht; 2014.
16. Furgala-Selezniow G, Jankun-Woźnicka M, Kruk M, Omelan AA. Land use and land cover pattern as a measure of tourism impact on a lakeshore zone. *Land*. 2021;10:78.
17. Liu Z, Lan J, Chien F, Sadiq M, Nawaz MA. Role of tourism development in environmental degradation: a step towards emission reduction. *J Environ Manage*. 2022;1;303:114078.
18. Napiórkowska-Krzebietke A, Dunalska JA, Bogacka-Kapusta E. Ecological implications in a human-impacted lake. A case study of cyanobacterial blooms in a recreationally used water body. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20:5063.
19. Perret-Gentil N, Rey F, Gobet E, Tinner W, Heiri O. Human impact leads to unexpected oligotrophication and deepwater oxygen increase in a Swiss mountain lake. *Holocene*. 2023;34: 189-201.
20. Ramazanov M. Tourism and water resources: interrelationships and consequences. The case of Kazakhstan. *Eur J Tourism Res*. 2020;26: 2611.
21. Saadi S, Karimzadeh H, Rahimi A. Complexity and the ecological impacts of tourism on wetlands ecosystem and rural sustainability: a case study of Zrebar wetlands. *Am J Agricult Biol Sci*. 2023;18:22-38.
22. Senetra A, Dynowski P, Cieślak I, Żróbek-Sokolnik A. An evaluation of the impact of hiking tourism on the ecological status of alpine lakes. A case study of the valley of Dolina Pięciu Stawów Polskich in the Tatra mountains. *Sustainability*. 2020;12:2963.
23. Serafin A, Grzywna A, Augustyniak R, Bronowicka-Mielniczuk U. Nutrients from beach recreation in the context of the limnological status of a mesotrophic lake. *J Water Land Develop*. 2022;54(VII-IX):160-71.
24. Sunlu U. Environmental impacts of tourism. In: Camarda D (ed.), Grassini L (ed.). *Local Resources and Global Trades: Environments and Agriculture in the Mediterranean Region*. Bari: CIHEAM; 2003. p. 263-70.





Подписано в печать **15.04.2025.**

Дата выхода в свет **27.04.2025.**

Отпечатано в **ИП Лесник**

197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 15 Лит 3 пом. 101-103

Тел.: **+7 (812) 649-73-14.**

Тираж **700 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**