

2026

Т. 18, № 3

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ
И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ



БИОСФЕРА

ISSN 2077-1371 / www.21bs.ru



**ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО
УГЛЕРОДА В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ
И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ
ПО ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИМ
ПРОВИНЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ
САХА (ЯКУТИЯ)**

А.Г. Шепелев

ORGANIC CARBON STORAGE
IN ACTIVE LAYER AND PERMAFROST
BY PHYSICAL-GEOGRAPHICAL
PROVINCES OF THE REPUBLIC
OF SAKHA (YAKUTIA)

A.G. Shepelev

**НОВАЯ ДЛЯ НАУКИ ФОРМА
ГРИБОВ MUTINUS RAVENELII
(СЕМЕЙСТВО PHALLACEAE),
НАЙДЕННАЯ НА ВОСТОКЕ
МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

Е.Ю. Касап, Д.В. Гришин

A NOVEL FORM OF MUTINUS
RAVENELII STINKHORN
(PHALLACEAE) FOUND IN THE EAST
OF THE MOSCOW REGION

E.Yu. Kasap, D.V. Grishin

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ОРГАНОГЛИН ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ
ВОД И ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ
УГЛЕВОДОРОДАМИ НЕФТИ**

М.М. Герцен, Л.В. Переломов

PROSPECTS FOR USING
ORGANOCLAYS TO REMEDIATE
WATER AND SOILS CONTAMINATED
WITH PETROLEUM HYDROCARBONS

M.M. Gertsen, L.V. Perelomov



ФОТО: Е.Ю. КАСАП, Д.В. ГРИШИН «НОВАЯ ДЛЯ НАУКИ ФОРМА ГРИБОВ MUTINUS RAVENELII
(СЕМЕЙСТВО PHALLACEAE), НАЙДЕННАЯ НА ВОСТОКЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ»



БИОСФЕРА

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

Том 18, № 3

Санкт-Петербург
2026



BIOSPHERE

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

Vol. 18, No. 3

Saint Petersburg
2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

EDITORIAL BOARD

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР EDITOR-IN-CHIEF

Г.С. РОЗЕНБЕРГ (ТОЛЬЯТТИ) G.S. ROZENBERG (TOGLIATTI)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

А.Г. ГОЛУБЕВ (С.-ПЕТЕРБУРГ) A.G. GOLUBEV (SAINT PETERSBURG)

СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:

И.М. ТАТАРНИКОВА

EDITORIAL SECRETARY:

I.M. TATARNIKOVA

ДИЗАЙН: Е.А. КОРЧАГИНА

DESIGN: YE.A. KORCHAGINA

ВЕРСТКА: Т.А. СЛАЩЕВА

LAYOUT: T.A. SLASCHEVA

Е.В. Абакумов (С.-Петербург) E.V. Abakumov (Saint Petersburg)

Э.В. Баркова (Москва) E.V. Barkova (Moscow)

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

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

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

В.В. Глунов (Новосибирск) V.V. Glupov (Novosibirsk)

М.Д. Голубовский (Окленд, США) M.D. Golubovsky (Oakland, CA, USA)

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 (Birobikan)

О. Чертов (Бинген-на-Рейне, Германия) O. Chertov (Bingen am Rhein, Germany)

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

Электронная версия:

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

POSTAL ADDRESS:

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

Online version:

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

СОДЕРЖАНИЕ

A3

СОДЕРЖАНИЕ
CONTENTS

264

ПРИРОДА / NATURE

206

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ
РАЗМЕЩЕНИЯ ОЧАГОВ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ
ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ НА ТЕРРИТОРИИ
КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ**
**Д.А. Демидко, А.И. Татаринцев, С.С. Кулаков, О.А.
Слинкина, С.М. Сулытсон**
*SPATIOTEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE
DISTRIBUTION OF THE FOCI OF MASS REPRODUCTION
OF HARMFUL ORGANISMS IN THE TERRITORY OF THE
KRASNOYARSK REGION*
*D.A. Demiko, A.I. Tatarintsev, S.S. Kulakov, O.A. Slinkin,
S.M. Sultson*

275

225

**ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В
ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ
ПОРОДАХ ПО ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИМ
ПРОВИНЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)**
А.Г. Шепелев
*ORGANIC CARBON STORAGE IN ACTIVE LAYER AND
PERMAFROST BY PHYSICAL-GEOGRAPHICAL PROVINCES
OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)*
A.G. Shepelev

239

**НОВАЯ ДЛЯ НАУКИ ФОРМА ГРИБОВ *MUTINUS
RAVENELII* (СЕМЕЙСТВО PHALLACEAE),
НАЙДЕННАЯ НА ВОСТОКЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ**
Е.Ю. Касап, Д.В. Гришин
*A NOVEL FORM OF *MUTINUS RAVENELII* STINKHORN
(PHALLACEAE) FOUND IN THE EAST OF THE MOSCOW
REGION*
E.Yu. Kasap, D.V. Grishin

285

ПРАКТИКА / PRACTICE

250

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНОГЛИН
ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ВОД И ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ
УГЛЕВОДОРОДАМИ НЕФТИ**
М.М. Герцен, Л.В. Переломов
*PROSPECTS FOR USING ORGANOCLAYS TO REMEDIATE
WATER AND SOILS CONTAMINATED WITH PETROLEUM
HYDROCARBONS*
M.M. Gertsen, L.V. Perelomov

**РАЗРАБОТКА МИКРОБНОГО КОНСОРЦИУМА НА
ОСНОВЕ *PSEUDOMONAS* И *ACINETOBACTER* ДЛЯ
РЕМЕДИАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЧВ**
**Н.В. Фотина, Ю.Р. Серазетдинова, Е.Р.
Фасхутдинова, И.С. Миленьева, Л.К. Асякина,
Е.А. Жидкова**
*DEVELOPMENT OF A MICROBIAL CONSORTIUM
BASED ON *PSEUDOMONAS* AND *ACINETOBACTER*
FOR REMEDIATION OF MAN-MADE SOILS*
*N.V. Fotina, Y.R. Serazetdinova, E.R.
Faskhutdinova, I.S. Milentyeva, L.K. Asyakina,
E.A. Zhidkova*

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
ВНЕКОРНЕВОЙ ПОДКОРМКИ ГОРОХА
ПОСЕВНОГО (*PISUM SATIVUM*) ЦИНКОМ В
ВИДЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА НА
УСТОЙЧИВОСТЬ К СТРЕССУ, ВЫЗВАННОМУ
ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ПОЧВЫ СВИНЦОМ**
**О.В. Ракова, А.М. Угаев, С.С. Дёмин, Д.Ю.
Липухина, Е.А. Петрова, Т.Г. Крупнова**
*LABORATORY STUDIES OF THE INFLUENCE OF
THE FOLIA FEEDING OF GARDEN PEAS (*PISUM
SATIVUM*) WITH ZINC APPLIED AS ZINC OXIDE
NANOPARTICLES ON RESISTANCE TO STRESS
CAUSED BY SOIL CONTAMINATION WITH LEAD*
*O.V. Rakova, A.M. Ugaev, S.S. Domin, D.Y.
Lipukhin, E.A. Petrova, T.G. Krupnova*

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
р. ВОЛГИ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ В РАЙОНЕ
ИЛЬИНСКИХ НЕФТЕЯМ**
Нгуен Нгок Ань, И.В. Мельник
*HEAVY METAL POLLUTION OF WATER AND
BOTTOM SEDIMENTS IN THE VOLGA RIVER IN THE
ILYINSKY OIL RESERVOIRS AREA*
Nguyen Ngok An, I.V. Melnik

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ОЧАГОВ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЗМОВ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Д.А. Демидко*, А.И. Татаринцев, С.С. Кулаков,

О.А. Слинкина, С.М. Сультсон

СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

Эл. почта: sawer_beetle@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.05.2026; принята к печати 07.08.2026

Результаты лесопатологического мониторинга позволяют выделить на территории Красноярского края по меньшей мере шесть кластеров, различающихся по таксономическому составу вредных организмов, наносящих ущерб лесам. В разных лесничествах ведущая роль в этом принадлежит полиграфу уссурийскому (либо самому по себе, либо в составе группы таксонов, повреждающих темнохвойные древостои), сибирскому шелкопряду, серой лиственничной листовёртки и группе таксонов, трофически связанных со светлохвойными породами. То, какие таксоны вредителей леса будут наиболее вредоносны, в первую очередь зависит от породного состава лесов. Определённую роль в этом, однако, играют средний возраст древостоев и географическое положение территории. Оценка уровня напряжённости лесопатологической угрозы зависит преимущественно от интенсивности ведения лесного хозяйства. Тем не менее, таксономический состав вредных организмов вносит в него существенный вклад. Исторические данные позволяют предполагать, что современные оценки уровня лесопатологической угрозы могут быть не вполне адекватными. Но даже накопленные с 2007 года данные лесопатологического мониторинга указывают, что необходима переоценка современной классификации лесничеств Красноярского края по степени угрозы со стороны вредителей и болезней леса.

Ключевые слова: вредители леса, болезни леса, Красноярский край, государственный лесопатологический мониторинг

SPATIOTEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE DISTRIBUTION OF THE FOCI OF MASS REPRODUCTION OF HARMFUL ORGANISMS IN THE TERRITORY OF THE KRASNOYARSK REGION

D.A. Demiko*, A.I. Tatarintsev, S.S. Kulakov, O.A. Slinkina, S.M. Sultson

M.F. Rechetnev Siberian State University, Krasnoyarsk, Russia

Email: sawer_beetle@mail.ru

The results of the pathological monitoring allow to identify on the territory of Krasnoyarsk Krai at least six clusters, which differ in taxonomic composition of harmful organisms that cause damage to forests. In various forested areas, the leading role here belongs to the four-eyed fir bark beetle *Polygraphys proximus* (either on its own or as part of a group of taxa damaging dark-stemmed shrubs), the Siberian silkworm, the grey lignite leaf cutter and a group of taxa, trophically related to the light coniferous trees. Which forest pest taxa will be the most harmful depends primarily on the composition of the forest. However, the average age of the trees and the geographical location of the area also play a role. An estimate of the level of stress from a forestry threat depends primarily on the carefulness of forest management. However, the taxonomic composition of harmful organisms makes a substantial contribution to it. Historical evidence suggests that current estimates of the level of the pathological threat to a forest-related may not be quite adequate; but even forest pathology monitoring data collected since 2007 suggest that it is necessary to reassess the current classification of forest districts in the Krasnoyarsk Region according to the degree of threat from forest pests and diseases.

Keyword: forest pests, forest diseases, Krasnoyarsk Region, state forest pathology monitoring

Введение

Красноярский край является вторым по площади регионом Российской Федерации. Его территория из-за огромной меридиональной протяжённости включает в себя широкий спектр природных зон, от арктических пустынь до степей [32]. В его современных гра-

ницах он обладает самой большой лесопокрытой площадью среди регионов России [2]. Такое разнообразие условий определяет в свою очередь разнообразие негативно влияющих на лесные экосистемы факторов, включая биотические. Только хвоелистогрызущих и стволовых вредителей, вспышки массового размно-

жения которых известны с территории края, насчитывается свыше 30 видов [4, 5, 8-11, 14, 16, 21, 22, 25-27, 29, 37, 38, 43]. Заметный ущерб лесам наносят и возбудители стволовых и корневых гнилей [36, 37, 50, 51].

Степень и масштаб нарушений экосистем, причиняемых разными видами вредных организмов (ВО), сильно различаются даже при массовых размножениях одного и того же вида. Так, дефолиация древостоев с преобладанием пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb. и кедра сибирского *Pinus sibirica* Du Tour, вызванная сибирским шелкопрядом *Dendrolimus sibiricus* Tschetv., может ограничиться как минимальными последствиями для древостоя, так и полной его гибелью [17]. Принципиально другие последствия производит поражение древостоя стволовыми гнилями. Оно имеет хронический характер и проявляется не в быстром (в течение нескольких лет) отмирании древостоя, а в снижении товарной ценности древесины и устойчивости к воздействию сильных ветров [20]. Из-за этих и ряда других различий между воздействиями разных ВО на лесные экосистемы прямое сравнение их вклада в динамику состояния лесов крайне затруднено.

Другая причина, не позволяющая всесторонне и полноценно исследовать вклад разных видов ВО в изменение состояния лесных экосистем – это логистические затруднения. При площади лесов Красноярского края, почти достигающей 100 млн га [2], плотность автодорог в нём равна лишь 0,0137 км на кв. км¹.

Компромисс между полнотой данных о воздействии ВО на леса Красноярского края и точностью этих данных достигается при анализе результатов государственного лесопатологического мониторинга (ГЛПМ). При его проведении собираются данные о разных видах ВО, что позволяет дать сравнительную оценку их вклада в изменение состояния лесов региона.

Цель нашей работы – по материалам ГЛПМ оценить вероятность появления очагов массового поражения лесов ВО, масштабы повреждения, наносимые отдельными таксономическими группами ВО лесам Красноярского края и закономерности их распределения в пространстве.

Материалы и методы Особенности региона

Леса Красноярского края, несмотря на большую площадь, характеризуются малым разнообразием видов-лесообразователей. Около трети лесопокрытой площади занято лиственничниками (*Larix* spp.). Свыше 10% площади покрывают леса с преобладанием как берёзы (*Betula* spp.), так и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Остальная территория занята кедром сибирским (*P. sibirica*), елью (*Picea obovata*

Ledeb.), пихтой (*A. sibirica*) и осиной (*Populus tremulae* L.). Сообщества с преобладанием других видов деревьев и кустарников представлены незначительно [2].

Рельеф региона сложный. Основные геоморфологические единицы в пределах территории, на которой возможно произрастание лесов – Западносибирская равнина, Среднесибирское плоскогорье и Саянские горы. В пределах Западносибирской равнины климат формируется широтной зональностью, а в горных частях региона также высотной поясностью, влиянием горных хребтов на распределение влаги и циркуляцию воздуха и рядом других связанных с рельефом факторов. В целом климат континентальный, причём в восточной части края континентальность выражена сильнее по сравнению с западной. Теплообеспеченность возрастает с севера на юг. Осадки распределяются сложнее, максимальное их количество приходится на Саянские горы, расположенные на юге края, минимальное – на межгорные котловины и северо-восточные части региона [15, 32].

Особенности климата и рельефа сказываются на распределении в пространстве видов-лесообразователей. В лесотундре и северной тайге Среднесибирского плоскогорья господствуют лиственничники, в условиях Западносибирской равнины значительные площади занимают также ельники, кедровники и березняки. Леса среднетаёжной подзоны на востоке Среднесибирского плоскогорья преимущественно лиственничные, западнее значительна доля сосняков, ельников, кедровников и березняков, а на Енисейском кряже (западная часть Среднесибирского плоскогорья) и пихтовых лесов. В южной тайге преобладают кедр, пихта, сосна и берёза, в Приангарье значительна доля лиственничных лесов. Сравнительно широко в южной тайге распространены осиновые древостои [19, 32, 40]. Подтаёжные, лесостепные и степные леса главным образом сосновые и берёзовые, значительна в подтайге и лесостепи доля осинников. Леса Саян в пределах Красноярского края преимущественно кедровые и пихтовые, но нередко смена лесообразующей породы на берёзу, а на небольших высотах при хорошей влагообеспеченности и на осину [19, 32, 42].

На территории Красноярского края выделено 61 лесничество. Согласно Лесному плану края², в нём выделено семь лесорастительных районов: Среднесибирский притундровых лесов, Среднесибирский плоскогорный таёжный, Нижнеангарский, Среднесибирский подтаёжно-лесостепной, Западносибирский южнотаёжный, Алтае-Саянский горно-таёжный, Алтае-Саянский горно-лесостепной (рис. 1).

¹ Федеральная служба государственной статистики. Транспорт [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 03.09.2024).

² Губернатор Красноярского края. Об утверждении лесного плана Красноярского края: указ Губернатора Красноярского края от 21.12.2018 №332-уг. URL: <http://www.zakon.krskstate.ru/0/doc/54526> (дата обращения: 02.06.2025).

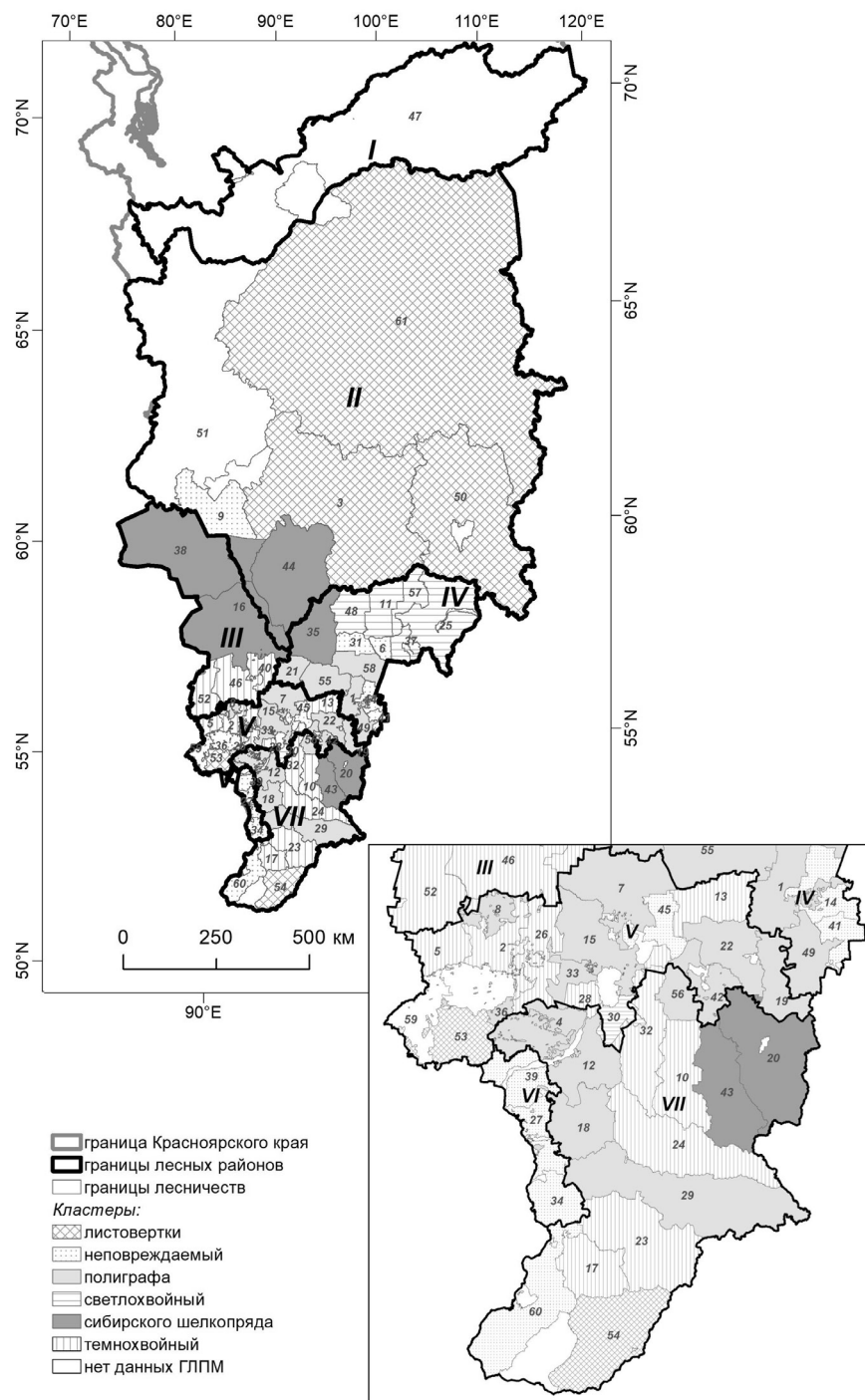


Рис. 1. Границы лесорастительных районов, лесничеств Красноярского края и выделенных кластеров. Лесорастительные районы: I – Среднесибирский притундровых лесов, II – Среднесибирский плоскогорный таёжный, III – Западносибирский южнотаёжный, IV – Нижнеангарский, V – Среднесибирский подтаёжно-лесостепной, VI – Алтае-Саянский горно-лесостепной, VII – Алтае-Саянский горно-таёжный. Лесничества: 1 – Абанское, 2 – Ачинское, 3 – Байкитское, 4 – Балахтинское, 5 – Боготольское, 6 – Богучанское, 7 – Большемурутинское, 8 – Большеулуйское, 9 – Борское, 10 – Верхнеманское, 11 – Гремучинское, 12 – Даурское, 13 – Дзержинское, 14 – Долгомостовское, 15 – Емельяновское, 16 – Енисейское, 17 – Ермаковское, 18 – Идринское, 19 – Иланское, 20 – Ирбейское, 21 – Казачинское, Канское, Каратузское, Кизирское, Кодинское, Козульское, Краснотуранское, Красноярское, Курагинское, Маганское, Манзеньское, Манское, Мининское, Минусинское, Мотыгинское, Назаровское, Невонское, Нижне-Енисейское, Новоселовское, Пировское, Пойменское, Рыбинское, Саянское, Северо-Енисейское, Сухобузимское, Таёжинское, Таймырское, Терянское, Тинское, Тунгусско-Чунское, Туруханское, Тухтетское, Ужурское, Усинское, Усольское, Уярское, Хребтовское, Чунское, Шарыповское, Шушенское, Эвенкийское.

Данные о лесопатологическом состоянии территории

Сведения об очагах повреждения древостоев ВО были взяты из результатов государственного лесопатологического мониторинга (ГЛПМ) за 2007–2023 годы. Агрегированные на уровне лесничеств данные включали видовую принадлежность ВО, повреждаемую древесную породу, площади очагов на начало года, возникших и ликвидированных в текущем году, а также площади очагов, требующих мер борьбы. На основе этих данных мы рассчитали среднюю площадь очагов ВО и вероятность их обнаружения при проведении ГЛПМ в данном году для территории Красноярского края в целом и для каждого лесничества. Кроме того, мы проанализировали, как связано появление очагов с преобладающей древесной породой.

Агрегированные данные о санитарно-оздоровительных мероприятиях (СОМ) из результатов ГЛПМ за 2007–2018 годы включали сведения о повреждающем факторе, повреждаемой породе, площади повреждённых и погибших насаждений на начало года, площади проведённых в лесах санитарно-оздоровительных мероприятий.

Данные о средних возрасте и составе древостоя в лесничестве, принадлежности его или его отдельных частей к лесорастительному району, общей и лесопокрытой площадей, площади защитных лесов, плотности дорожной сети на его территории получены из Лесного плана Красноярского края на 2018–2029 годы³, и при необходимости дополнены данными из лесохозяйственных регламентов лесничеств. Координаты центроидов для территорий лесничеств рассчитаны в геопространственной платформе ArcGIS⁴.

Расчёт показателя напряжённости лесопатологической угрозы (НЛПУ) выполнен согласно методике Рослесхоза⁵:

$$\text{НЛПУ} = \sum_{i=1}^6 k_i F_i \quad (1),$$

где: k_i – коэффициент для i -го показателя, F_i – значение следующих показателей:

объём проведённых санитарно-оздоровительных мероприятий, % от площади повреждённых и погибших насаждений;

суммарная вредоносность ВО (формула 2):

$$\text{Вр} = \sum_{i=1}^n d_i S_i \quad (2),$$

где: d_i – балл вредоносности для i -го вида ВО, S_i – доля площади очагов этого вида от общей площади очагов ВО;

³ Указ Губернатора Красноярского края от 21.12.2018 №332-уг.

⁴ ArcGIS Desktop. Версия 10.8 / Esri. – Редлендс, 2020. URL: arcgis.com (дата обращения: 26.08.2026).

⁵ Рослесхоз. Приказ №1067 (ред. от 30.10.2019) Об установлении лесозащитного районирования в лесах, расположенных на землях лесного фонда, и признании утратившим силу приказа Рослесхоза от 25.04.2017 №179. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest-security-and-protection/docs/> (дата обращения: 20.04.2026).

– объём мероприятий по ликвидации очагов ВО, % от их площади на начало года;

– площадь очагов ВО на начало года, % от лесопокрытой площади;

– площадь погибших и повреждённых насаждений, % от лесопокрытой площади;

– площадь защитных лесов, % от лесопокрытой площади.

В зависимости от величины НЛПУ, лесничества были разделены на группы с сильной, средней и слабой степенью лесопатологической угрозы (см. Результаты).

Баллы вредоносности ВО, использованные в расчётах, взяты из приложения к Приказу Рослесхоза №1067⁵ с учётом районирования лесов. Если лесничество распределено по нескольким зонам, то балл вредоносности брали для зоны, которая занимает в лесничестве наибольшую площадь. Полиграф уссурийский (*Polygraphus proximus* Blandford) рассматривался нами как инвазивный вид с введением соответствующих значений коэффициентов⁶. Также при расчёте НЛПУ принято во внимание то, что территории Таймырского и Туруханского лесничеств находятся в пределах Арктической зоны Российской Федерации⁶.

Обработка данных

Все расчёты были выполнены в среде статистической обработки R 4.3.2⁷.

Для классификации лесничеств по тому или иному признаку мы использовали метод нечёткой кластеризации (функция `fanny` пакета `cluster` 2.1.6) [61]. С помощью этого подхода определяют не принадлежность к кластеру (группе) как таковую, а её вероятность, что позволяет выделять классифицируемые объекты, по своим свойствам схожие с представителями более чем одной группы. Количество кластеров выбирали таким образом, чтобы группы были максимально однородными, а классификация – интерпретируемой. Ключевым при этой процедуре является значение параметра `memb.exp` функции `fanny`, который определяет меру нечёткости. Это значение мы последовательным перебором от 1,0 до 5,0 подбирали так, чтобы выделить хорошо отделённые друг от друга кластеры и в то же время обнаружить объекты, имеющие промежуточное положение между ними.

Связь между характеристиками лесничеств исследовали с помощью факторного анализа. Поскольку

⁶ Президент Российской Федерации. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации: указ Президента Российской Федерации от 02.05.2014 №296. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377> (дата обращения: 20.04.2026).

⁷ R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2023. URL: <https://www.R-project.org/>. (access date: 16.11.2023).

некоторые из них были измерены в порядковой (степень лесопатологической угрозы) или номинальной (принадлежность к кластеру, лесорастительный район) шкале, мы применяли алгоритм факторного анализа для смешанных данных (функция FAMD пакета MASS 7.3-60) [64]. Графический анализ его результатов, облегчающий их интерпретацию, проводили, используя функцию fviz_contrib пакета factoextra 1.0.7 [59]. Факторный анализ позволяет выделить скрытые переменные (главные компоненты, ГК), с которыми в той или иной степени связаны измеренные характеристики объектов. Мерой силы и направления этой связи служат координаты исследуемых признаков в пространстве главных компонент. Сопоставляя величину и знак координат признаков, рассчитанных для каждой ГК, мы выявляли и интерпретировали структуру связей характеристик лесничеств друг с другом.

Для статистических сравнений характеристик (таксационных и прочих) выделенных на предыдущем этапе кластеров мы использовали непараметрические критерии Вилкоксона и Колмогорова-Смирнова (функции wilcox.test и ks.test пакета stats 4.3.2)⁷. Использование двух критериев обусловлено тем, что они дополняют друг друга, так как первый из них проверяет гипотезу о равенстве центров распределений, а второй – о равенстве распределений в целом [44].

Так как мы сравнивали более одной пары объектов, то для корректировки величины уровня значимости, уменьшающей вероятность ложных выводов о существовании различий, использовали метод Беньямини – Хохберга [56], реализованный в среде R⁷.

Результаты

Видовой состав вредных организмов и наносимый ими ущерб

По результатам ГЛПМ на территории Красноярского края с 2007 по 2023 год были обнаружены очаги 36 таксонов ВО. Патогенные грибы вызвали различные заболевания: девять – стволовые гнили, два – корневые гнили, пять – некрозно-раковые болезни. Среди видов насекомых преобладают ксилофаги (стволовые вредители), которых отмечено 17 видов. Из филлофагов (хвоелистогрызущих вредителей) массовые размножения указаны для четырёх видов. Из прочих групп вредных насекомых очаги отмечены только для одного вида минёров (табл. 1).

Очаги рыжего соснового пилильщика были указаны только для 2007 года как образовавшиеся в предыдущий период. Поскольку одной из поставленных задач было исследование вероятности обнаружения очагов отдельных видов ВО, а данные прошлых лет в проанализированных материалах приводятся накопленным

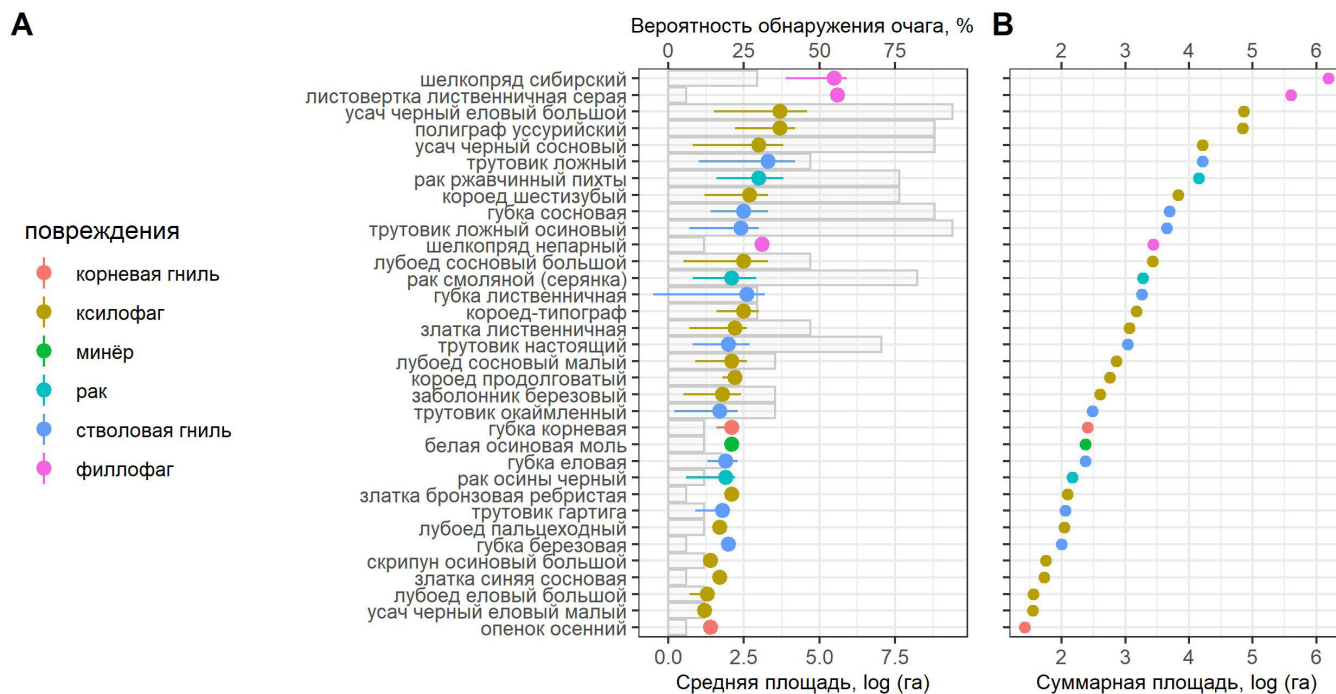


Рис. 2. Характеристика площади и вероятности обнаружения очагов ВО на территории Красноярского края.

(А) Средние площади очагов и вероятности их обнаружения. Серые столбцы – вероятность обнаружения очагов. Цветные точки – средняя площадь древостоев, повреждённых данным ВО на территории лесничества (для тех лет, в которые они были отмечены). Цветные линии, расходящиеся от точек – размах (минимум и максимум) площади повреждённых древостоев.

(В) Суммарные площади очагов на территории Красноярского края за период наблюдения.

Табл. 1.

Вредные организмы, очаги которых обнаружены на территории Красноярского края

Вредный организм или вызванная им болезнь лесобразующих пород	Характер ущерба
Настоящий трутовик <i>Fomes fomentarius</i> (L.) Fr.	стволовая гниль
Берёзовая губка <i>Fomitopsis betulina</i> (Bull.) B.K. Cui, M.L. Han & Y.C. Dai	стволовая гниль
Лиственничная губка <i>Fomitopsis officinalis</i> (Vill.) Bondartsev & Singer	стволовая гниль
Окаймлённый трутовик <i>Fomitopsis pinicola</i> (Sw.) P. Karst.	стволовая гниль
Трутовик Гартига <i>Phellinus hartigii</i> (Allesch. & Schnabl) Pat.	стволовая гниль
Ложный трутовик <i>Phellinus igniarius</i> (L.) Quél.	стволовая гниль
Сосновая губка <i>Porodaedalea pini</i> (Brot.) Murrill	стволовая гниль
Еловая губка <i>Porodaedalea abietis</i> (P.Karst.) Bernicchia & Gorjón	стволовая гниль
Осиновый трутовик <i>Phellinus tremulae</i> (Bondartsev) Bondartsev & P.N. Borisov	стволовая гниль
Опёнок <i>Armillaria mellea</i> s.l.	корневая гниль
Корневая губка <i>Heterobasidion annosum</i> s.l.	корневая гниль
Рак смоляной (рак-серянка) <i>Cronartium pini</i> (Willd.) Jørst.	рак
Чёрный рак осины <i>Entoleuca mammata</i> (Wahlenb.) J.D. Rogers & Y.M. Ju	рак
Ржавчинный рак пихты <i>Melampsorella elatina</i> (Alb. & Schwein.) Arthur	рак
Большой серый усач <i>Acanthocinus aedilis</i> (L.)	ксилофаг
Бронзовая ребристая златка <i>Chrysobothris chrysostigma</i> (L.)	ксилофаг
Большой еловый лубоед <i>Dendroctonus micans</i> (Kug.)	ксилофаг
Шестизубчатый короед <i>Ips sexdentatus</i> (Boern.)	ксилофаг
Продолговатый короед <i>Ips subelongatus</i> (Motsch.)	ксилофаг
Типограф <i>Ips typographus</i> (L.)	ксилофаг
Чёрный сосновый усач <i>Monochamus galloprovincialis</i> (Oliv.)	ксилофаг
Малый чёрный еловый усач <i>Monochamus sutor</i> (L.)	ксилофаг
Большой чёрный еловый усач <i>Monochamus urussovi</i> Fisch.	ксилофаг
Синяя сосновая златка <i>Phaenops cyanea</i> Fabr.	ксилофаг
Лиственничная златка <i>Phaenops guttulata</i> Gebl.	ксилофаг
Уссурийский полиграф <i>Polygraphus proximus</i> Blandf.	ксилофаг
Осиновый скрипун <i>Saperda carcharias</i> (L.)	ксилофаг
Берёзовый заболонник <i>Scolytus ratzeburgii</i> E.W.Janson	ксилофаг
Малый сосновый лубоед <i>Tomicus minor</i> (Hart.)	ксилофаг
Большой сосновый лубоед <i>Tomicus piniperda</i> L.	ксилофаг
Пальцеходный лубоед <i>Xylechinus pilosus</i> (Ratz.)	ксилофаг
Белая осиновая моль <i>Phyllocnistis labyrinthella</i> (Bjerkander)	минёр
Сибирский шелкопряд <i>Dendrolimus sibiricus</i> Tschetv.	филлофаг
Непарный шелкопряд <i>Lymantria dispar</i> L.	филлофаг
Рыжий сосновый пилильщик <i>Neodiprion sertifer</i> Geoffr.	филлофаг
Серая лиственничная листовёртка <i>Zeiraphera griseana</i> (Hübner)	филлофаг

Табл. 2.

Таксономические группы вредных организмов, очаги которых были обнаружены в древостоях с преобладанием той или иной лесообразующей породы на территории Красноярского края. Данные о повреждаемых породах для *H. pruinatum*, *A. aedilis* и *P. cyanea* отсутствуют.

Порода	Доля очагов ВО в древостоях данной породы, % от площади очагов			
	Свыше 60	60–20	20–5	Менее 5
Берёза	<i>F. fomentarius</i> , <i>F. betulina</i> , <i>A. mellea</i> s.l., <i>S. ratzeburgii</i>		<i>P. igniarius</i>	<i>F. pinicola</i>
Ель	<i>Ph. pini</i> var. <i>abietis</i> , <i>D. micans</i> , <i>I. typographus</i> , <i>M. sutor</i>	<i>F. pinicola</i> , <i>M. urussovi</i> , <i>D. sibiricus</i>		<i>T. piniperda</i>
Кедр	<i>C. chrysostigma</i> , <i>I. sexdentatus</i>	<i>X. pilosus</i> , <i>N. sertifer</i> , <i>D. sibiricus</i>	<i>F. pinicola</i> , <i>H. annosum</i> s.l., <i>M. urussovi</i>	<i>H. annosum</i> s.l., <i>M. galloprovincialis</i> , <i>M. sutor</i> , <i>P. guttulata</i>
Лиственница	<i>F. officinalis</i> , <i>I. subelongatus</i> , <i>P. guttulata</i> , <i>L. dispar</i> , <i>Z. griseana</i>	<i>M. sutor</i>	<i>F. pinicola</i> , <i>M. galloprovincialis</i> , <i>M. urussovi</i>	<i>I. typographus</i> , <i>T. minor</i> , <i>T. piniperda</i>
Осина	<i>P. igniarius</i> , <i>P. tremulae</i> , <i>H. mammatum</i> , <i>S. carcharias</i> , <i>P. labyrinthella</i>		<i>F. fomentarius</i>	<i>F. pinicola</i>
Пихта	<i>P. hartigii</i> , <i>M. cerastii</i> , <i>M. urussovi</i> , <i>P. proximus</i> , <i>X. pilosus</i>	<i>F. pinicola</i> , <i>D. sibiricus</i> , <i>N. sertifer</i>	<i>H. annosum</i> s.l.	<i>I. typographus</i>
Сосна	<i>Ph. pini</i> , <i>H. annosum</i> s.l., <i>C. flaccidum</i> , <i>M. galloprovincialis</i> , <i>T. minor</i> , <i>T. piniperda</i>	<i>I. sexdentatus</i>	<i>D. sibiricus</i>	<i>F. pinicola</i> , <i>M. urussovi</i>

итоном, то мы не имели возможности оценить, для какого периода приведена информация об очагах этого вида. Поэтому из дальнейшей обработки данные по *N. sertifer* были исключены.

Виды ВО, очаги которых были отмечены в Красноярском крае в 2007–2023 гг., значительно различаются как по средним, так и по суммарным площадям их очагов, а также по вероятности их обнаружения (Рис. 2 А, В).

Связь отдельных ВО с лесообразующими породами охарактеризована в табл. 2.

Материалы табл. 2 показывают, что среди вредных насекомых и патогенных грибов Красноярского края преобладают таксоны, тесно связанные с определённой древесной породой. Они либо специализированы только исключительно на одной из них (например, *S.*

ratzeburgii на берёзе, *M. cerastii* на пихте), либо могут факультативно образовывать очаги в древостоях других пород (короеды рода *Tomicus*, чаще всего повреждающие сосну, но отмеченные и в лиственничниках). Лишь немногие виды проявляют себя как олигофаги (*D. sibiricus*) или имеют крайне широкую специализацию (*F. pinicola*).

Пространственное распределение очагов ВО в лесничествах Красноярского края

Разбиение лесничеств на кластеры проводили, используя как исходные данные суммарную площадь очагов каждого ВО за период наблюдений. Чтобы избежать непропорционально большого вклада в ре-

зультаты классификации ВО с большими площадями повреждаемых древостоев, перед анализом их преобразовали взятием двоичного логарифма. Лучшие результаты были получены при разделении лесничеств на шесть групп при $\text{memb.exp} = 1,2$.

Основным видом ВО в лесничествах первого кластера (18 лесничеств) является полиграф уссурийский (далее «кластер полиграфа»). Его очаги отмечены во всех входящих в него лесничествах, средняя площадь выявленных очагов в год в 2007–2023 годах составляла 1762 га на лесничество. Ущерб, наносимый другими видами ВО, является эпизодическим (очаги отмечены менее чем в 50% лесничеств) и не характеризует кластер в целом.

Второй кластер (13 лесничеств) характеризуется преобладанием комплекса ВО, связанного с темнохвойными и осиновыми древостоями («темнохвойный кластер»). Более чем в половине лесничеств этой группы отмечены очаги большого чёрного елового усача (100%, средняя площадь очагов 1524 га), ржавчинного рака пихты (92,3%, 951 га), уссурийского полиграфа (84,6%, 2144 га) и ложного осинового трутовика (61,5%, 206 га). Нужно отметить, что нечёткий кластерный анализ показал заметное сходство первой и второй групп. Из лесничеств первого кластера вероятность попадания во второй >20% при данных параметрах кластеризации отмечена для пяти, обратная ситуация сложилась для двух. Для одного из лесничеств отмечено сходство с комплексом ВО шестого кластера за счёт широкого распространения в нём ВО, типичных для пихты и осины.

Для небольшого (пять лесничеств) третьего кластера типично повреждение лесов серой лиственничной листовёрткой («кластер листовёртки»). Её очаги отмечены во всех лесничествах, а средняя их площадь составила более 75 тыс. га. Это единственный вид ВО, объединяющий лесничества в единую группу.

Четвёртый кластер (десять лесничеств) характеризуется практически полным отсутствием зафиксированных повреждений лесов со стороны ВО («неповреждаемый кластер»). Набольшая средняя площадь очагов на лесничество в год составляет лишь 86 га (большой чёрный еловый усач), а самым распространённым видом ВО является чёрный сосновый усач (50% лесничеств в кластере). Некоторое сходство наблюдается со вторым кластером (за счёт распространения ВО, связанных с темнохвойными породами деревьев) и с пятым (за счёт комплекса вредителей сосны).

Пятый кластер, как и третий, невелик (шесть лесничеств). Аналогично второму, отнесение к нему той или иной территории определялось не преобладанием одного вида ВО, а их комплекса, связанного со светлохвойными (сосна и лиственница) породами («светлохвойный кластер»). Основными видами ВО в нём являются сосновая губка (100%, 438 га), чёрный сосновый усач (100%, 2099 га), смоляной рак (83,3%,

117 га), лиственничная губка (66,7%, 291 га), лиственничная златка (66,7%, 158 га), большой (66,7%, 353 га) и малый (66,7%, 57 га) сосновый лубоеды, продолговатый короед (50%, 67 га). Исключения представляют большой чёрный еловый усач (100%, 2096 га), ложный (66,7%, 2609 га) и настоящий (66,7%, 111 га) трутовики. Первый из этих видов в лесничествах пятого кластера формировал очаги преимущественно в темнохвойных (пихтовых и еловых) древостоях, но нередко также на лиственнице и даже сосне. Ложный и настоящий трутовики дают очаги, соответственно, в осиновых и берёзовых древостоях (табл. 2).

Основным видом ВО, объединяющим шесть лесничеств шестого кластера, является сибирский шелкопряд («кластер сибирского шелкопряда»). Его очаги зарегистрированы на всех входящих в кластер территориях, а средняя площадь на лесничество составляет свыше 250 тыс. га. Прочие сравнительно распространённые в лесничествах кластера виды ВО наносят гораздо меньший ущерб. Среди связанных с темнохвойными древостоями можно назвать большого чёрного елового усача (83,3%, 6128 га), уссурийского полиграфа (66,7%, 1715 га), шестизубчатого короеда (50%, 199 га), ржавчинный рак пихты (50%, 222 га). Сосну повреждают большой сосновый лубоед (66,7%, 39 га), чёрный сосновый усач (66,7%, 191 га) и сосновая губка (50%, 32 га), осину – ложный осиновый трутовик (50%, 94 га).

Различия между кластерами по особенностям входящих в них лесничеств

Кластеры (рис. 1), выделенные по площади очагов того или иного ВО или их комплекса (см. Пространственное распределение очагов ВО в лесничествах Красноярского края), сравнили друг с другом по общей и лесопокрытой площади, среднему возрасту древостоев, доле древостоев с преобладанием разных лесообразующих пород (отдельно по доле светлохвойных и темнохвойных древостоев), плотности дорог, широте и долготе.

Кластер полиграфа (1) отличается небольшим средним возрастом древостоев (83 года), малой долей древостоев с преобладанием лиственницы (0,2 единицы), светлохвойных пород в целом (1,7 единицы) и кедра (0,6 единицы). При этом значительная доля лесов представлена в нём темнохвойными (3,5 единицы) и, в частности, пихтовыми (2,3 единицы) насаждениями (рис. 3). Площади входящих в него лесничеств сравнительно невелики (в среднем 400 тыс. га общей, 364 тыс. га лесопокрытой). Лесничества кластера полиграфа в целом тяготеют к юго-западному сектору края (рис. 4), практически полностью находясь в пределах Нижнеангарского, подтаёжно-лесостепного и горно-таёжного районов (рис. 1). ГК, соответствующих этому кластеру, факторный анализ не выявил.

Лесничества темнохвойного (2) кластера во многом совпадают по характеристикам с предыдущим: для них типичны низкая доля лиственницы (0,2 единицы) и светлохвойных древостоев (1,4 единицы) при высокой доле пихты (2,6 единицы) и темнохвойных (4,4 единицы). При этом для них в среднем типична сравнительно высокая доля кедровых древостоев (1,0 единицы) (рис. 3). Площади лесничеств невелики (542

тыс. га общей и 497 тыс. га лесопокрытой), а сами они приурочены к юго-западу Красноярского края (рис. 4). Согласно лесорастительному районированию, лесничества кластера относятся к Западносибирскому таёжному, подтаёжно-лесостепному и горно-таёжному районам (рис. 1). Темнохвойному кластеру соответствует ГК4, которая дополняет список типичных для него видов ВО (табл. 3).

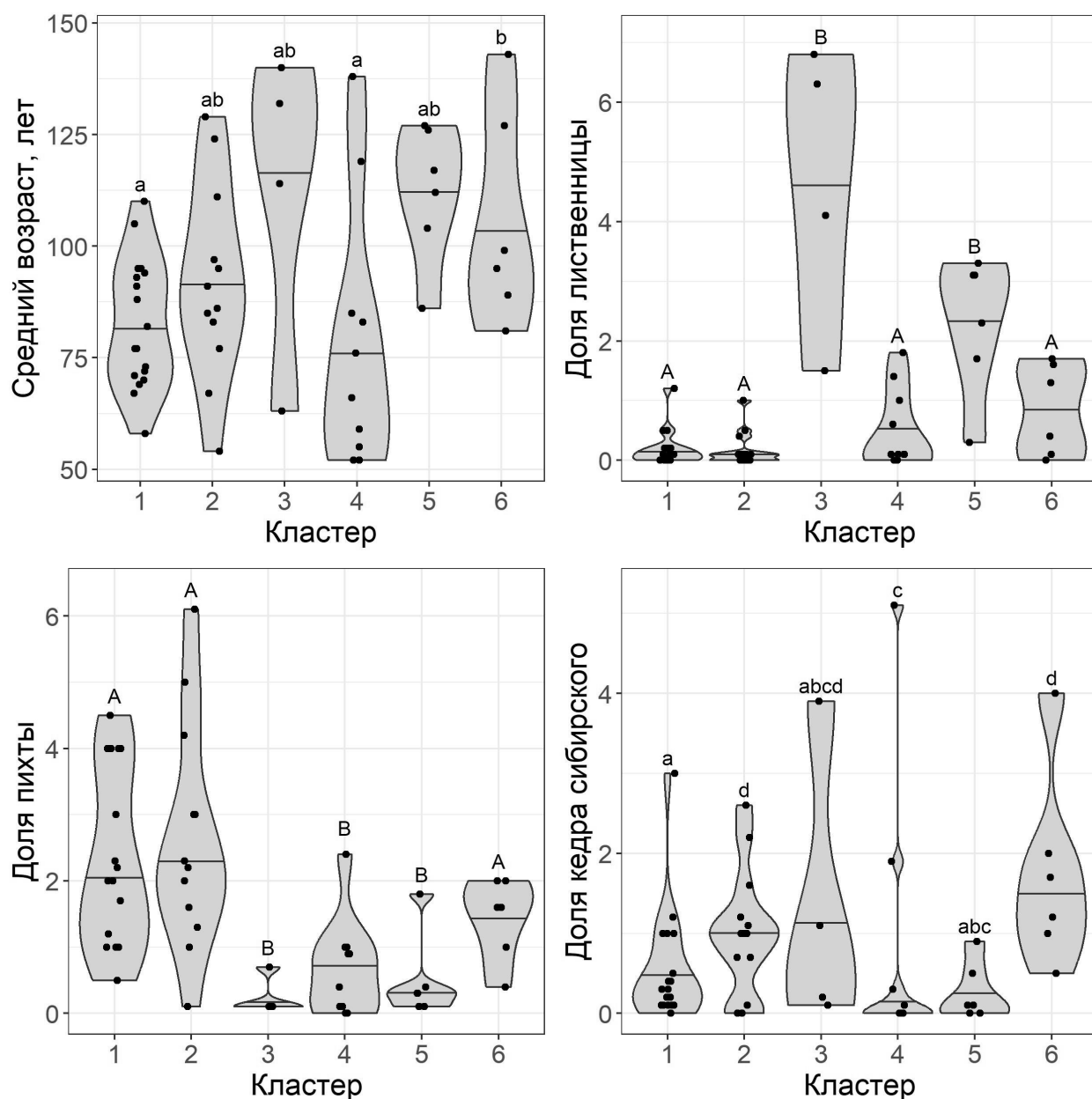


Рис. 3. Характеристики древостоев лесничеств, входящих в разные кластеры. Область с серой заливкой описывает эмпирическое распределение данного признака, точки – значения фактических данных для конкретного лесничества, горизонтальная линия – положение медианы. Одинаковые буквы означают отсутствие различий между кластерами на уровне значимости 0,1 (заглавные – по критерию Вилкоксона, строчные – Колмогорова-Смирнова). Не приведены данные по доле светлохвойных (коэффициент корреляции Спирмена с площадью лиственничных древостоев $r = 0,673$) и темнохвойных (с площадью пихтовых древостоев $r = 0,844$).

В кластере листовёртки (3) ожидаемо высока доля лиственничников (4,7 единицы) (рис. 3). По распределению значений широт и долгот центроидов этот кластер статистически значимо не отличается от прочих, но при детальном рассмотрении (рис. 4) явно заметна его приуроченность или к горным территориям (горно-таёжный район), или к северным частям (притундровый и Среднесибирский районы) края (рис. 1).

Результаты факторного анализа (табл. 3) позволяют утверждать также, что лесничества этого кластера характеризуются большими площадями, возрастом и сравнительно высокой долей кедровых древостоев.

Для светлохвойного (5) кластера типичны в первую очередь высокие значения среднего возраста древостоев (112 лет) и сравнительно большая доля лиственничников (и светлохвойных лесов в целом) (соответ-

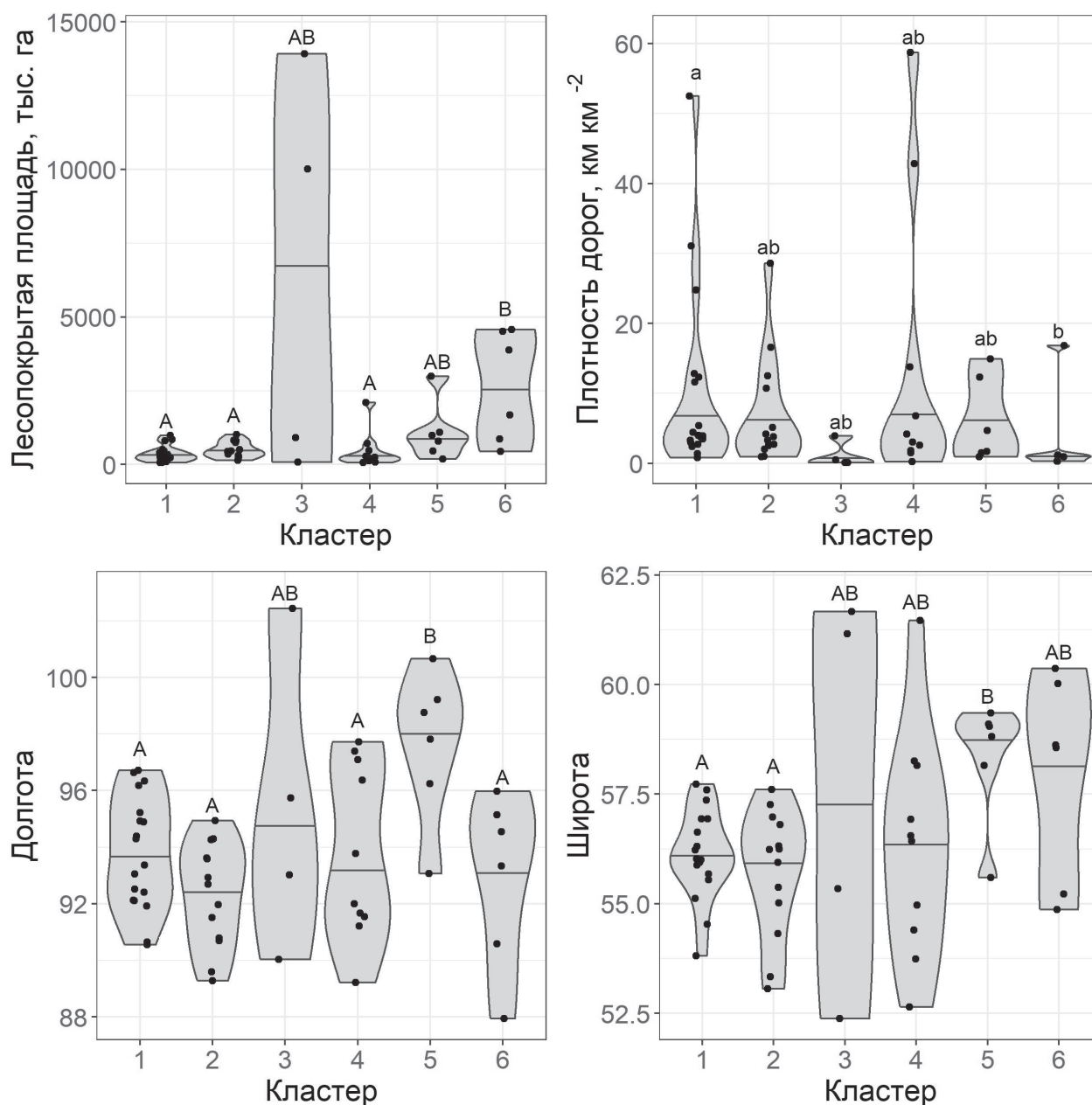


Рис. 4. Характеристики территорий лесничеств, входящих в разные кластеры. Область с серой заливкой описывает эмпирическое распределение данного признака, точки – значения фактических данных для конкретного лесничества, горизонтальная линия – положение медианы. Одинаковые буквы означают отсутствие различий между кластерами на уровне значимости 0,1 (заглавные – по критерию Вилкоксона, строчные – Колмогорова-Смирнова). Не приведены данные по общей площади лесничеств (с лесопокрытой площадью $\rho = 0,996$).

Табл. 3.

Главные компоненты (ГК), с которыми связана принадлежность к кластерам, координаты в их пространстве площадей очагов ВО и характеристик территорий. Обозначения: Р – доля древостоев с преобладанием той или иной породы (_{листв} – лиственница, _{кедр} – кедр сибирский, _{бер} – берёза); S – площадь лесничества (_{общ} – общая, _{лп} – лесопокрытая).

ГК (% объяснённой исперсии)	Координаты в пространстве главной компоненты		
	Кластеры	Виды ВО	Характеристики территорий
1 (13,2)	Светлохвойный (5,640)	<i>I. subelongatus</i> (0,753), <i>P. guttulata</i> (0,725), <i>Ph. pini</i> (0,723), <i>M. galloprovincialis</i> (0,698), <i>F. officinalis</i> (0,634), <i>T. piniperda</i> (0,557), <i>S. carcharias</i> (0,450), <i>T. minor</i> (0,348)	$P_{\text{листв}}$ (0,772), Нижеангарский район (0,650), широта (0,626), долгота (0,618), $S_{\text{лп}}$ (0,522), $S_{\text{общ}}$ (0,518), возраст (0,449), Среднесибирский район (0,418)
2 (9,4)	Листовёртки (–4,656)	<i>Z. griseana</i> (–0,525)	$S_{\text{общ}}$ (–0,684), $S_{\text{лп}}$ (–0,676), $P_{\text{листв}}$ (–0,399), возраст (–0,389), $P_{\text{кедр}}$ (–0,374)
4 (7,1)	Темнохвойный (1,699)	<i>M. cerastii</i> (0,716), <i>I. sexdentatus</i> (0,624), <i>C. chrysostigma</i> (0,605), <i>H. mammatum</i> (0,605), <i>P. labyrinthella</i> (0,470), <i>M. sutor</i> (0,396)	Горно-таёжный район (0,639), возраст (0,367)
8 (4,4)	Сибирского шелкопряда (3,103)	<i>D. sibiricus</i> (0,618), <i>M. urusovi</i> (0,292), <i>I. sexdentatus</i> (0,244)	Западносибирский таёжный (0,565), $P_{\text{бер}}$ (0,264)

ственно, 2,3 и 5,5 единиц) при малой доле пихтовых, кедровых и темнохвойных в целом (0,5, 0,3 и 1,6 единиц) лесов (рис. 3). Лесничества этого кластера тяготеют к северо-западу Красноярского края (рис. 4) (преимущественно, Нижнеангарский район) (рис. 1). Сходство лесничеств, включённых в светлохвойный кластер, подтверждает и результат факторного анализа (табл. 3).

Для кластера сибирского шелкопряда (6) типичны большие площади лесничеств (свыше 3 млн. га общей и 2,6 млн. га лесопокрытой), а также низкая плотность дорожной сети (3,4 км на тыс. га) (рис. 4), сравнительно высокая доля пихты и кедра (1,4 и 1,7 единиц) (рис. 3), а по результатам факторного анализа – также берёзы (табл. 3), низкая – лиственницы и светлохвойных насаждений в целом (0,8 и 2,6 единиц) (рис. 3), нахождение в западной части края (рис. 4). Несмотря на небольшое число лесничеств в кластере, их приуроченность к лесорастительным районам очень разнообразна (Среднесибирский, Нижнеангарский, Западносибирский таёжный и горно-таёжный районы) (рис. 1).

Лесничества, отнесённые к неповреждаемому (4) кластеру – это территории с небольшой площадью (542 и 456 тыс. га) (рис. 4) и молодыми (78 лет) лесами, низкой долей светлохвойных (в частности, лиственничных) и пихтовых древостоев (соответственно, 2,8, 0,5 и 0,7 единиц) (рис. 3). В основном, их территория расположена в пределах Нижнеангарского и горно-лесостепного районов, но по одному лесничеству находится в Среднесибирском (Борское), подтаёжно-лесостепном (Сухобузимское) и горно-таёжном (Саяно-Шушенское) районах (рис. 1).

Лесопатологическая напряжённость в лесах Красноярского края

Расчёт значений НЛпУ для лесничеств Красноярского края показал, что они колеблются от 21 до 66 баллов. Согласно нормам Приказа Рослесхоза №1067, подавляющее большинство (52 лесничества) относятся к зоне средней угрозы. В зоны слабой и сильной попадают, соответственно, семь и два лесничества (рис. 5).

Лесничества были разделены на кластеры для анализа вклада отдельных показателей в интегральный балл НЛпУ (рис. 6). Лучшие результаты были получены при разделении лесничеств на пять групп при $memb.exp = 1,3$. Только для семи лесничеств принадлежность к определённому кластеру была установлена недостаточно чётко.

Основной вклад в разбиение лесничеств на кластеры по вкладу в НЛпУ отдельных показателей внесли суммарная вредоносность вредных организмов, объём

проведённых санитарно-оздоровительных мероприятий и объём мероприятий по ликвидации очагов. Наибольшими значениями НЛпУ отличаются первые два кластера, но во втором несколько выше интегральная вредоносность ВО. Довольно велика она и в лесничествах четвёртого кластера. В них же, по сравнению с третьим, значительно лучше обстановка с ликвидацией очагов ВО, этот показатель отличается минимально возможными значениями. В пятом кластере все показатели НЛпУ близки к своим минимумам (рис. 6).

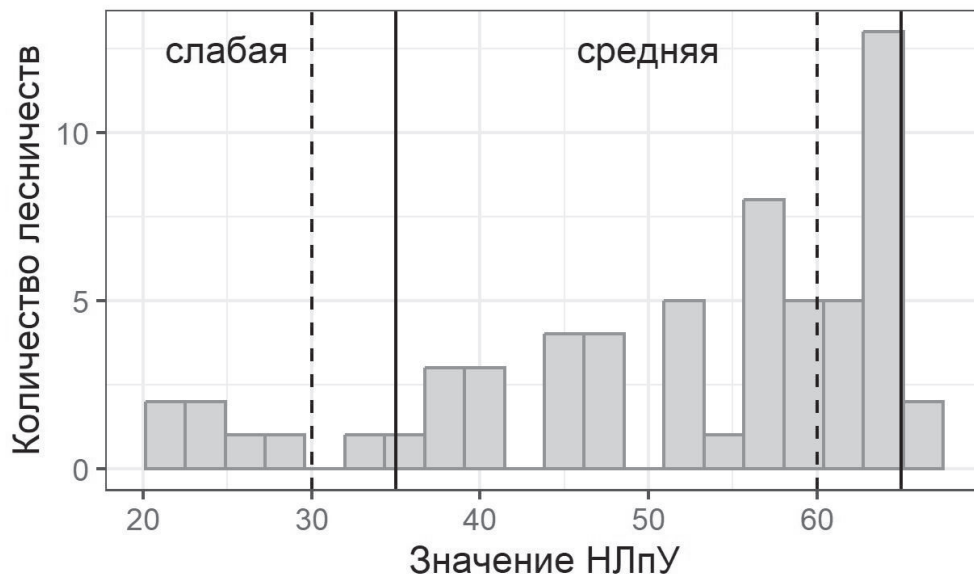


Рис. 5. Распределение лесничеств по баллам НЛпУ и зонам лесопатологической угрозы. Сплошные вертикальные линии показывают границы между зонами лесопатологической угрозы согласно Приказу Рослесхоза №1067, пунктирные – согласно нашему предложению (см. Адекватность оценки лесопатологической напряжённости и вклад в неё массовых размножений ВО).

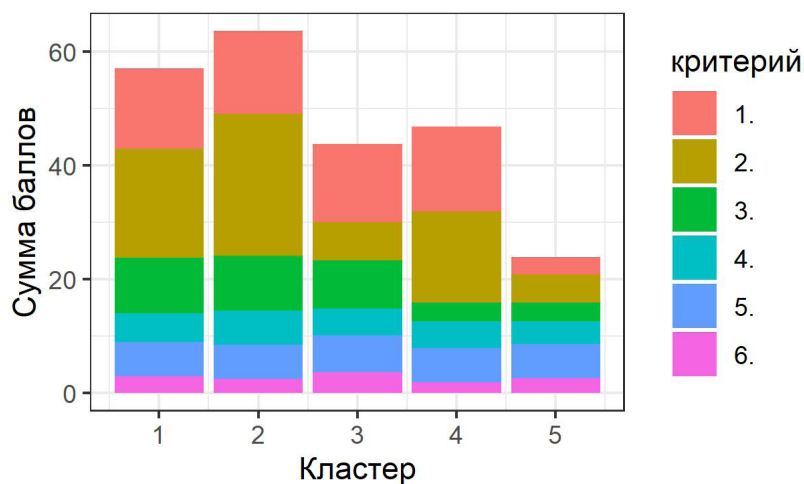


Рис. 6. Вклад отдельных показателей лесопатологической напряжённости в интегральный показатель НЛпУ для разных кластеров, где (1) – объём проведённых СОМ, (2) – суммарная вредоносность ВО, (3) – объём мероприятий по ликвидации очагов ВО, (4) – площадь очагов ВО на начало года, (5) – площадь погибших и повреждённых насаждений, (6) – площадь защитных лесов.

Медианные значения суммарной вредоносности ВО для разных кластеров, выделенных по этому признаку, колеблются от 5 (третий и пятый) до 25 (второй). При этом даже в лесничествах второго кластера, где наносимый ВО ущерб лесам максимален, его вклад в НЛпУ достигает лишь 38,5%. В остальных случаях сравнимое или преобладающее значение для оценки НЛпУ имеют недостаточные объёмы проведённых санитарно-оздоровительных мероприятий и мероприятий по ликвидации очагов (первый и третий признаки) (рис. 6).

Результаты факторного анализа показали, что уровень лесопатологической напряжённости не имеет закономерных связей с таксономическим составом ВО и интенсивностью наносимых ими повреждений. Множественный анализ соответствий же позволил установить, что первый кластер по НЛпУ тесно связан с темнохвойным кластером, второй – с кластером полиграфа, третий – со светлохвойным, четвёртый – с кластером сибирского шелкопряда, пятый – с кластером листовёртки.

Обсуждение

Закономерности распределения очагов ВО в лесах Красноярского края

Наибольшие площади ($>10^5$ га) очагов массового размножения, как и ожидалось, были отмечены для давно известных на территории Красноярского края видов хвоегрызущих вредителей – *D. sibiricus* [27] и *Z. griseana* [22, 39]. Значительный ущерб ($\sim 10^5$ га) наносили также ксилофаги: *M. urussovi* [21], нередко сопутствующий сибирскому шелкопряду [21, 35], и сравнительно недавно обнаруженный на территории края *P. proximus* [34]. Еще три вида, *M. galloprovincialis*, *P. ignarius* и *M. cerastii* (соответственно, ксилофаг, возбудитель стволовой гнили, возбудитель рака) повредили древостои на площади свыше 10^4 га (рис. 2В). В целом же закономерностей как масштаба наносимых повреждений, так и частоты обнаружения очагов массового размножения в зависимости от характера ущерба, наносимого ВО (табл. 1), установить не удалось (рис. 2А, В).

Результаты кластерного и факторного анализа позволили достаточно точно выявить территории, для которых угроза повреждения теми или иными ВО максимальна. Это удалось почти для всех таксонов ВО, площадь повреждённых которыми насаждений превышает 1000 га. Почти для всех таких ВО более половины площади очагов находились на территориях, которые были предсказаны для них, для ряда таксонов – более 70% (рис. 2, табл. 4). Худшие результаты дал анализ закономерности размещения некоторых ВО, наносящих небольшие по масштабам повреждения. Для двух из них (осиновый скрипун, малый чёрный

еловый усач) реальное размещение очагов абсолютно не совпало с теоретически предсказанным (табл. 4).

Достаточно тесная приуроченность ряда видов к определённым территориям в первую очередь может быть объяснена особенностями их лесного покрова. Так, для кластера полиграфа характерна довольно значительная доля древостоев с преобладанием пихты (рис. 3), в среднем равная 2,2 и не снижающаяся ниже 0,5. Именно пихта сибирская является основной кормовой породой для полиграфа уссурийского в Сибири, хотя изредка он может заселять и другие хвойные [23]. Климатические предпочтения *P. proximus* пока не изучены. Но, анализируя данные о его распространении в Томской области и Красноярском крае, которые были ранее других регионов затронуты его инвазией [33], можно предположить, что благоприятные для его массовых размножений условия складываются от 59° с.ш. и южнее. Действительно, центроид наиболее северного лесничества, входящего в кластер полиграфа, находится на широте 57,7° (Чунское), а в целом их координаты южнее, чем в среднем по региону (рис. 4).

С другой стороны, в близком к нему по характеристикам лесного покрова (рис. 3) и территории (рис. 4) темнохвойный кластер имеет гораздо более богатый список активных на его территории таксонов ВО (см. «Пространственное распределение очагов ВО в лесничествах Красноярского края» и табл. 4). Отчасти это можно связать с более высокой долей кедровых древостоев в лесах темнохвойного кластера – единственной характеристикой, по которой он статистически значимо отличается от кластера полиграфа (рис. 3). Это позволяет объяснить приуроченность к этому кластеру очагов *I. sexdentatus* и *C. chrysostigma* (табл. 3, 4) – видов, в Красноярском крае повреждающих преимущественно кедр (табл. 2). Но при этом без объяснений остаётся почти полное отсутствие в кластере полиграфа комплекса видов, связанных с осинкой (табл. 2–4), особенно широко распространённого *P. tremulae* [20]. То же касается тесно связанных с пихтой *M. cerastii* [1, 62, 63] и *M. urussovi* [21, 52], наносящих значительный ущерб только в темнохвойном кластере, но практически не отмеченных в кластере полиграфа (табл. 2–4). Сходство территорий, входящих в состав кластеров полиграфа и темнохвойного, в том числе, по косвенно характеризующим доступность лесов для обследования признакам (общая и лесопокрываемая площади, плотность дорог (рис. 4)) заставляют предположить, что различия сформированы за счёт каких-либо неучтённых факторов.

Само по себе наличие в темнохвойном кластере очагов ВО, связанных с пихтой, кедром и осинкой, объясняется особенностями формирования лесов. В Сибири осина находит наилучшие климатические условия между 58° и 52° с.ш. [18], где почти полностью распо-

ложена территория лесничеств темнохвойного кластера (рис. 4). Лесовозобновление темнохвойных лесов в условиях Красноярского края часто проходит через смену пород, когда доминирующая на начальных этапах сукцессии осина закономерно замещается пихтой, елью и кедром. Доминирование переходит к последнему ближе к фазе климакса [46]. Таким образом, формируется значительный объём кормовой базы для ВО, связанных с этими породами. Но остаётся открытым вопрос, почему в сходных по условиям кластере полиграфа из всех ВО широко представлены лишь очаги *P. proximus*: природные условия в этом и темнохвойном кластерах практически идентичны (рис. 2, 3).

Как и в кластере полиграфа, ущерб лесам кластера листовёртки наносится практически исключительно единственным видом – *Z. griseana* (табл. 3, 4). Этот вид, несмотря на способность повреждать многие виды хвойных [39, 55], полноценно развиваться может только при питании хвоей лиственницы, в наса-

ждениях которой и развиваются её очаги [39]. Другой особенностью его массовых размножений является формирование очагов преимущественно в высоких широтах [39] или в высокогорье [39, 57, 65]. Это объясняется тем, что именно в таких условиях смертность зимующих особей минимальна, а выживание молодых гусениц максимально [54]. Действительно, лесничества кластера листовёртки отличаются обилием лиственничных лесов (рис. 3) и находятся либо севернее 60° с.ш. (Байкитское, Тунгусско-Чунское, Эвенкийское), либо в пределах Саянской горной системы (Ужурское, Усинское). Прочие отличия этого кластера от других (см. «Различия между кластерами по особенностям входящих в них лесничеств») не имеют прямого отношения к массовым размножениям листовёртки и являются следствием особенностей климата его территорий (сравнительное обилие кедра), ведения на них лесного хозяйства (высокий средний возраст лесов) либо связанных с этим управленческих решений (большие площади лесничеств).

Табл. 4.

Распределение обнаруженных при проведении ГЛПМ очагов ВО, для которых установлена связь с определённой группой лесничеств по результатам кластерного или факторного анализа

Вид ВО	Кластер	Доля площади обнаруженных очагов в кластерах, % от всей площади по Красноярскому краю
Настоящий трутовик	Светлохвойный	61,4
Лиственничная губка	Светлохвойный	96,8
Ложный трутовик	Светлохвойный	95,9
Сосновая губка	Светлохвойный, сибирского шелкопряда	57,7
Ложный осиновый трутовик	Темнохвойный, сибирского шелкопряда	72,0
Рак смоляной (рак-серянка)	Светлохвойный	37,5
Черный рак тополя и осины	Темнохвойный	100,0
Ржавчинный рак пихты	Темнохвойный, сибирского шелкопряда	95,5
Бронзовая ребристая златка	Темнохвойный	100,0
Шестизубчатый короед	Темнохвойный, сибирского шелкопряда	87,8
Продолговатый короед	Светлохвойный	70,2
Черный сосновый усач	Светлохвойный, сибирского шелкопряда	83,9
Малый черный еловый усач	Темнохвойный	0,0
Большой черный еловый усач	Темнохвойный, светлохвойный, сибирского шелкопряда	96,1
Лиственничная златка	Светлохвойный	81,4
Уссурийский полиграф	Полиграфа, темнохвойный	85,1
Осиновый скрипун	Светлохвойный	0,0
Малый сосновый лубоед	Светлохвойный	48,0
Большой сосновый лубоед	Светлохвойный, сибирского шелкопряда	88,4
Белая осиновая моль	Темнохвойный	100,0
Сибирский шелкопряд	Сибирского шелкопряда	100,0
Серая лиственничная листовёртка	Листовёртки	93,0

Светлохвойный кластер сходен с темнохвойным в том смысле, что его отличия от других территорий определяет наличие очагов комплекса ВО, связанных с определённой растительной формацией, а именно, сосновыми и лиственничными лесами (табл. 2, 3). Именно обширная кормовая база в лесничествах светлохвойного кластера (рис. 3) определяет их доминирование. Как минимум, для *F. officinalis* определённое значение имеет и сравнительно высокий средний возраст древостоев [58]. На территории лесничеств светлохвойного кластера, преимущественно находящихся в Приангарье и на Среднесибирском плоскогорье, расположены большие массивы сосновых и лиственничных лесов [19, 41], в которых и формируются очаги массового размножения типичных для кластера ВО. Однако, сравнительно широко представлены в них и насаждения темнохвойных пород, берёзы и осины. В случае последних двух пород это во многом связано с их доминированием на ранних стадиях сукцессии в определённых лесорастительных условиях [41], что обеспечивает значительное присутствие очагов ВО, связанных с ними трофически.

Изначально мы предполагали, что основной причиной небольшой площади зарегистрированных при ГЛПМ очагов, типичная для неповреждаемого кластера, будет малая транспортная доступность лесов, которая затруднила бы проведение обследований. Косвенно её можно оценить через общую и лесопокрытую площади и плотность дорог. Однако в этом отношении лесничества неповреждаемого кластера в среднем не отличаются от других групп (рис. 4). Размещение большинства их в Нижнеангарском и подтаёжно-лесостепном районах позволяет ожидать сходства различных лесничеств неповреждаемого кластера с кластерами полиграфа, темнохвойным или светлохвойным (см. «Различия между кластерами по особенностям входящих в них лесничеств»). То же касается и породного состава лесов в неповреждаемом кластере (рис. 3). Таким образом, уверенная интерпретация причины, по которой существуют лесничества почти с полным отсутствием зарегистрированных очагов ВО, у нас отсутствует.

Полнота исходных данных и полученных результатов

Несмотря на протяжённый (17 лет) период, данные для которого имелись в нашем распоряжении, они в известной степени неполны, что сказывается на точности сделанных нами выводов. Некоторые из таких пробелов достаточно очевидны, чтобы быть достойными отдельного обсуждения.

Систематические исследования лесных филофагов в Красноярском крае начались с 1950-х годов. [7, 24, 25, 43], а для некоторых видов известны данные и за более ранний период [27]. Для края в целом имеющи-

еся данные были обобщены по хвоелистогрызущим вредителям [29], а для южных его районов, примерно соответствующих горно-таёжному и горно-лесостепному районам – для фауны лесных насекомых в целом [53]. Продолжительна и история несколько позже [31] начатых исследований фитопатогенных грибов – возбудителей болезней леса.

Уже из анализа списка хвоелистогрызущих лесных насекомых, представленного в накопленных за этот период литературных данных, видна неполнота таксономических данных в результатах ГЛПМ. Только из отряда Чешуекрылые в них не упомянуты в разное время размножавшиеся в массе волнянки ивовая *Leucoma candida* (Staudinger) [29] и хвойная *Calliteara abietis* (Denis & Schiffermüller) [11], лунка серебристая *Phalera bucephala* (L.) [29], ржаво-бурая кисточница *Clostera anastomosis* (L.) [28], шелкопряды лунчатый *Cosmotriche lobulina* (Denis & Schiffermüller) [12], сосновый *Dendrolimus pini* (L.) [25], пушистый *Eriogaster lanestris* L. [29], шелкопряд-монашенка *Lymantria monacha* (L.) [16], пяденицы пихтовая *Ectropis crepuscularia* (Denis & Schiffermüller) [43], сосновая *Bupalus piniaria* (L.) [38], лиственничная *Semiothisa continuaria* Eversmann [13], ольховая *Parectropis similaria* (Hufnagel), березовая *Biston betularius* (L.), углокрылая еловая *Macaria signaria* (Hübner), пяденица Якобсона *Erannis jacobsoni* Djakonov [29], красно-головая пихтовая листовёртка *Zeiraphera rufimitrana* (Herrich-Schäffer) [8], пихтовая листовёртка-толстушка *Choristoneura murinana* (Hübner) [9]. Учитывая, что очаги большинства этих видов были приурочены к подтаёжно-лесостепным и горным территориям, в южной части Красноярского края можно было бы ожидать выделения новых кластеров.

Неполны или отсутствуют в результатах ГЛПМ данные и по другим таксономическим и трофическим группам насекомых: филофагам из числа пилильщиков (Diprionidae, Tenthredinidae, Pamphiliidae: Hymenoptera), минёрам, вредителям генеративных органов.

Вызывает сомнение вредоносность дереворазрушающих грибов *F. fomentarius*, *F. betulina*, *F. pinicola*, которые, по мнению ксилмикологов, лишь в отдельных случаях встречаются на усыхающих деревьях или усохших крупных ветвях ослабленных деревьев [3, 6]. В то же время, в списке вредоносных заболеваний отсутствуют бактериозы, проявляющиеся в виде водянки, некрозно-раковых поражений стволов, нередко приводя к очаговому ослаблению и усыханию древостоев берёзы, темнохвойных видов [45, 47, 48].

Наиболее ярким примером потенциального влияния недостаточной протяжённости ряда обработанных нами данных на результаты выделения кластеров являются данные о массовых размножениях сибирского шелкопряда. Литературные данные позволя-

ют проследить историю его массовых размножений с конца XIX века по настоящее время [27, 60]. В пределах Красноярского края полностью или частично находятся девять районов вспышек, различающихся частотой массовых размножений и масштабами наносимых повреждений [30]. Очаги же, возникшие с 2007 года, были найдены лишь в четырёх из них. Можно предположить поэтому, что массовые размножения сибирского шелкопряда, учтённые на более длительном временном промежутке, могли серьёзно изменить классификацию лесничеств Красноярского края по характеру биотических угроз их лесам.

Тем не менее, предложенная нами классификация лесничеств по комплексу действующих в них ВО имеет серьёзные преимущества перед ранее предложенными [29, 30, 53]. Во-первых, эти классификации являются излишне дробными. В классификации для сравнительно небольшой части территории Красноярского края в пределах Алтае-Саянской горной системы выделено свыше 30 комплексов вредных насекомых [53]. Значительно менее дробным является деление, предложенное в [29], но и там выделено 16 районов. Во-вторых, все эти классификации описывают территории только с точки зрения состава видов-лесообразователей. Это важнейший признак, но условия для формирования очагов ВО определяет не только он (рис. 2, 3). В-третьих, они выполнены только для насекомых [29, 53] или даже для одного их вида [30], а повреждения, наносимые фитопатогенами, они совершенно игнорируют. Наконец, представленная здесь классификация территорий по таксономическому составу ВО более пригодна с точки зрения лесного хозяйства, так как в основу деления территории положены лесничества, то есть, те же единицы, что используются в других его отраслях.

Адекватность оценки лесопатологической напряжённости и вклад в неё массовых размножений ВО

В лесах Красноярского края периодически фиксируются или фиксировались в прошлом очаги нескольких десятков ВО. Среди них есть и те, которые способны приводить к гибели леса на площадях в несколько сотен тысяч га, в частности, сибирский шелкопряд [27], уссурийский полиграф [33], большой черный словый усач [21], пихтовая пяденица [43]. Другие, например сосновая пяденица и корневая губка, наносят лесам сравнительно небольшой урон, но эти повреждения затрагивают небольшие по площади лесные массивы в южных малолесных частях региона [38, 48]. Ущерб, наносимый большинством других ВО, не столь значим, но в совокупности площадь их очагов также весьма значительна, занимая примерно четверть от общей (~480 тыс. га с 2008 года). Это превышает ме-

дианное значение лесопокрытой площади лесничеств Красноярского края (445 тыс. га).

С учетом значительной нагрузки на леса региона, которая по результатам ГЛПМ фиксируется со стороны ВО, оценка её как средней для большинства лесничеств (см. Лесопатологическая напряжённость в лесах Красноярского края) выглядит нелогичной. С точки зрения значений НЛпУ, установленные Приказом Рослесхоза №1067, границы также не выглядят оптимальными. Более логичным представляется сместить их таким образом, чтобы они проходили через локальные минимумы (рис. 5).

Результаты анализа соответствий позволяют утверждать, что в период, для которого были проанализированы данные (2007–2023 годы), наибольшую угрозу для состояния лесов представляют полиграф уссурийский и сибирский шелкопряд. Наносимые первым из этих двух видов повреждения тесно связаны с кластерами 1 и 2, выделенными по НЛпУ (рис. 6). Ущерб, нанесённый сибирским шелкопрядом, в наибольшей степени проявился в лесничествах кластера 4 (рис. 6). Угроза же со стороны комплекса видов, связанных со светлохвойными древостоями (связан с кластером 3 по НЛпУ) и серой лиственничной листовёрткой (связан с кластером 5), сравнительно невелика. В структуру показателя лесопатологической напряжённости вредоносность этих видов вносит сравнительно небольшой вклад (рис. 6), несмотря на значительные масштабы ущерба со стороны *Z. griseana* (рис. 2).

Заключение

Анализ характера наносимого вредными организмами ущерба, выявленного в лесах Красноярского края в ходе государственного лесопатологического мониторинга, показал неравномерную представленность разных экологических групп вредителей и болезней леса. Среди первых по числу видов преобладают стволовые вредители, значительно меньше хвоелистогрызущих, и лишь один вид минирующих насекомых. Возбудители болезней вызывают преимущественно стволовые гнили, возбудители некрозно-раковых заболеваний представлены намного слабее. Зависимости повреждаемых площадей и частоты появления очагов от характера наносимого ущерба установлено не было.

Анализ пространственного размещения очагов массового размножения разных вредных организмов показал, что оно подчиняется определённым закономерностям. В первую очередь, состав их комплексов на определённой территории связан с породным составом лесов на ней. Это хорошо объясняется тем, что большинство вредителей и возбудителей болезней более или менее тесно связаны трофически с определённой древесной породой. Активность некоторых таксономических групп вредных организмов (по крайней мере, возбудителя стволовой гнили *Fomitopsis officinalis*) зависит от среднего

возраста древостоев повреждаемой породы. Для некоторых видов насекомых (*Polygraphus proximus*, *Zeiraphera griseana*) на степень наносимого ущерба влияет климат местности. Изначальное предположение о том, что на распределение в пространстве выявленных очагов могла повлиять транспортная доступность территорий (через интенсивность хозяйственной деятельности или мониторинговых работ) подтверждения не нашла.

Неравномерность лесорастительных и климатических условий в разных частях Красноярского края привели к преобладанию в них разных комплексов вредных организмов. На территории региона выделяется по меньшей мере шесть кластеров, различающихся по таксономическому составу грибов и насекомых, наносящих ущерб лесам. В первом из этих кластеров ведущая роль принадлежит полиграфу уссурийскому. Значительный ущерб он наносит и во втором кластере, но сравнительно велик в нём ущерб от других организмов, повреждающих темнохвойные древостои. Леса третьего кластера массово повреждались только серой лиственничной листовёрткой, шестого – другим хвоелистогрызущим вредителем, сибирским шелкопрядом. В пятом кластере нельзя выделить какой-либо один таксон по площа-

ди повреждённых им лесов; в нём близкий масштаб по этой характеристике имеет группа видов, связанных со светлохвойными породами (чёрный сосновый усач, сосновая и лиственничная губки и некоторые другие). В лесах четвёртого кластера биогенные повреждения при проведении лесопатологического мониторинга почти не выявлялись.

Оценка уровня напряженности лесопатологической угрозы зависит преимущественно от интенсивности ведения лесного хозяйства. Тем не менее, таксономический состав вредных организмов вносит в него существенный вклад. Исторические данные позволяют предполагать, что современные оценки уровня лесопатологической угрозы могут быть не вполне адекватными. Так, ряд видов вредных насекомых, ущерб от которых в лесах Красноярского края был известен ранее, за исследованный период себя не проявляли или проявляли далеко не везде, где их очаги были сформированы ранее. Но даже накопленные с 2007 года данные лесопатологического мониторинга указывают, что необходима переоценка современной классификации лесничеств Красноярского края по степени угрозы со стороны вредителей и болезней леса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев ВА, Астапенко ВВ, Басова ЮГ, Бондарев АИ, Лузанов ВГ, Отнюкова ТН, Яновский ВМ. Состояние пихтовых лесов Кузнецкого Алатау. Лесное хозяйство. 1999;(4):51-3.
2. Алексеев ВА, Связева ОА. Древесные растения лесов России. Красноярск: ИЛ СО РАН; 2009.
3. Арефьев СП. Системный анализ биоты доразрушающих грибов. Новосибирск: Наука; 2010.
4. Астапенко СА, Гуров АВ. Биологические особенности пилильщика *Pristiphora subarctica* (Hymenoptera, Tenthredinidae) в искусственных еловых насаждениях Красноярского края. Зоол. ж. 2016;95(2):189-95. DOI: 10.7868/S0044513416020057.
5. Астапенко СА, Ягунов МН, Голубев ДВ, Сашко ЕВ. Оценка воздействия и распространения насекомых вредителей в лесах Красноярского края на примере полиграфа уссурийского. В кн.: Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций; Железногорск; 2014. С. 46-51.
6. Бондарцева МА. В кн.: Эколого-биологические закономерности функционирования ксилотрофных базидиомицетов в лесных экосистемах. Грибные сообщества лесных экосистем. Петрозаводск: КарНЦ РАН; 2000. С. 9-25.
7. Галкин ГИ. Некоторые вопросы формирования резерваций и первичных очагов сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края. В кн.: Сибирский шелкопряд. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР; 1960. С. 21-33.
8. Галкин ГИ. Красноголовая пихтовая листовёртка - массовый вредитель пихты сибирской. Лесное хозяйство. 1976;(10):70-3.
9. Галкин ГИ. Пихтовая листовёртка-толстушка – массовый вредитель пихтово-еловых лесов в Красноярском крае. Лесное хозяйство. 1980;(3):65-7.
10. Галкин ГИ. Лиственничный жёлтый пилильщик – вредитель подроста лиственницы в Красноярском крае. Лесное хозяйство. 1982;(7):52-4.
11. Галкин ГИ. Хвойная волнянка в пихтовых лесах Красноярского края. Лесн. хоз-во. 1990;(12):41-3.
12. Галкин ГИ. Лунчатый шелкопряд в пихтовых лесах Красноярского края. Лесн. хоз-во. 1991;(11):45-6.
13. Галкин ГИ. Лиственничная пяденица в лесах Красноярского края. Лесн. хоз-во. 1992;(1):46-8.
14. Галкин ГИ. Красноголовый пилильщик-ткач в сосновых молодняках Красноярского края. Сиб. экол. ж. 1997;(6):609-14.

15. Герасимов И.П., ред. Средняя Сибирь. М.: Наука; 1964.
16. Гниненко ЮИ. Шелкопряд-монашенка – вредитель лесов России. Пушкино: ВНИИЛМ; 2016.
17. Гродницкий ДЛ, Разнобарский ВГ, Солдатов ВВ, Ремарчук НП. Деградация древостоев в таёжных шелкопрядниках. Сиб. экол. ж. 2002; Прил. 1;3-12.
18. Жуков АБ, ред. Леса СССР. Леса Урала, Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука; 1969.
19. Жуков АМ. Грибные болезни Верхнего Приобья. Новосибирск: Наука; 1978.
20. Исаев АС, Рожков АС, Киселев ВВ. Черный пихтовый усач *Monochamus urusovi* (Fisch.). Новосибирск: Наука; 1988.
21. Казачинская ТП, Кондаков ЮП. Главнейшие вредные насекомые лиственных лесов Красноярского края. В кн.: Лиственный. Труды Сибирского технологического института. Красноярск; 1964.
22. Керчев ИА. Экология полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) в Западно-Сибирском регионе инвазии. Росс. журн. биол. инвазий. 2014;7(2):80-95.
23. Коломиец НГ. Изучение сибирского шелкопряда в Западной Сибири и перспективы использования его паразитов. В кн.: Сибирский шелкопряд. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР; 1960.
24. Кондаков ЮП. Сопряжённые очаги *Dendrolimus sibiricus* Tschtv., *Ocneria dispar* L. и *Semiothisa pumila* Kusn. в лиственных лесах Красноярского края. В: Уч. зап. Красноярск. пед. ин-та. Красноярск; 1959. С. 183-93.
25. Кондаков ЮП. Непарный шелкопряд (*Ocneria dispar* L.) в лесах Красноярского края. В кн.: Защита лесов Сибири от насекомых-вредителей. М.: Изд-во АН СССР; 1963. С. 30-77.
26. Кондаков ЮП. Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда. В кн.: Экология популяций лесных животных Сибири. Новосибирск: Наука; 1974а. С. 206-65.
27. Кондаков ЮП. Хохлатки (Lepidoptera, Notodontidae) – вредители лиственных пород Средней Сибири. В кн.: Вопросы энтомологии Сибири. Новосибирск: Наука; 1974б. С. 84-6.
28. Кондаков ЮП, Баранчиков ЮН, Черкашин ВП, Корец МА. Районы массового размножения насекомых-филлофагов в лесах Приенисейской Сибири: топографическая карта. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН; 2003а.
29. Кондаков ЮП, Баранчиков ЮН, Черкашин ВП, Корец МА. Районы массового размножения сибирского шелкопряда в лесах Приенисейской Сибири: топографическая карта. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН; 2003б.
30. Конев ГИ. Сосна, пораженная центральной гнилью, в Приангарье и ее раскряжевка. В: Тр. Вос.-Сиб. науч.-иссл. и проектн. ин-та лесн. и деревообрабатывающ. пром-ти. 1964;(2):77-84.
31. Корытный ЛМ, Тулохонов АК, ред. Восточная Сибирь Новосибирск: Гео; 2016. 396 с.
32. Кривец СА, Керчев ИА, Бисирова ЭМ, Волкова ЕС, Астапенко СА, Ефременко АА, Косилов АЮ, Кудрявцев ПП, Кузнецова ЮР, Пономарёв ВИ, Потапкин АБ, Тараскин ЕГ, Титова ВВ, Шилоносов АО, Баранчиков ЮН. Обзор современного вторичного ареала уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации. Росс. журн. биол. инвазий. 2024;17(1):49-69. DOI:10.35885/1996-1499-17-1-49-69.
33. Кривец СА, Керчев ИА, Бисирова ЭМ, Пашенова НВ, Демидко ДА, Петько ВМ, Баранчиков ЮН. Уссурийский полиграф в лесах Сибири (распространение, биология, экология, выявление и обследование повреждённых насаждений). Томск-Красноярск; 2015.
34. Кривоуцкая ГО. Скрытостволовые вредители в темных хвойных лесах Западной Сибири, повреждённых сибирским шелкопрядом. М.-Л.: Наука; 1965.
35. Павлов ИН, Рухуллаева ОВ, Барабанова ОА, Агеев АА. Оценка роли корневых патогенов в ухудшении состояния лесного фонда Сибирского федерального округа. Хвойные бореальной зоны. 2008;25(3-4):262-8.
36. Павлов ИН, Барабанова ОА, Агеев АА, Шкурченко АС, Кулаков СС, Шпенглер ДВ, Губарев ПВ. Основная причина массового усыхания пихтово-кедровых лесов в горах Восточного Саяна – корневые патогены. Хвойные бореальной зоны. 2009;26(1);33-41.
37. Пальникова ЕН, Свидерская ИВ, Суховольский ВГ. Сосновая пяденица в лесах Сибири. Новосибирск: Наука; 2002.
38. Плешанов АС. Насекомые-дефолианты лиственных лесов Восточной Сибири. Новосибирск: Наука; 1982.
39. Плешиков ФИ, ред. Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2002.
40. Побединский АВ. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья. М.: Наука; 1965.
41. Поликарпов НП, Чебакова НМ, Назимова ДИ. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука; 1986.

42. Прозоров СС. Пихтовая пяденица *Boarmia bistortata* Goeze как массовый вредитель пихты сибирской. Красноярск; 1955.
43. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике. Современный подход. М.: Финансы и статистика; 1982.
44. Рыбалко ТМ, Гукасян АБ. Бактериозы хвойных Сибири. Новосибирск: Наука; 1986.
45. Седых ВН. Лесообразовательный процесс. Новосибирск: Наука; 2009.
46. Татаринцев АИ. Эколого-ценотические особенности пораженности березняков бактериальной водяжкой в южной части Средней Сибири (Красноярская группа районов). Сиб. экол. ж. 2014(2):273-81.
47. Татаринцев АИ. К проблеме усыхания темнохвойных насаждений в южной части Средней Сибири. В кн.: Защита лесов от вредителей и болезней: научные основы, методы и технологии. Иркутск: Изд-во ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; 2015. С. 73-78.
48. Татаринцев АИ, Каленская ОП, Бубликов АГ. К вопросу пораженности корневой гнилью сосняков Минусинской котловины. Хвойные бореальной зоны. 2015;33(5-6):240-7.
49. Татаринцев АИ, Скрипальщикова ЛН. Эколого-фитопатологическое состояние березняков на территории Красноярской группы районов. Сибирский лесной журн. 2015;(2):8-19. DOI: 10.15372/SJFS20150201.
50. Татаринцев АИ, Скрипальщикова ЛН. Эколого-фитопатологическое состояние сосновых дендроценозов в лесах Красноярской группы районов. Хвойные бореальной зоны. 2018;36(4):322-33.
51. Черепанов АИ. Усачи Северной Азии (Laminae: Dorcadionini – Apomocytni). Новосибирск: Наука; 1983.
52. Яновский ВМ. Лесопатологическое районирование южной части Приенисейской Сибири. Красноярск: ИЛ СО РАН; 2003.
53. Baltensweiler W. Why the larch bud-moth cycle collapsed in the subalpine larch-cembra pine forests in the year 1990 for the first time since 1850. Oecologia. 1993;(94)1:62-6. DOI: 10.1007/BF00317302.
54. Baltensweiler W, Fischlin A. The Larch Budmoth in the Alps. In: Dynamics of Forest Insect Populations. Boston: Springer US; 1988. p. 331-51. DOI: 10.1007/978-1-4899-0789-9_17.
55. Benjamini Y, Hochberg Y. Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology. 1995;57(1):289-300.
56. Büntgen U, Frank D, Liebhold A, Johnson D, Carrer M, Urbinati C, Grabner M, Nicolussi K, Levanić T, Esper J. Three centuries of insect outbreaks across the European Alps. New Phytologist. 2009;182(4):929-41. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2009.02825.x.
57. Chlebicki A, Mukhin VA, Ushakova N. *Fomitopsis officinalis* on Siberian larch in the Urals. Mycologist. 2003;17(3):116-20. DOI: 10.1017/S0269915X03003057.
58. Kassambara A, Mundt F. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. 2020. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra> (access date: 03.06.2025).
59. Kharuk VI, Im ST, Yagunov MN. Migration of the Northern Boundary of the Siberian Silk Moth. Contemporary Problems of Ecology. 2018;11(1):26-34. DOI: 10.1134/S1995425518010055.
60. Maechler M, Rousseeuw P, Struyf A, Hubert M, Hornik K. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. 2023. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=cluster> (access date: 03.06.2025).
61. Özden S, Ünal S, Karadeniz M. The effect of *Melampsorella caryophyllacearum* (fir broom rust) on the morphological and anatomical traits of *Abies nordmanniana* subsp. *equi-trojani*. Forest Pathology. 2021;51(6):1-11. DOI: 10.1111/efp.12678.
62. Solla A, Camarero JJ. Spatial patterns and environmental factors affecting the presence of *Melampsorella caryophyllacearum* infections in an *Abies alba* forest in NE Spain. Forest Pathology. 2006;36(3):165-75. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2006.00443.x.
63. Venables WN, Ripley BD. Modern applied statistics with S. New York: Springer; 2002.
64. Weber UM. Dendroecological reconstruction and interpretation of larch budmoth (*Zeiraphera diniana*) outbreaks in two central alpine valleys of Switzerland from 1470 - 1990. Trees. 1997;11(5):277-90. DOI: 10.1007/PL00009674.

ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ ПО ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИМ ПРОВИНЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

А.Г. Шепелев

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

Эл. почта: carbon-shag@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2026; принята к печати 06.08.2026

Настоящее исследование посвящено оценке запасов общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в деятельном слое почвы (без напочвенного покрова) и многолетнемерзлых породах с дифференциацией по физико-географическим провинциям (54 категории), основанных на мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия). Территория Якутии аккумулирует в почве и верхней кровле многолетней мерзлоты 84,9 Гт $C_{\text{орг}}$. Равнинные провинции (60% площади) хранят 66,3 Гт, из них на долю ледового комплекса приходится 41,5 Гт углерода. Ландшафты с ледовым комплексом (16 провинций) весьма уязвимы, содержат наибольший запас органического углерода во вмещающих породах, что может привести к высвобождению большого количества углерода при деградации и таянии подземных льдов. Горные провинции, занимающие 40% площади, содержат до 18,6 Гт $C_{\text{орг}}$. Распределение запасов органического углерода в многолетнемерзлых породах показывает, что в провинциях сплошного типа распространения сосредоточено 77,5, прерывистого — 6,84 и островного — 0,58 Гт $C_{\text{орг}}$. Работа восполняет критический пробел в региональных оценках запасов углерода в одном из самых холодных регионов мира, обеспечивая научную основу для анализа рисков, связанных с таянием многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: запасы общего органического углерода, многолетнемерзлые породы, физико-географические провинции, Якутия

ORGANIC CARBON STORAGE IN ACTIVE LAYER AND PERMAFROST BY PHYSICAL- GEOGRAPHICAL PROVINCES OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

A.G. Shepelev

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Email: carbon-shag@yandex.ru

The present study assesses total organic carbon stocks in the active soil layer (excluding ground cover) and permafrost as they are distributed among the physiographic provinces (54 categories) defined based on the permafrost landscape map of the Sakha Republic (Yakutia). Yakutia accumulates 84.9 Gt of TOC in the soil and upper permafrost roof. Plain provinces (60% of area), store 66.3 Gt, of which the ice complex accounts for 41.5 Gt. Landscapes having an ice complex (16 provinces) are highly vulnerable containing the largest stock of organic carbon in host rocks, which may lead to the release of huge amounts of carbon during ground ice degradation and melting. Mountain provinces account for 40% of the total area and contain up to 18.6 Gt of the total sequestered carbon stock. Organic carbon stocks distribution among permafrost types reveals that continuous provinces contain 77.5 Gt, discontinuous provinces 6.84 Gt, and island provinces 0.58 Gt. These findings fill a critical gap in regional carbon stock estimates in one of the coldest regions of the world thereby providing a scientific basis for analyzing the risks associated with permafrost thawing.

Keywords: total organic carbon storage, permafrost, physical-geographical provinces, Yakutia

Введение

Почвы представляют значительный резервуар углерода на планете, вмещающий около 2500 млрд. т поглощенного углерода [87]. Площадь, занимаемая мерзлотными почвами, составляет 8,6 млн. км² или около 27% всей суши к северу от 50 с.ш. [95]. Климатические условия Якутии обуславливают сезонное протаивание почвы в теплый период и промерзание в зимний, что влияет на мощность деятельного слоя почвы. Би-

охимические и физико-химические процессы, происходящие в этом слое, вносят существенный вклад в генерацию экосистемного органического углерода. Почвы северных широт являются ключевым компонентом глобального углеродного цикла, а регион с многолетней мерзлотой покрывает 22% Северного полушария и содержит почти вдвое больше углерода, чем атмосфера. При этом запасы общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в разных климатических зонах

России недооцениваются из-за сложной неоднородности [68] и ландшафтного разнообразия. Исследования, посвященные захоронению почвенного органического углерода в условиях многолетней мерзлоты [60] предполагают, что глобальные запасы углерода занижены в два раза и более для субарктических и арктических экосистем. Связано это с преуменьшением значимости законсервированного углерода в криотурбированных и органических почвах [28, 42, 44, 46, 61, 80]. Более того не учтенными остаются участки с прерывистыми зонами мерзлоты, где большая часть ландшафта фактически остается без мерзлого основания.

В глобальном масштабе запасы углерода почв составляют 1417 Гт, на долю Российской Федерации приходится 216 Гт или 15% мировых запасов [31]. В циркумполярной области содержится порядка 1300–1395 Гт наземного органического углерода [41, 91], а в тундровых ландшафтах около 30% мирового запаса $C_{орг}$ [54]. Только в многолетнемерзлых породах (ММП) законсервировано порядка 850 Гт углерода [45]. Из-за таяния толщ ледового комплекса позднего плейстоцена они могут превратиться из поглотителя углерода в неизбежный его источник благодаря насыщенности органическим материалом и илистыми фракциями. В отложениях позднего плейстоцена находится 83 Гт углерода [77], а в голоценовых термокарстовых образованиях – 130 Гт [86]. Следовательно, отложения накапливались быстрыми темпами, что привело к захоронению исходного материала, а растительные и животные остатки не успели разложиться до конечных продуктов метаболизма. В современный период сохранность и стабильность углерода в многолетней мерзлоте во многом зависит от степени деградированности ММП и антропогенного влияния на экосистему. Наиболее опасными в высвобождении углерода из ландшафтов Якутии являются деградированные площади ледового комплекса с активным развитием термокарстовых процессов вследствие сокращения объема подземных льдов и их таяния, а также повышения температуры ММП, что является причинно-следственной связью утраты органического углерода из состава органического вещества почвы.

Изменения, происходящие в структуре климата планеты [27, 36] на обширных северных территориях, вызывают трансформацию мерзлотных ландшафтов, расширяясь в пространстве северной и восточной Сибири. Результаты проявляются в виде образования озер, заболачивания и термоцирков, доминирующих в ландшафте. Происходят активизация криогенных процессов (термокарст, пучение, термоабразия и др.) и повсеместная деградация мерзлоты. При этом повышаются риски потерь резервуаров органического вещества из почвенного покрова и ММП, что вызывает ускоренное анаэробное и аэробное микробное разложение [38], потенциально ведущее к увеличению

выбросов парниковых газов в атмосферу, создающих положительную обратную связь с повышением температуры воздуха [79]. При этом происходит глубокое прогревание почвы, что способствует активному разложению и потерям ее органической части с изменением гидрологических условий [40], сопровождающимися высокой нагрузкой парниковых газов на атмосферу. Прогнозные оценки показывают, что к 2100 году деградация многолетней мерзлоты способна увеличить газообразные потери почвенного углерода на 5–15% за счет мобилизации его депонированной части [69].

Цель работы – количественная оценка запасов $C_{орг}$ в почвах и ММП различных физико-географических провинций Республики Саха (Якутия) в толще 0–3 м. В исследовании решались задачи по анализу и обобщению полевых и литературных данных для составления карты распределения $C_{орг}$ в пределах указанных провинций.

Материалы и методы исследований

Прямые измерения содержания $C_{орг}$ в мерзлотных ландшафтах получены в результате отбора образцов почвы и многолетнемерзлых отложений в полевых условиях на обширной территории Якутии в течение 10 лет. Запасы $C_{орг}$ оценены из собственного и обобщенного научного материала по мерзлотным почвам и ММП Якутии [2–4, 6–11, 18, 20, 22–26, 29, 30, 32, 33, 35, 37, 41, 43, 47, 50–52, 57, 59, 63–67, 69–76, 78, 82–84, 86, 88–90, 93, 94, 96].

Содержание $C_{орг}$ определяли на сертифицированном элементном анализаторе LECO RC-612 в твердых образцах по стандарту DIN19539 методом температурного программирования, что позволяет идентифицировать различные формы углерода. Анализ проведен в трех определениях. Запасы $C_{орг}$ рассчитаны отдельно для каждого генетического горизонта почвы и ММП с интервалом отбора образцов 20–40 см в зависимости от чередования состава отложений, затем суммировались для получения общих запасов в почве и ММП. Расчет запасов $C_{орг}$ выполнен с использованием формулы (1).

$$S = X \times \rho \times H \times f \quad (1)$$

где: S – запасы углерода в почве и ММП, кг/м²; X – содержание $C_{орг}$ в почве и ММП, %; ρ – плотность сложения почвы и ММП, г/см³; H – мощность генетического горизонта, см; f – доля фракции <2 мм в минеральном горизонте. Для определения в минеральных горизонтах доли мелкозема (<2 мм) образцы просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. Его доля во всех минеральных слоях равнинных территорий составляет 100%, поэтому в формуле расчета запасов $C_{орг}$ этот показатель не учитывался. В почвах с преобладанием фракции <2 мм рассчитывали долю мелкозема и ис-

пользовали ее в формуле (1). Для расчета плотности в почвенных образцах, отобранных из генетических горизонтов, использовали стальные цилиндры объемом 100 см³. Для определения плотности мерзлых пород учитывали содержание льда и минеральной части с пересчетом на сухую навеску, что обеспечивает корректное сопоставление с почвенными значениями.

В настоящем исследовании анализ напочвенного покрова не проведен и из расчета запасов $C_{орг}$ почв и ММП исключен. Данный подход соответствует методологии, применяемой в базе данных The Northern Circumpolar Soil Carbon Database (NCSCD) [41].

Торфяные, грубогумусовые и гумусовые горизонты отбирали как часть почвенного разреза и учитывали в расчетах запасов с указанием их мощности. Растительные остатки (корни, тонкие корневые волоски, животные остатки, фрагменты стеблей и угля) из минеральных горизонтов удаляли вручную перед анализом, чтобы избежать завышения содержания $C_{орг}$.

При анализе литературных данных по содержанию $C_{орг}$ в почве и отложениях основное внимание уделено методу сухого сжигания. В случае отсутствия данных по содержанию углерода для определенной уникальной провинции Якутии использованы результаты измерений гумуса, полученные методом Тюрина в различных модификациях. Эти данные пересчитаны на углерод с использованием коэффициента 1,724. Следует отметить, что результаты, полученные таким способом, варьируют в зависимости от типа почвы. В настоящей работе доля таких публикаций составила 9%.

Недостающие данные по органическому углероду для физико-географических зон Якутии восполнены из международной базы данных по углероду циркумполярных почв NCSCD и литературных источников, в том числе из базы публикаций Pangaia [35], относящихся непосредственно к изучаемой территории. NCSCD создана для решения проблемы роли многолетней мерзлоты в глобальном цикле углерода. В ней связаны 1778 почвенных педонов – от северных районов многолетней мерзлоты до нескольких оцифрованных региональных и национальных почвенных карт – с целью комплексного циркумполярного покрытия. В совокупности эти наборы данных используют для количественной оценки законсервированного $C_{орг}$ в верхнем слое почвы на глубине 0–30 см и ниже 1 м для ММП. В нашем исследовании взята толща 0–3 м (сумма 0–1, 1–2 и 2–3 м), что позволяет включить не только собственно генетические горизонты почвы, но и верхнюю часть мерзлоты, где находятся значительные запасы углерода. Если ограничиться только 0–30 см, общая региональная оценка запасов $C_{орг}$ окажется существенно ниже, особенно для отложений ледового комплекса, в которых высокое содержание $C_{орг}$ зафиксировано на глубинах до 3–5 м. Например, в слое 0–30 см заключено около 30% от общего запаса в 0–3

м толще, а присоединение глубоких горизонтов увеличивает региональную оценку примерно в 3 раза [41, 70, 78], что критически важно для экологического и геоэкологического мониторинга при деградации многолетней мерзлоты.

Информационная основа NCSCD – это набор координатных точек, полученных из различных региональных почвенных карт, литературы, прогнозного анализа и типов распространения ММП. База данных позволяет использовать периодически обновляющийся набор сведений с координатной привязкой на основе полигонов, доступных в виде Tiff-файлов и двоичного формата файлов Network Common Data Form. Собранный материал в статье показывает число определений для конкретных почвенных групп, являющихся достаточными, тогда как в других случаях их не хватает для статистической достоверности [1, 12]. Поэтому важно, чтобы каждый класс выборки являлся статистически достоверным для использования в региональных базах данных. Однако общее число точек отбора в базе данных не определяет точность, ключевым фактором является репрезентативность каждого отдельного класса в полигоне [19, 53].

Для создания карты запасов $C_{орг}$ применена методика и принципы составления мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия) [16, 17]. На ее основе и границах ландшафтных комплексов проведено картографирование углерода в масштабе 1:11 350 000. В результате построены полигоны на всю территорию республики, каждому полигону присвоены данные о запасах углерода по физико-географическим провинциям. Картографические работы выполнены в геоинформационной среде с открытым исходным кодом QGIS ver. 3.40.10-Bratislava. Первичная статистическая обработка данных осуществлена в программе Statistica ver. 10 для Windows 10 для расчета стандартного отклонения из собранного массива данных и отдельно для каждой физико-географической области Якутии.

Результаты исследования и обсуждение

Республика Саха (Якутия) самый крупный субъект Российской Федерации с площадью 3,1 млн. км², расположена в трех физико-географических странах: Средней, Северо-Восточной и горах Южной Сибири, включающие 54 региональные провинции от равнинных территорий до горных систем и вмещающие колоссальные запасы $C_{орг}$ (табл. 1).

В таблице представлены средние запасы $C_{орг}$ в кг/м², на основе которых проведены расчеты для каждой провинции. Большую часть территории Якутии занимают мерзлотные ландшафты, литогенную основу которых составляют ММП [34] с характерными криогенными процессами и различной мощностью мерзлой толщи. Выделяются три типа развития и распространения мно-

Табл. 1.

Сводная характеристика запасов общего органического углерода, приуроченных к провинциям Республики Саха (Якутия)

Мерзотно-ландшафтное районирование*	Провинция	Площадь (км ²)	% от общей площади	Средние запасы в деятельном слое и МПП 0–3 м (кг/м ²)* [источник данных]	Запасы на площадь (Гт)
А. Страна Средняя Сибирь					
<i>I. Группа тундровых провинций сплошного распространения ММП</i>					
A.I.1	Анабаро-Оленекская озерно-термокарстовая	55504	1,8	30,00±4,50 [42, 44, 61, 80]	1,67±0,25
<i>II. Группа северотаежных провинций сплошного распространения ММП</i>					
A.II.1	Анабаро-Оленекская задровая	44711	1,5	15,00±1,80 [42, 80]	0,67±0,08
A.II.2	Аргасалинская задровая	26210	0,9	10,00±1,20 [12, 46, 80]	0,26±0,03
A.II.3	Оленекская увалистая	176686	5,7	37,50±4,50 [42, 80]	6,63±0,80
A.II.4	Эйикская водораздельно-маревая	104747	3,4	74,13±11,12 [12, 46, 80]	7,76±1,67
A.II.5	Нижнеленская северно-термокарстовая	29294	1,0	46,00±6,90 [42, 80]	1,35±0,20
A.II.6	Приленская моренная	48103	1,6	35,19±4,22 [42, 80]	1,69±0,20
A.II.7	Приалданская морено-задровая	31452	1,0	16,92±2,03 [31, 80]	0,53±0,06
<i>III. Группа провинций с горно-тундровыми и горно-редколесными природными комплексами сплошного распространения ММП</i>					
A.III.1	Анабарская плоскогорная	24052	0,8	29,00±5,80 [42, 80, 88]	0,70±0,14
A.III.2	Хара-Тасская плоскогорная	8634	0,3	24,25±4,85 [61, 80, 88]	0,21±0,04
A.III.3	Кыстыкская грядово-ступенчатая	14801	0,5	24,67±4,93 [12, 46, 80, 88]	0,37±0,07
A.III.4	Верхневиллюйская столово-останцовая	63521	2,1	27,40±5,48 [12, 46, 80, 88]	1,74±0,35
<i>IV. Группа среднетаежных провинций сплошного распространения ММП</i>					
A.IV.1	Тунгусско-Ботубинская ступенчато-грядовая	136600	4,4	20,00±2,10 [12, 46, 80]	2,73±0,27
A.IV.2	Средневиллюйская пологоувалистая	96514	3,1	25,00±2,50 [12, 46, 80]	2,41±0,24
A.IV.3	Виллюйская аласная	141534	4,6	28,00±3,36 [31, 80]	3,96±0,48
A.IV.4	Лено-Виллюйская пологоволнистая	88497	2,9	27,30±2,13 [41, 80]	2,42±0,24
A.IV.5	Лено-Амгинская аласная	58895	1,9	30,32±3,64 [27, 31, 36, 38, 42, 45, 54, 77, 80, 86, 91]	1,79±0,21
A.IV.6	Лено-Алданская карстовая	82872	2,7	25,67±3,85 [12, 46, 80]	2,13±0,32
A.IV.7	Амгино-Алданская пологоувалистая	107923	3,5	34,98±3,50 [42, 79, 80]	3,78±0,39
A.V.1	Нюя-Олекминская увалистая	55504	1,8	28,13±4,22 [12, 46, 80]	1,56±0,23
A.V.2	Олекмо-Алданская увалистая	100831	3,3	31,75±4,76 [12, 46, 80]	3,20±0,48
<i>VI. Группа среднетаежных провинций островного распространения ММП</i>					
A.VI.1	Приленская увалистая	23743	0,8	24,42±4,40 [12, 46, 80]	0,58±0,10
Б. Страна гор Южной Сибири					
<i>I. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных природных комплексов прерывистого распространения ММП</i>					
B.I.1	Олекмо-Чарская низкогорная	15726	0,5	19,42±4,27 [12, 46, 80, 88]	0,31±0,07
<i>II. Группа провинций с горно-таежными и горно-редколесными природными комплексами прерывистого распространения ММП</i>					
B.II.1	Олекмо-Тимптонская плоскогорная	48720	1,6	16,54±3,31 [12, 46, 80, 88]	0,81±0,16
B.II.2	Чульманская плоскогорная	14184	0,5	19,33±3,87 [40, 80, 88]	0,27±0,06
<i>III. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных и подгольцовых природных комплексов сплошного и прерывистого распространения ММП</i>					
B.III.1	Становая среднегорная	22202	0,7	11,00±2,42 [69, 80, 88]	0,24±0,05
B.III.2	Тимптоно-Учурская среднегорная	96823	3,1	11,73±2,58 [35, 80, 88]	1,14±0,25
В. Страна Северо-Восточная Сибирь					
<i>I. Группа провинций арктическо-тундровых островов сплошного распространения ММП</i>					
B.I.1	Провинция Новосибирских островов	37619	1,2	66,00±18,48 [42, 43, 48, 53, 73, 80, 83, 84, 90, 93]	2,48±0,70
<i>II. Группа тундровых провинций сплошного распространения ММП</i>					

Мерзотно-ландшафтное районирование*	Провинция	Площадь (км ²)	% от общей площади	Средние запасы в деятельном слое и ММП 0–3 м (кг/м ²)* [источник данных]	Запасы на площадь (Гт)
В.П.1	Дельта р. Лены	26210	0,9	114,19±34,26 [2, 12, 29, 30, 42, 48, 50, 52, 70, 72, 80, 83, 84, 93]	2,99±0,90
В.П.2	Нижнеянская северо-термокарстовая	41936	1,4	36,48±5,47 [42, 48, 80]	1,53±0,23
В.П.3	Нижнеиндигирская озерно-термокарстовая	99906	3,3	42,50±6,38 [30, 38, 42, 43, 76, 80, 83, 84, 93]	4,25±0,64
В.П.4	Алазее-Колымская озерно-термокарстовая	65988	2,1	30,92±4,64 [42, 66, 80, 83, 86, 89, 96]	2,04±0,31
<i>III. Группа северотаежных провинций сплошного распространения ММП</i>					
В.П.1	Абыйская озерно-термокарстовая	50262	1,6	38,64±5,80 [42, 80]	1,94±0,29
В.П.2	Колымская озерно-термокарстовая	124574	4,0	47,71±7,16 [30, 42, 43, 48, 57, 64, 67, 74, 80, 86]	5,94±0,89
<i>IV. Группа провинций с преобладанием горно-тундровых природных комплексов сплошного распространения ММП</i>					
В.П.1	Кряжи Прончищева и Чекановского	42861	1,4	3,00±0,66 [26, 33, 48, 80, 83, 84, 88, 93]	0,13±0,03
В.П.2	Хараулахская низкогорная	33919	1,1	7,50±1,65 [32, 72, 80, 88]	0,25±0,06
В.П.3	Куларская низкогорная	20351	0,1	7,00±1,54 [12, 46, 80, 88]	0,14±0,03
В.П.4	Полоусненская низкогорная	69688	2,3	5,60±1,23 [12, 46, 80, 88]	0,39±0,09
В.П.5	Кондаковско-Улахансисская низкогорная	24360	0,8	6,90±1,52 [12, 46, 80, 88]	0,17±0,04
В.П.6	Северо-Ануйская низкогорная	5039	0,2	8,00±1,76 [43, 80, 88]	0,04±0,01
<i>V. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных природных комплексов сплошного распространения ММП</i>					
В.П.1	Приверхоянская моренная	30219	1,0	29,33±5,87 [12, 46, 80]	0,89±0,18
В.П.2	Янская плоскогорная	64754	2,1	36,08±7,22 [42, 78, 80, 82, 88]	2,34±0,47
В.П.3	Адыче-Эльгинская плоскогорная	83564	2,7	20,17±4,03 [12, 46, 80, 88]	1,69±0,34
В.П.4	Оймяконская плоскогорная	33611	1,1	16,45±3,29 [80, 88, 94]	0,55±0,11
В.П.5	Алазейская плоскогорная	21021	0,7	30,42±6,08 [12, 46, 80, 88]	0,64±0,13
В.П.6	Нерская плоскогорная	13568	0,5	19,67±3,93 [12, 46, 80, 88]	0,27±0,05
В.П.7	Юкагирская низкогорная	53345	1,7	23,20±4,64 [12, 46, 80, 88]	1,24±0,25
<i>VI. Группа провинций с горно-тундровыми и горно-редколесными природными комплексами сплошного распространения ММП</i>					
В.П.1	Орулганская среднегорная	81714	2,7	5,83±1,46 [12, 46, 80, 88]	0,48±0,12
В.П.2	Верхоянская среднегорная	69380	2,3	7,25±1,81 [75, 80, 88]	0,50±0,13
В.П.3	Сетте-Дабанская среднегорная	50262	1,6	10,25±2,56 [65, 80, 88]	0,52±0,13
В.П.4	Сунтар-Хаятинская среднегорная	30527	1,0	10,38±2,59 [12, 46, 80, 88]	0,32±0,08
В.П.5	Черская среднегорная	108232	3,5	10,00±2,50 [43, 59, 63, 80, 88]	1,08±0,27
В.П.6	Момская среднегорная	55195	1,8	14,27±3,57 [80, 88]	0,79±0,20
<i>VII. Группа провинций с преобладанием горно-редколесных и северотаежных природных комплексов сплошного распространения ММП</i>					
В.П.1	Момо-Селенняхская межгорно-котловинная	27135	0,9	16,79±3,02 [12, 46, 80, 88]	0,46±0,08
Итого:		3083523	100	25,71±4,66	84,94±12,10

*Примечание. А.П.1 - Анабаро-Оленекская озерно-термокарстовая, А.П.2 - Анабаро-Оленекская зандровая, А.П.3 - Аргасалинская зандровая, А.П.4 - Оленекская увалистая, А.П.5 - Эйикская водораздельно-маревая, А.П.6 - Нижнеянская северо-термокарстовая, А.П.7 - Приленская моренная, А.П.8 - Приалданская морено-зандровая. ММП А.П.1 - Анабарская плоскогорная, А.П.2 - Хара-Тасская плоскогорная, А.П.3 - Кыстыкская грядово-ступенчатая, А.П.4 - Верхневилуйская столово-останцовая, А.П.5 - Тунгусско-Ботуобинская ступенчато-грядовая, А.П.6 - Средневилуйская пологоувалистая, А.П.7 - Вилуйская аласная, А.П.8 - Лено-Вилуйская пологоволнистая, А.П.9 - Лено-Амгинская аласная, А.П.10 - Лено-Алданская карстовая, А.П.11 - Амгино-Алданская пологоувалистая, А.П.12 - Олекмо-Алданская увалистая, А.П.13 - Приленская увалистая, Б.П.1 - Олекмо-Чарская низкогорная, Б.П.2 - Олекмо-Тимптонская плоскогорная, Б.П.3 - Чульманская плоскогорная, Б.П.4 - Становая среднегорная, Б.П.5 - Тимптоно-Учурская среднегорная, В.П.1 - Провинция Новосибирских островов, В.П.2 - Дельта р. Лены, В.П.3 - Нижнеянская северо-термокарстовая, В.П.4 - Нижнеиндигирская озерно-термокарстовая, В.П.5 - Алазее-Колымская озерно-термокарстовая, В.П.6 - Абыйская озерно-термокарстовая, В.П.7 - Колымская озерно-термокарстовая, В.П.8 - Кряжи Прончищева и Чекановского, В.П.9 - Хараулахская низкогорная, В.П.10 - Куларская низкогорная, В.П.11 - Полоусненская низкогорная, В.П.12 - Кондаковско-Улахансисская низкогорная, В.П.13 - Северо-Ануйская низкогорная, В.П.14 - Приверхоянская моренная, В.П.15 - Янская плоскогорная, В.П.16 - Адыче-Эльгинская плоскогорная, В.П.17 - Оймяконская плоскогорная, В.П.18 - Алазейская плоскогорная, В.П.19 - Нерская плоскогорная, В.П.20 - Юкагирская низкогорная, В.П.21 - Орулганская среднегорная, В.П.22 - Верхоянская среднегорная, В.П.23 - Сетте-Дабанская среднегорная, В.П.24 - Сунтар-Хаятинская среднегорная, В.П.25 - Черская среднегорная, В.П.26 - Момская среднегорная, В.П.27 - Момо-Селенняхская межгорно-котловинная. М ± SD - стандартное отклонение.

голетней мерзлоты: островная, прерывистая и сплошная, причем последний тип преобладает в иерархии мерзлотных ландшафтов республики. Арктические и бореальные области концентрируют в ландшафтах до 50% мирового пула органического углерода [39, 69]. Необходимо помнить, что арктические водно-болотные угодья сохраняют тенденцию к поглощению углерода из атмосферы. Данное утверждение подтверждается новыми исследованиями [49]: увеличение секвестрации углерода происходит, вопреки деградации ММП, на 12–18% или 0,8–1,2 Гт С в год за счет роста первичной продуктивности растительности и потепления климата. И наоборот, бореальные экосистемы являются источниками углерода, особенно болота Западной Сибири и торфяные земли Юго-Восточной Азии вследствие пожаров, засух и снижения уровня воды. Поэтому положительный эффект аккумуляции углерода в Арктике компенсируется негативными последствиями в перечисленных регионах мира.

В сложных мерзлотных условиях Якутии процессы формирования и аккумуляции углерода происходили в два этапа, различающихся по механизмам сохранения и вовлечения органического вещества в биогеохимические циклы. На первом этапе, охватывающем плейстоцен (2,59 млн – 11,7 тыс. лет назад), углерод накапливался в законсервированной форме во вмещающих отложениях ММП. Этот процесс обусловлен действием криогенных процессов – промерзания, морозобойного растрескивания и термокарста, которые обеспечивали физическую консервацию органического вещества и предотвращали его минерализацию. Сохранность углерода на этом этапе напрямую зависела от состояния ММП, выступавших в роли криогенного консерванта. На втором этапе, голоцене (11,7 тыс. лет назад – настоящее время), углерод активно вовлечен в экосистемный круговорот веществ. Его ежегодное обновление тесно связано с продуктивностью биогеоценозов, интенсивностью обменных процессов между почвой, растительностью и атмосферой. В этих условиях углерод накапливается в напочвенном покрове, гумусовом и торфяном горизонтах, формируя современный деятельный слой. Как итог, аккумуляция углерода в регионе происходила на протяжении двух геологических эпох: более древний углерод плейстоценового возраста постепенно дополняется вновь образованным $C_{орг}$ из современного ландшафта, что создает сложную стратиграфию запасов углерода. Закономерности данного процесса фиксируются в двух пространственных масштабах. На региональном уровне они проявляются в виде значительных вариаций содержания $C_{орг}$ между физико-географическими провинциями – от равнин Центральной Якутии до примитивных почв горных систем. На локальном уровне они выражаются в распределении $C_{орг}$ по профилю генетических горизонтов почвы и

мерзлых отложений, где последовательно сменяют друг друга.

В настоящее время цикл углерода протекает в деятельном слое почвы, включая почвообразующую породу, а иногда в защитном слое ММП, когда он при благоприятных климатических условиях сливается с деятельным слоем. Этот цикл включает происходящие в почве микробиологические и физико-химические процессы, которые отвечают за переработку и минерализацию органического вещества, а также за генерацию углерода в экосистеме. При изменении климатических условий и сдвиге температурного режима в криолитозоне активизируются термокарстовые процессы, приводящие к таянию ММП и утрате ранее законсервированного углерода, что сопровождается усилением эмиссии активных атмосферных газов.

На рис. 1 показаны расчеты запасов $C_{орг}$ по физико-географическим провинциям Якутии.

Развитие верхней кровли многолетней мерзлоты в определенных орографических условиях предопределяет консервацию углеродсодержащих веществ. Для понимания функционирования биологических систем в геологических формациях криолитозоны необходима оценка их связи с потенциальной дестабилизацией природной среды в экстремальных условиях Арктики и бореальных экосистем. По результатам анализа полевых исследований и литературных данных, запасы $C_{орг}$ в пределах Якутии характеризуются значительной пространственной неоднородностью (см. табл. 1). Максимальная аккумуляция углерода приурочена к равнинным мерзлотным ландшафтам – тундровым, северо- и среднетаежным провинциям, которые занимают 42% территории, но обеспечивают основную долю секвестрации $C_{орг}$ в почвах и ММП. Наименьшие запасы, напротив, свойственны горным территориям Южной Сибири и провинциям с преобладанием горных природных комплексов. Суммарные запасы $C_{орг}$ в почве и ММП оценены в 85 Гт, что подчеркивает значительный вклад региона в глобальный пул углерода криолитозоны.

Основные запасы $C_{орг}$ сосредоточены в районах распространения ММП сплошного типа, занимающие 89,6% территории Якутии. В количественном выражении эти запасы составляют 77,5 Гт. Прерывистый тип ММП охватывает 9,6% площади и характеризуется запасами в размере 6,84 Гт. Островной тип ММП является наименее распространенным, охватывая лишь 0,8% площади, в нем аккумулировано 0,58 Гт. Определенную уязвимость представляют мерзлотные ландшафты Якутии, развитые на ледовом комплексе (ЛК). Их занимаемая площадь составляет 1 043 990 км² или 34% территории республики. К мерзлым толщам ЛК относятся физико-географические провинции (всего 16): А.I.1, А.II.1, А.II.4, А.II.5, А.II.7, А.IV.3, А.IV.4, А.IV.5, В.I.1, В.II.1, В.II.2, В.II.3, В.II.4, В.III.1, В.III.2 и В.IV.1.

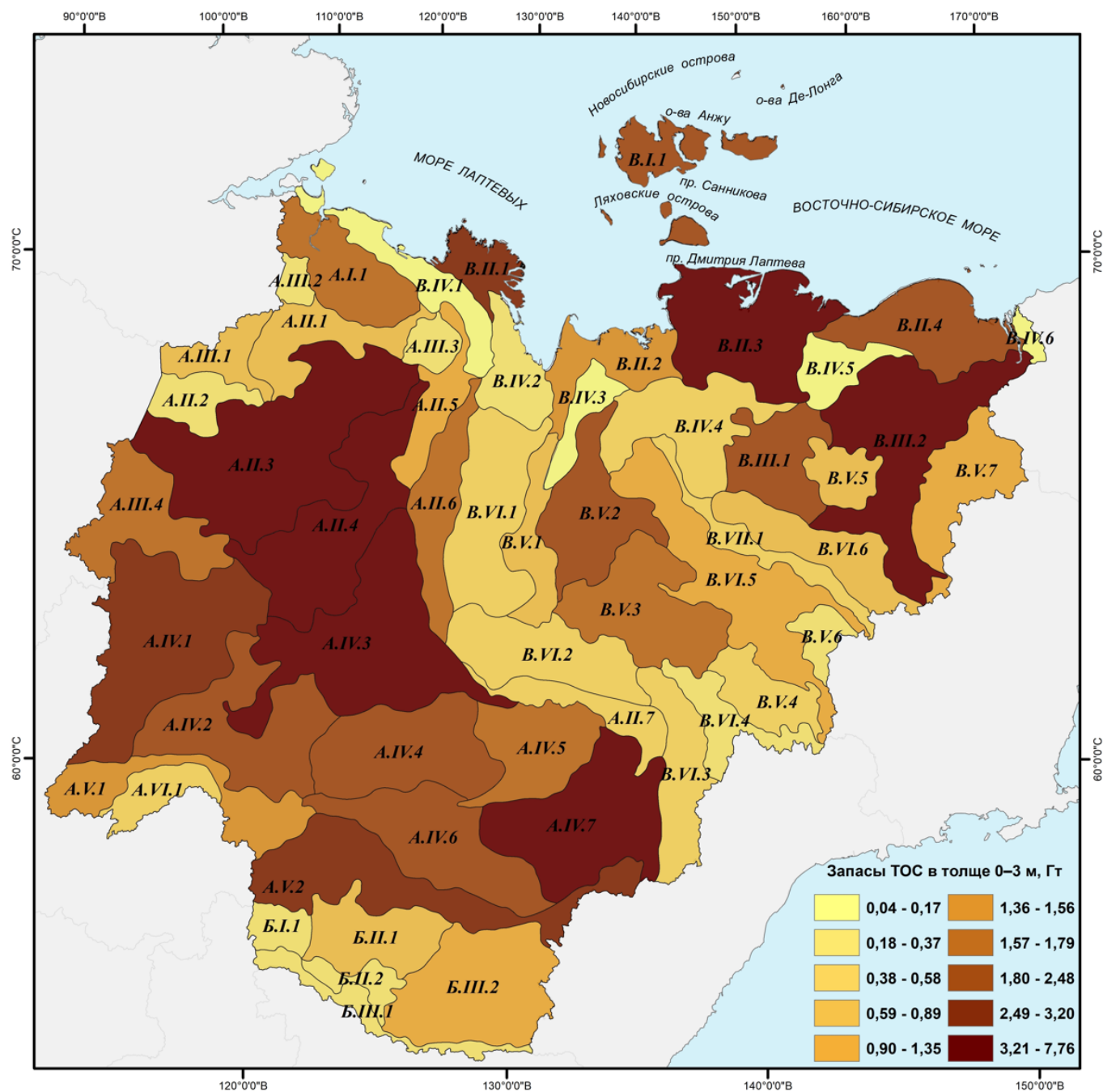


Рис. 1. Запасы $C_{\text{орг}}$ в толще 0–3 м почвенного покрова (без напочвенного покрова) и МПП в физико-географических провинциях Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:11 350 000

Породы ЛК неустойчивы к изменению теплового режима грунтов, что обусловлено их повышенной льдистостью, достигающей до 90% занимаемого объема мерзлых отложений [5]. При их деградации и потере части подземного льда высвободится неопределенное количество углерода в разных формах: от газообразных до водорастворимых. На основании имеющихся данных о содержании органического углерода в по-

чвах и ММП провинций ледового комплекса установлено, что общий запас $C_{\text{орг}}$ составляет 41,5 Гт.

Неопределенность оценок углерода связана со степенью активизации экзогенных процессов, происходящих в криосфере. Какое продолжительное время термокаст будет воздействовать на ЛК и получит ли дальнейшее развитие при повышении температуры воздуха? Изменятся ли растительные сообщества и ра-

стителный покров, выполняющие функцию защитного барьера для многолетней мерзлоты [14, 15]? Учтено ли достоверно и полностью количество запасенного углерода в почве и ММП? Ответить на эти вопросы можно будет спустя время, наблюдая за динамикой температуры воздуха и грунтов, а также анализируя космические снимки для выявления термокарстовых процессов и их развития. Однако сейчас известно, что выбросы углерода могут снижаться на завершающейся стадии деградации ММП, то есть при сокращении (вытаивании) объема подземных льдов [56, 81, 85].

Полученные данные позволяют дифференцировать не только запасы, но и потенциальные риски их высвобождения. Несмотря на то, что горные провинции занимают 40% территории и содержат 18,6 Гт $C_{орг}$ (22% от общих запасов), их уязвимость к термокарсту и деградации ММП существенно ниже, чем у равнинных территорий. Это связано с литогенной основой и меньшим наличием подземного льда в отложениях и естественным дренажем территории. Напротив, равнинные провинции, особенно зоны сплошного распространения ММП, являются критическими областями с точки зрения обратной связи с климатом. Повторим, здесь сосредоточено 77,5 Гт $C_{орг}$, причем ключевая роль принадлежит экосистемам, развитым на средне- и высокольдистых отложениях ЛК. Сокращение площади ЛК вследствие убыли повторно-жильных льдов может привести к необратимой трансформации рельефа, изменению гидрологического режима и, как следствие, смене типа растительности, что в начальной стадии резко усилит выделение парниковых газов и потери большей части законсервированного органического вещества почвы.

Ключевыми взаимосвязями для минерализации почвенного органического вещества при деградации ММП служит почвенный азот и углерод, то есть отношение C/N и микробиологическая активность, но поскольку содержание азота в почвах и отложениях Якутии низкое, не следует ожидать полной утраты углерода из экосистемы. Отношение C/N играет важную роль в интенсивности и скорости разложения растительных остатков, а также на активность гетеротрофных микроорганизмов в естественных условиях окружающей среды. Высокое содержание $C_{орг}$ в сочетании с низким содержанием общего азота способствует слабому разложению поступающего, а также законсервированного органического материала, что обусловлено замедлением процесса аммонификации (разложение азотсодержащих органических веществ) на бедных азотом средах и в холодных условиях. Поэтому следует полагать, что органическое вещество с высоким содержанием $C_{орг}$ нарушает соотношение между C/N и приводит к иммобилизации азота микроорганизмами. В таком случае азот не аккумулируется в почве, а расходуется микроорганизмами,

переводится в микробную биомассу и выделяется в атмосферу в виде N_2O (закиси азота). При активизации криогенных процессов. Например, средняя и высокая льдистость многолетнемерзлых толщ ЛК и едомных возвышенностей проявляется в виде полигонального морозобойного растрескивания грунтов и сопровождается ростом повторно-жильных льдов. В результате происходит механическое перемещение органического материала, что способствует его перераспределению в верхних слоях почвы и в более глубокие вмещающие породы, где он становится менее доступным для микробного разложения. Это способствует консервации углерода в ММП, что особенно важно в условиях потепления климата, когда деградация мерзлоты приводит к высвобождению значительного объема углерода в атмосферу.

С одной стороны, термокарст способствует консервации углерода под слоем воды или минеральных отложений, что замедляет его разложение. С другой, происходит активная эмиссия углерода. Многое зависит от конкретных условий мерзлотного ландшафта и степени деградированности ЛК.

Таким образом, комплекс биолого-геологических условий оказывают значительное влияние на потери, распределение и динамику $C_{орг}$ в ландшафте. Но не следует говорить о едином пагубном влиянии циклического изменения климата на функционирование мерзлотных ландшафтов. Новые исследования по потеплению климата свидетельствуют о позеленении Арктики и смещении границы леса ближе к северному пределу [51, 55, 58, 62, 92]. Безусловно, проверка этих заключений требует наблюдений за большим рядом данных и мониторинга растительного покрова с помощью дистанционного зондирования земли.

Заключение

Проведенное исследование представляет собой первую полноценную для Республики Саха (Якутия) оценку запасов $C_{орг}$ в деятельном слое почвы и верхней кровле многолетнемерзлых пород с детализацией до уровня физико-географических провинций.

Территория Якутии аккумулирует в почве и многолетней мерзлоте около 84,9 Гт общего органического углерода. Равнинные провинции, занимающие около 60% площади республики, хранят 66,3 Гт, причем 48,8% от общих запасов (или 41,5 Гт $C_{орг}$) приходится на почвы и отложения ледового комплекса. Горные территории, охватывающие порядка 40% площади, содержат 18,6 Гт $C_{орг}$, что составляет 22% от суммарных запасов углерода в регионе.

Дифференциация запасов общего органического углерода по типу распространения ММП показывает подавляющее доминирование зоны сплошной мерзлоты (77,5 Гт) над прерывистой (6,84 Гт) и островной (0,58 Гт).

Высокая степень уязвимости ландшафтов ледового комплекса, которые, занимая лишь треть территории, концентрируют почти половину всего депонированного углерода Якутии, позволяет рассматривать их в качестве наиболее критического геологического образования при прогнозировании эмиссии парнико-

вых газов в условиях деградации многолетней мерзлоты.

Исследования выполнены в рамках базового проекта «Эволюция и устойчивость мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 126020516688-9).

Литература

1. Гаврилюк ЕА, Кузнецова АИ, Горнов АВ. Геопространственное моделирование содержания и запасов азота и углерода в лесной подстилке на основе разносезонных спутниковых изображений Sentinel-2. Почвоведение. 2021;2:168-82. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020040>
2. Данилова АА, Данилов ПП, Макаров ВС, Винокуров АА. Некоторые биологические особенности почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья. Почвы и окружающая среда. 2024;7(1):e245. <https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245>
3. Золотарева БН, Фоминых ЛА, Холодов АЛ, Ширшова ЛТ. Состав гумуса разновозрастных погребенных почв тундровой зоны. Почвоведение. 2009;5:540-50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11919137&ysclid=msn8jggps3910756928>
4. Иванова ТИ, Кузьмина НП, Чербунина МЮ. Микробное сообщество активного слоя почвы из обнажения Мамонтовой горы. Вестник Северо-Восточного научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2017;4:95-102. URL: <https://elibrary.ru/yptrbvd?ysclid=msn8kpti2t535391401>
5. Конищев ВН. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата. Криосфера Земли. 2011;4:15-8. URL: https://earthcryosphere.ru/archive/2011_4/03.Konishhev_4_2011.pdf?ysclid=msn8mcta2m885536450
6. Оконешникова МВ. Почвы Хараулахского хребта на самой северной границе леса. Современные проблемы науки и образования. 2016;5:306. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=25203&ysclid=msn8n8ms4e26062593>
7. Оконешникова МВ. Фракционно-групповой состав гумуса подбуров Южной Якутии. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018;6:239-43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36634865&ysclid=msn800ol82721421385>
8. Оконешникова МВ, Десяткин РВ. Почвы бассейна реки Тимптон (Южная Якутия). География и природные ресурсы. 2011;3:83-91. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16755404&ysclid=msn8or92ds624034563>
9. Оконешникова МВ, Десяткин РВ. Почвы северных отрогов хребта Черского в районе полюса холода: морфология, свойства, классификация. Почвоведение. 2017;8:926-35. DOI: 10.7868/S0032180X17080093
10. Оконешникова МВ, Иванова АЗ, Десяткин РВ. Почвы Верхоянского хребта в пределах Арханского плато. Почвоведение. 2020;5:509-18. DOI: 10.31857/S0032180X2005010X
11. Оконешникова МВ, Софронов РР. Почвы предгорий хребта Сетте-Дабан (северо-восточная Якутия). Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018;2:42-7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32508990&ysclid=msn8pk5r8v131130233>
12. Пастухов АВ, Каверин ДА, Щанов ВМ. Построение региональных цифровых тематических карт (на примере карты запасов углерода в почвах бассейна р. Уса). Почвоведение. 2016;9:1042-51. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090100>
13. Тишков АА, Белоновская ЕА, Вайсфельд МА, Глазов ПМ, Кренке АН, Тertiцкий ГМ. «Позеленение» тундры как драйвер современной динамики арктической биоты. Арктика: экология и экономика. 2018;2:31-44. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-2-31-44>
14. Тыртиков АП. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М.: Изд-во МГУ; 1968.
15. Тыртиков АП. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука; 1979.
16. Федоров АН. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1991.
17. Федоров АН, Ботулу ТА, Варламов СП, Васильев ИС, Грибанова СП, Дорофеев ИВ, Климовский ИВ, Самсонова ВВ, Соловьев ПА. Мерзлотные ландшафты Якутии: пояснитель-

- ная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР». Новосибирск: ГУГК; 1989.
18. Черепанова АМ, Шепелев АГ. Содержание различных форм углерода в покровных отложениях ледового комплекса Центральной Якутии. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023;1:68-77. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-68-77>
 19. Чернова ОВ, Голозубов ОМ, Алябина ИО, Щепашенко ДГ. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России. Почвоведение. 2021;3:273-86. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>
 20. Честных ОВ, Замолотчиков ДГ, Карелин ДВ. Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем. Экология. 1999;6:426-32. URL: http://ecology.genebee.msu.ru/3_SOTR/ChestnichOV/uglerod%20v%20pochvah%20tundr.pdf
 21. Чинилин АВ, Савин ИЮ. Крупномасштабное цифровое картографирование содержания органического углерода почв с помощью методов машинного обучения. Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2018;91:46-62. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-91-46-62>
 22. Шепелев АГ. Запасы углерода верхних отложений почв островов Самойловский, Большой Ляховский и Котельный. Арктика: экология и экономика. 2023;4:536-47. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-4-536-547>
 23. Шепелев АГ, Григорьев МР, Черепанова АМ, Максимов ТХ, Федоров АН. Анализ запасов углерода в подстилке и почве Приленского плато. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024;3:397-407. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>
 24. Шепелев АГ, Старостин ЕВ, Федоров АН, Максимов ТХ. Предварительный анализ запасов органического углерода и азота в породах ледового комплекса Центральной Якутии. Наука и образование. 2016;2:35-42. URL: <https://resar.elpub.ru/jour/article/view/743?ysclid=msn8y408t1731095097>
 25. Шмелев ДГ, Краев ГН, Веремеева АА, Ривкина ЕМ. Содержание углерода в мерзлых отложениях Северо-Востока Якутии. Криосфера Земли. 2013;3:50-59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20154219&ysclid=msn8z03emq966619600>
 26. Beer C, Knoblauch C, Hoyt AM, Hugelius G, Palmtag J, Mueller CW, Trumbore S. Vertical pattern of organic matter decomposability in cryoturbated permafrost-affected soils. Environ Res Lett. 2022;17:104023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9198>
 27. Bjorkman AD, Myers-Smith IH, Elmendorf SC. Plant functional trait change across a warming tundra biome. Nature. 2018;562:57-62. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0563-7>
 28. Bockheim JG. Importance of cryoturbation in redistributing organic carbon in permafrost-affected soils. Soil Sci Soc Am J. 2007;71:1335-42. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0414N>
 29. Bockheim JG, Munroe JS. Organic carbon pools and genesis of alpine soils with permafrost: a review. Arctic Antarctic Alpine Res. 2014;46(4):987-1006. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.987>
 30. Cherbunina MY, Karaevskaya ES, Vasil'chuk YK, Tananaev NI, Shmelev DG, Budantseva NA, Merkel AY, Rakitin AL, Mardanov AV, Brouchkov AV, Bulat SA. Microbial and geochemical evidence of permafrost formation at Mamontova Gora and Syrdakh, Central Yakutia. Front Earth Sci. 2021;9:739365. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.739365>
 31. Chestnykh OV, Grabovskiy VI, Zamilodchikov DG. Estimate of the soil carbon stock of forested regions in Russia using databases of soil properties. Contemp Probl Ecol. 2022;15:731-40. <https://doi.org/10.1134/S1995425522070071>
 32. Dutta K, Schuur EAG, Neff JC, Zimov SA. Potential carbon release from permafrost soils of Northeastern Siberia. Glob Change Biol. 2006;12(12):2336-51. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01259.x>
 33. Faucherre S, Jørgensen CJ, Blok D, Weiss N, Siewert MB, Bang-Andreasen T, Hugelius G, Kuhry P, Elberling B. Short and long-term controls on active layer and permafrost carbon turnover across the Arctic. J Geophys Res Biogeosci. 2018;123:372-90. <https://doi.org/10.1002/2017JG004069>
 34. Fedorov AN, Vasilyev NF, Torgovkin YI. Shestakova A, Varlamov S, Zheleznyak M, Shepelev V, Konstantinov P, Kalinicheva S, Basharin N, Markarov V, Ugarov I, Efremov P, Argunov R, Egorova L, Samsonova V, Shepelev A, Vasiliev A, Ivanova R, Galanin A, Lytkin V, Kuzmin G, Kunitsky V. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1 : 1,500,000. Geosciences. 2018;8(2):465. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120465>
 35. Felden J, Möller L, Schindler U, Huber R, Schumacher S, Koppe R, Diepenbroek M, Glöckner FO. Pangaea – data publisher for earth & environmental science. Sci Data. 2023;347(10). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02269-x>
 36. Fountain AG, Campbell JL, Schuur EAG, Stamerjohn SE, Williams MW, Ducklow HW. The disappearing cryosphere: impacts and ecosystem responses to rapid cryosphere loss. Biosci-

- ences. 2012;62(4):405-15. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.11>
37. Gentsch N, Mikutta R, Alves RJE, Barta J, Capek P, Gittel A, Hugelius G, Kuhry P, Lashchinskiy N, Palmtag J, Richter A, Santruckova H, Schnecker J, Shibistova O, Urich T, Wild B, Guggenberger G. Storage and transformation of organic matter fractions in cryoturbated permafrost soils across the Siberian Arctic. *Biogeosciences*. 2015;12:4525-42. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4525-2015>
 38. Gentsch N, Mikutta R, Shibistova O, Wild B, Schnecker J, Richter A, Urich T, Gittel A, Santruckova H, Barta J, Lashchinskiy N, Mueller CW, Fuss R, Guggenberger G. Properties and bioavailability of particulate and mineral-associated organic matter in Arctic permafrost soils, lower Kolyma region, Russia. *Eur J Soil Sci*. 2015;66:722-34. <https://doi.org/10.1111/ejss.12269>
 39. Grosse G, Harden J, Turetsky M, McGuire AD, Camille P, Tarnocai C, From S, Schuur EAG, Jorgenson T, Marchenko S, Romanovsky V, Wickland KP, French N, Waldrop M, Bourgeau-Chavez L, Striegl RG. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *J Geophys Res*. 2011;116(G4):1-23. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
 40. Harden JW, Koven CD, Ping C-L, Hugelius G, McGuire AD, Camill P, Jorgenson T, Kuhry P, Michaelson GJ, O'Donnell JA, Schuur EAG, Tarnocai C, Johnson K, Grosse G. Field information links permafrost carbon to physical vulnerabilities of thawing. *Geophys Res Lett*. 2012;39(15):L15704. <https://doi.org/10.1029/2012GL051958>
 41. Hugelius G, Bockheim JG, Camill P, Elberling B, Grosse G, Harden JW, Johnson K, Jorgenson T, Koven CD, Kuhry P, Michaelson G, Mishra U, Palmtag J, Ping C-L, O'Donnell J, Schirrmeister L, Schuur EAG, Sheng Y, Smith LC, Strauss J, Yu Z. A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region. *Earth Syst Sci Data*. 2013;5:393-402. <https://doi.org/10.5194/essd-5-393-2013>
 42. Hugelius G, Kuhry P. Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil organic carbon in a permafrost environment. *Glob Biogeochem Cycles*. 2009;23(3):GB3006. <https://doi.org/10.1029/2008GB003419>
 43. Hugelius G, Kuhry P, Tarnocai C. Ideas and perspectives: Holocene thermokarst sediments of the yedoma permafrost region do not increase the northern peatland carbon pool. *Biogeosciences*. 2016;13:2003-10. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2003-2016>
 44. Hugelius G, Kuhry P, Tarnocai C, Virtanen T. Soil organic carbon pools in a periglacial landscape; a case study from the Central Canadian Arctic. *Permafr Periglac Proc*. 2010;21(1):16-29. <https://doi.org/10.1002/ppp.677>
 45. Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, Harden JW, Schuur EAG, Ping C-L, Schirrmeister L, Grosse G, Michaelson GJ, Koven CD, O'Donnell JA, Elberling B, Mishra U, Camill P, Yu Z, Palmtag J, Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*. 2014;11:65736593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
 46. Hugelius G, Virtanen T, Kaverin D, Pastukhov A, Rivkin F, Marchenko S, Romanovsky V, Kuhry P. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic. *J Geophys Res*. 2011;116:G03024. <https://doi.org/10.1029/2010JG001606>
 47. Kizyakov AI, Korotaev MV, Wetterich S, Opel T, Pravikova NV, Fritz M, Lupachev AV, Günther F, Shepelev AG, Syromyatnikov II, Fedorov AN, Zimin MV, Grosse G. Characterizing Batagay megaslump topography dynamics and matter fluxes at high spatial resolution using a multidisciplinary approach of permafrost field observations, remote sensing and 3D geological modeling. *Geomorphology*. 2024;455:109183. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109183>
 48. Kuhry P, Grosse G, Harden JW, Hugelius G, Koven C, Ping C, Schirrmeister L, Tarnocai C. Characterisation of the permafrost carbon pool. *Permafr Periglac Process*. 2013;24:146-55. <https://doi.org/10.1002/ppp.1782>
 49. Li J, Yuan J, Ciais P, Kang H, Freeman C, Huang Y, Dong Y, Liu D, Li Y, Ding W. Two decades of improved wetland carbon sequestration in northern mid-to-high latitudes are offset by tropical and southern declines. *Nat Ecol Evol*. 2025;9:1861-72. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02809-1>
 50. Lopez CML, Hatano R, Guggenberger G, Ohta T, Gerasimov E, Fedorov AN. Forest fires effects on carbon stocks and soil chemistry in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Euras J For Res* 2012;15:9-17. URL: https://www.researchgate.net/publication/277049532_Forest_Fires_Effects_on_Carbon_Stocks_and_Soil_Chemistry_in_Central_Yakutia_Eastern_Siberia
 51. MacDonald GM, Kremenetski KV, Beilman DW. Climate change and the northern Russian treeline zone. *Philos Trans R Soc Lond*. 2008;363:2285-99. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2200>
 52. Martens J, Mueller CW, Joshi P, Rosinger C, Maisch M, Kappler A, Bonkowski M, Schwamborn G, Schirrmeister L, Rethemeyer J. Stabiliza-



- tion of mineral-associated organic carbon in Pleistocene permafrost. *Nat Commun.* 2023;14:2120. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37766-5>
53. McBratney A, Mendonca Santos M, Minasny B. On digital soil mapping. *Geoderma.* 2003;117(1-2):3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
 54. Molen MK, Huissteden J, Parmentier FJW, Petrescu AMR, Dolman AJ, Maximov TC, Kononov AV, Karsanaev SV, Suzdalov DA. The growing season greenhouse gas balance of a continental tundra site in the Indigirka lowlands, NE Siberia. *Biogeosciences.* 2007;4(6):985-1003. <https://doi.org/10.5194/bg-4-985-2007>
 55. Myers-Smith IH, Kerby JT, Phoenix GK, Bjerke JW, Epstein HE, Assmann JJ, John C, Andreu-Hayles L, Angers-Blondin S, Beck PSA, Berner LT, Bhatt US, Bjorkman AD, Blok D, Bryn A, Christiansen CT, Cornelissen JHC, Cunliffe AM, Elmendorf SC, Forbes BC, Goetz SJ, Hollister RD, de Jong R, Loranty MM, Macias-Fauria M, Maseyk K, Normand S, Olofsson J, Parker TC, Parmentier F-JW, Post E, Schaepman-Strub G, Stordal F, Sullivan PF, Thomas HJD, Tømmervik H, Treharne R, Tweedie CE, Walker DA, Wilmsking M, Wipf S. Complexity revealed in the greening of the Arctic. *Nat Clim Chang.* 2020;10:106-17. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0688-1>
 56. Olefeldt D, Goswami S, Grosse G, Hayes D, Hugelius G, Kuhry P, McGuire AD, Romanovsky VE, Sannel ABK, Schuur EAG, Turetsky MR. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nat Commun.* 2016;7:13043. <https://doi.org/10.1038/ncomms13043>
 57. Palmtag J, Obu J, Kuhry P, Siewert M, Weiss N, Hugelius G. A high spatial resolution soil carbon and nitrogen dataset for the northern permafrost region based on circumpolar land cover upscaling. *Earth Syst Sci Data.* 2022;14:4095-110. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4095-2022>
 58. Parisien MA, Parks SA, Miller C, Krawchuk MA, Heathcott M, Moritz MA. Contributions of ignitions, fuels, and weather to the spatial patterns of burn probability of a boreal landscape. *Ecosystems.* 2011;14:1141-55. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9474-2>
 59. Park H, Launiainen S, Konstantinov PY, Iijima Y, Fedorov AN. Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *J Geophys Res Biogeosci.* 2018;123:1-17. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
 60. Ping CL, Michaelson GJ, Jorgenson MT, Kimble JM, Epstein H, Romanovsky VE, Walker DA. High stocks of soil organic carbon in the North American region. *Nat Geosci.* 2008;1:615-19. <https://doi.org/10.1038/ngeo284>
 61. Ping CL, Michaelson GJ, Kimble JM, Romanovsky VE, Shur YL, Swanson DK, Walker DA. Cryogenesis and soil formation along a bioclimate gradient in Arctic North America. *J Geophys Res.* 2008;113:G03S12. <https://doi.org/10.1029/2008JG000744>
 62. Rees WG, Hofgaard A, Boudreau S, Cairns DM, Harper K, Mamet S, Mathisen I, Swirad Z, Tutubalina O. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? *Glob Chang Biol.* 2020;26:3965-77. <https://doi.org/10.1111/gcb.15113>
 63. Schirrmeister L, Grosse G, Kunitsky V, Magens D, Meyer H, Dereviagin A, Kuznetsova T, Andreev A, Babiy O, Kienast F, Grigoriev M, Overduin PP, Preusser F. Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years (western Laptev Sea coast, cape Mamontov Klyk). *Polar Res.* 2008;27:249-72. <https://doi.org/10.3402/polar.v27i2.6179>
 64. Schirrmeister L, Grosse G, Schnelle M, Fuchs M, Krbetschek M, Ulrich M, Kunitsky V, Grigoriev M, Andreev A, Kienast F, Meyer H, Babiy O, Klimova I, Bobrov A, Wetterich S, Schwamborn G. Late quaternary paleoenvironmental records from the western Lena delta, Arctic Siberia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* 2011;299:175-96. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.045>
 65. Schirrmeister L, Grosse G, Schwamborn G, Andreev A, Meyer H, Kunitsky VV, Kuznetsova T, Dorozhkina MV, Pavlova EY, Bobrov A, Oezen D. Late quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena delta, Russia): a multidisciplinary approach. *Polar Geography.* 2003;27:277-319. <https://doi.org/10.1080/789610225>
 66. Schirrmeister L, Grosse G, Wetterich S, Overduin PP, Strauss J, Schurr EAG, Hubberten HW. Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic. *J Geophys Res.* 2011;116:G00M02. <https://doi.org/10.1029/2011jg001647>
 67. Schirrmeister L, Siegert C, Kuznetsova TV, Kuzmina S, Andreev A, Kienast F, Meyer H, Bobrov A. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia. *Quat Internat.* 2002;89:97-118. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00083-0)
 68. Schuur EAG, Abbott BW, Commane R, Ernakovich J, Euskirchen E, Hugelius G, Grosse G, Jones M, Koven C, Leshyk V, Lawrence D, Loranty MM, Mauritz M, Olefeldt D, Natali S, Rodenhizer H, Salmon V, Schadel C, Strauss J, Treat C, Turetsky

- M. Permafrost and climate change: carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. *Annu Rev Environ Resour.* 2022;47:34371. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011847>
69. Schuur E, McGuire A, Schädel C, Grosse G, Harden JW, Hayes DJ, Hugelius G, Koven CD, Kuhry P, Lawrence DM, Natali SM, Olefeldt D, Romanovsky VE, Schaefer K, Turetsky MR, Treat CC, Vonk JE. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature.* 2015;520:171-79. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
70. Shepelev A, Fedorov A, Cherepanova A. Quantitative and qualitative composition of soil organic matter in samples of ice complex from Central Yakutia, Eastern Siberia. *Appl Environ Soil Sci.* 2018;2018:9302743. <https://doi.org/10.1155/2018/9302743>
71. Shepelev AG, Kizyakov A, Wetterich S, Cherepanova A, Fedorov A, Syromyatnikov I, Savvinov G. Sub-surface carbon stocks in Northern taiga landscapes exposed in the Batagay megaslump, Yana upland, Yakutia. *Land.* 2020;9(9):1-16. <https://doi.org/10.3390/land9090305>
72. Siewert MB, Hanisch J, Weiss N, Kuhry P, Maximov TC, Hugelius G. Comparing carbon storage of Siberian tundra and taiga permafrost ecosystems at very high spatial resolution. *J Geophys Res Biogeosci.* 2015;120:1973-94. <https://doi.org/10.1002/2015JG002999>
73. Siewert MB, Hugelius G, Heim B, Faucherre S. Landscape controls and vertical variability of soil organic carbon storage in permafrost-affected soils of the Lena river delta. *Catena.* 2016;147:725-41. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.048>
74. Stapel JG, Schwamborn G, Schirrmeister L, Horsfield B, Mangelsdorf K. Substrate potential of last interglacial to Holocene permafrost organic matter for future microbial greenhouse gas production. *Biogeosciences.* 2018;15:1969-85. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1969-2018>
75. Stolpmann L, Coch C, Morgenstern A, Boike J, Fritz M, Herzsuh U, Stoof-Leichsenring K, Dvornikov Y, Heim B, Lenz J, Larsen A, Walter Anthony K, Jones B, Frey K, Grosse G. First pan-Arctic assessment of dissolved organic carbon in lakes of the permafrost region. *Biogeosciences.* 2021;18:3917-36. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3917-2021>
76. Strauss J, Schirrmeister L, Grosse G, Wetterich S, Ulrich M, Herzsuh U, Hubberten H-W. The deep permafrost carbon pool of the yedoma region in Siberia and Alaska. *Geophys Res Lett.* 2013;40:6165-70. <https://doi.org/10.1002/2013GL058088>
77. Strauss J, Schirrmeister L, Mangelsdorf K, Eichhorn L, Wetterich S, Herzsuh U. Organic-matter quality of deep permafrost carbon – a study from Arctic Siberia. *Biogeosciences.* 2015;12:2227-45. <https://doi.org/10.5194/bg-12-2227-2015>
78. Strauss J, Schirrmeister L, Wetterich S, Borchers A, Davydov SP. Grain-size properties and organic-carbon stock of yedoma ice complex permafrost from the Kolyma lowland, northeastern Siberia. *Glob Change Biol.* 2012;26(3):GB3003. <https://doi.org/10.1029/2011GB004104>
79. Sun T, Ocko IB, Hamburg SP. The value of early methane mitigation in preserving Arctic summer sea ice. *Environ Res Lett.* 2022;17(4):044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4f10>
80. Tarnocai C, Canadell JG, Schuur EAG, Kuhry P, Mazhitova G, Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochem. Cycles.* 2009;23:GB2023. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
81. Turetsky MR, Abbott BW, Jones MC, Walter Anthony K, Olefeldt D, Schuur EAG, Grosse G, Kuhry P, Hugelius G, Koven C, Lawrence DM, Gibson C, Sannel ABK, McGuire AD. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nat Geosci.* 2020;13:138-43. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>
82. Uhlirva E, Santruckova H, Davidov SP. Quality and potential biodegradability of soil organic matter preserved in permafrost of Siberian tussock tundra. *Soil Biol Biochem.* 2007;39:1978-89. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.018>
83. Ulrich M, Matthes H, Schmidt J, Fedorov AN, Schirrmeister L, Siegert C, Schneider B, Strauss J, Zielhofer C. Holocene thermokarst dynamics in Central Yakutia – A multi-core and robust grain-size endmember modeling approach. *Quat Sci Rev.* 2019;218:10-33. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.06.010>
84. Vasil'chuk Y.K, Ginzburg AP. Lateral and radial differentiation of cryogenic soil chemical composition in the Vilyuy river valley, Central Yakutia. *Moscow Univ. Soil Sci Bull.* 2024;79(1):34-48. <https://doi.org/10.3103/S0147687424700339>
85. Walter Anthony KM, Schneider von Deimling T, Nitzte I, Frolking S, Emond A, Daanen R, Anthony P, Lindgren P, Jones B, Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nat Commun.* 2018;9:3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
86. Walter Anthony KM, Zimov SA, Grosse G, Jones MC, Anthony PM, Chapin FS, Finlay JC, Mack MC, Davydov S, Frenzel P, Frolking S. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch. *Nature.* 2014;511:452-56. <https://doi.org/10.1038/nature13560>
87. Wang J, Wilson RS, Aristilde L. Electrostatic coupling and water bridging in adsorption hierarchy of biomolecules at water–clay interfaces. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2024;121(7):e2316569121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2316569121>

88. Weiss N, Blok D, Elberling B, Hugelius G, Jorgensen CJ, Siewert MB, Kuhry P. Thermokarst dynamics and soil organic matter characteristics controlling initial carbon release from permafrost soils in the Siberian yedoma region. *Sediment Geol.* 2015;348:38-48. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.12.004>
89. Wetterich S, Tumskey V, Rudaya N, Andreev AA, Opel T, Meyer H, Schirrmeister L, Hüls M. Ice complex formation in arctic East Siberia during the MIS3 interstadial. *Quat Sci Rev.* 2014;84:39-55. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.009>
90. Windirsch T, Grosse G, Ulrich M, Schirrmeister L, Fedorov AN, Konstantinov P, Fuchs M, Jongejans LL, Wolter J, Opel T, Strauss J. Organic carbon characteristics in ice-rich permafrost in alas and yedoma deposits, central Yakutia, Siberia. *Biogeosciences.* 2020;17:3797-814. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3797-2020>
91. Wu T, Wang D, Mu C, Zhang W, Zhu X, Zhao L, Li R, Hu G, Zou D, Chen J, Wei X, Wen A, Shang C, La Y, Lou P, Ma X, Wu X. Storage, patterns, and environmental controls of soil organic carbon stocks in the permafrost regions of the Northern hemisphere. *Sci Total Environ.* 2022;828:154464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154464>
92. Xu L, Myneni R, Chapin F, Callaghan TV, Pinzon JE, Tucker CJ, Zhu Z, Bi J, Ciais P, Tommervik H, Euskirchen ES, Forbes BC, Piao SL, Anderson BT, Ganguly S, Nemani RR, Goetz SJ, Beck PSA, Bunn AG, Cao C, Stroeve JC. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nat Clim Chang.* 2013;3:581-86. <https://doi.org/10.1038/nclimate1836>
93. Zibulski R, Herzsuh U, Pestryakova LA, Wolter J, Müller S, Schilling N, Wetterich S, Schirrmeister L, Tian F. River flooding as a driver of polygon dynamics: modern vegetation data and a millennial peat record from the Anabar river lowlands (Arctic Siberia). *Biogeosciences.* 2013;10:5703-28. <https://doi.org/10.5194/bgd-10-4067-2013>
94. Zimov SA, Davydov SP, Zimova GM, Davydova AI, Schuur EAG, Dutta K, Chapin FS. Permafrost carbon: stock and decomposability of a globally significant carbon pool. *Geophys Res Lett.* 2006;33:L20502. <https://doi.org/10.1029/2006GL027484>
95. Zubrzycki S, Kutzbach L, Grosse G, Desyatkin A, Pfeiffer E-M. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena river delta. *Biogeosciences.* 2013;10(6):3507-24. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3507-2013>
96. Zubrzycki S, Kutzbach L, Pfeiffer E-M. Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic. *Solid Earth.* 2014;5:595-609. <https://doi.org/10.5194/se-5-595-2014>



НОВАЯ ДЛЯ НАУКИ ФОРМА ГРИБОВ *MUTINUS RAVENELII* (СЕМЕЙСТВО *PHALLACEAE*), НАЙДЕННАЯ НА ВОСТОКЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.Ю. Касап*, Д.В. Гришин

Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича, Москва, Россия,

*Эл. почта: E.Kasap321@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 16.07.2026; принята к печати 17.09.2026

На востоке Московской области были зарегистрированы микологические находки грибов семейства Веселковые (*Phallaceae*), демонстрирующие признаки новой формы редкого для Северной Евразии вида *Mutinus ravenelii* (Berk. & M. A. Curtis) E. Fisch., 1888 (мутинус Равенееля). Данная форма была описана на основании совокупности экологических, морфологических и молекулярно-генетических данных. В качестве названия было предложено *Mutinus ravenelii* f. *aquilonis*. Филогенетическое исследование основывалось на анализе нуклеотидных последовательностей внутреннего транскрибируемого спейсера (ITS) и гена большой субъединицы рибосомальной РНК (LSU rRNA). Новая форма образует монофилетическую кладу на эволюционном древе. Морфологически *M. ravenelii* f. *aquilonis* отличается от известных видов и форм сочетанием нежно сиреневых и светло-розовых оттенков ложноножки, алой булавовидной фертильной частью, занимающей 3/8 всей длины ложноножки, и относительно мелкими базидиоспорами эллиптической формы. Рассмотрены особенности экологических и климатических факторов среды обитания, а также приведено морфогенетическое описание, сопровождаемое иллюстрациями и дендрограммой, определяющей положение нового представителя по отношению к морфологически сходным и таксономически родственными видам.

Ключевые слова: *Mutinus*, таксономия, морфология, эволюция, среда обитания.

A NOVEL FORM OF *MUTINUS RAVENELII* STINKHORN (*PHALLACEAE*) FOUND IN THE EAST OF THE MOSCOW REGION

E.Yu. Kasap*, D.V. Grishin

V.N. Orekhovich Research Institute of Biomedical Chemistry, Moscow, Russia,

*Email: E.Kasap321@rambler.ru

Phallaceae fungi found in the east of the Moscow region have signs of a novel form of the species *Mutinus ravenelii* (Berk. & M. A. Curtis) E. Fisch., 1888, which is rare in Northern Eurasia. This form has been distinguished based on a combination of ecological, morphological and molecular genetic data. The name *Mutinus ravenelii* f. *aquilonis* has been suggested for the novel form. Its phylogenetic identification is based on the analysis of the internal transcribed spacer (ITS) and large subunit ribosomal RNA gene (LSU) sequences. The novel form comprises a monophyletic clade on the phylogenetic tree. Morphologically, *M. ravenelii* f. *aquilonis* differs from known species and forms by a combination of soft lilac and light pink shades of the pseudostipe, a scarlet club-shaped fertile part occupying 3/8 of the entire length of the pseudostipe, and relatively small elliptical basidiospores. The finding is discussed with regard to the ecological and climatic features of its habitat. The discussion is supplemented with morphogenetic description, images, and dendrograms supporting the position of the novel form relative to morphologically and taxonomically related species.

Keywords: *Mutinus*, taxonomy, morphology, evolution, habitat

ВВЕДЕНИЕ

В ходе систематических исследований микробных сообществ, сопутствующих различным типам микориз в низинных торфяниках на востоке Московской области, были замечены ранее не описанные там плодовые тела грибов семейства *Phallaceae* (Веселковые) (рис. 1).

Находка оказалась настолько неожиданной, что единичные собранные экземпляры были использованы для их морфологической и генетической идентификации, позволившей предположить существование нового для науки таксона и расширившей представление о биоразнообразии семейства.



Рис. 1. Фото найденных грибов.

Phallaceae относится к классу *Agaricomycetes* в составе отдела *Basidiomycota* [12, 16]. Являясь по типу питания почвенными сапробионтами, некоторые из его представителей способны вступать в факультативный симбиоз, формируя микоризу с определенными листовыми деревьями и кустарниками [3]. Особый способ распространения спор данными грибами обеспечивается производством аттрактантов для двукрылых или перепончатокрылых насекомых. К таким химическим соединениям относятся сероводород, метантиол, терпеноид линалоол, β -оцимен, фенилуксусный альдегид и некоторые тиоэфиры [5, 20].

Представители семейства играют своеобразную роль в круговороте углерода в биосфере вследствие их уникального набора секретлируемых ферментов, в том числе хитиназы, карбоксиметилцеллюлазы, α -глюкозидазы, протеаз, кислой фосфатазы, полифенолоксидазы, лакказы и гваякол-(2-метоксифенол)-оксидазы [34].

Грибы из семейства *Phallaceae* часто обнаруживаются вблизи нор некоторых хищных млекопитающих.

Серия наблюдений позволила выдвинуть гипотезу о высокой экологической и санитарной важности таких грибов, состоящей в предотвращении эпидемий в популяциях животных, предпочитающих проживать в глубоких разветвленных норах. Данные грибы, произрастая у входа в норы, привлекают мух-падальниц рода *Lucilia*, откладывающих яйца преимущественно в пищевых остатках и телах погибших в норах животных, что позволяет ускорить их деструкцию, снижая риск распространения инфекций в колониях норных животных [27].

Одним из наиболее неординарных представителей семейства *Phallaceae* является род *Mutinus* Fr. Впервые он был описан шведским микологом Э.М. Фрисом в 1849 году на примере типового вида Мутинус собачий (*Mutinus caninus* (Huds.) Fr.).

Представители рода *Mutinus* – сапротрофы, встречающиеся небольшими группами в лесах, парках, на рудеральных участках. Плодовые тела формируются в лесной подстилке, на сильно разрушенной древесине, в богатых органическим веществом почвах. Молодые

плодовые тела мутинуса (незрелые базидиомы) замкнутые (ангиокарпные), изначально имеющие яйцевидную форму, обычно не крупнее грецкого ореха. Зрелые плодовые тела состоят из ложной ножки, в нижней части которой обычно находятся остатки перидия, называемые вольвой. Их форма может быть цилиндрической, булавовидной или конической. У многих видов *Mutinus* нет четкой границы между «шляпкой» и «ножкой» [32]. Верхушка плодового тела, именуемая рецептакулом, часто бывает полый, ярко окрашенной с выраженной губчатой структурой [36].

В отличие от других грибов, для семейства *Phallaceae* в целом и рода *Mutinus* в частности, характерен уникальный способ распространения спор. На верхушке рецептакула образуется богатая спорами слизистая субстанция, известная как глеба. Она издает сильный, часто неприятный запах, привлекающий определенные виды насекомых, которые, в свою очередь, способствуют распространению спор [10]. Согласно базам данных в области микологической номенклатуры IndexFungorum (<http://www.indexfungorum.org/>) и MycoBank (<http://www.mycobank.org/>), род *Mutinus*, в настоящее время, включает всего около 40 видов. При этом чрезвычайно мало исследований, основывающихся на молекулярной филогении, поскольку для большинства видов этого рода отсутствуют молекулярно-генетические данные [36].

По данным международной онлайн-платформы iNaturalist, род *Mutinus* широко распространен в Центральной и Южной Америке, Океании, Юго-Восточной Азии и некоторых субтропических регионах Европы. За последние полвека некоторые виды *Mutinus* начали активно заселять районы с умеренным и даже субарктическим климатом, что можно рассматривать как косвенное отражение процесса глобального изменения климата.

Представители рассматриваемого рода грибов в России исследованы чрезвычайно мало. Это во многом обусловлено тем, что для региона со столь суровым климатом они считаются довольно экзотическими организмами. В отечественном научно-информационном пространстве сообщается о спорадических случаях присутствия двух видов *Mutinus*, а именно *M. caninus* и *M. ravenelii* [1]. Однако такая классификация основана в первую очередь, на морфологических и экологических характеристиках при полном отсутствии соответствующих молекулярно-генетических данных для России. Между тем, эти два вида часто имеют сходные характеристики, что не позволяет полагаться исключительно на визуальные описания как на единственный метод идентификации. Таким образом, истинное видовое разнообразие рода *Mutinus* в России требует молекулярно-генетической верификации. Более того, поскольку такие макромикеты счита-

ются инвазивными видами с непредсказуемой стратегией поведения, рекомендуется включать их в список организмов, для которых требуется систематический мониторинг [1]. Все это подчеркивает актуальность исследований, направленных на изучение таких адвентивных видов грибов.

Целью настоящего исследования была верификация видовой принадлежности собранных плодовых тел, редких для Московского региона грибов, относящихся к роду *Mutinus*. При их изучении были выявлены морфологические и генетические отличия от известных таксонов, что позволило описать новую для науки форму. Описание нового представителя, равно как и его сопоставление с ранее зарегистрированными морфологически сходными или филогенетически родственными видами, призвано расширить наше понимание разнообразия семейства *Phallaceae* и предоставить данные для будущих систематических и экологических исследований рода *Mutinus*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ Морфологическое исследование

В ходе полевых исследований обнаружено два местообитания представителей рода *Mutinus*. В каждом местообитании, расположенном примерно в 200 метрах друг от друга, находилось по 2 зрелых плодовых тела в состоянии, пригодном для дальнейшей работы. Сбор и описание местообитания проводились согласно методическим рекомендациям [23]. Затем образцы помещались в контейнеры для биоматериалов с использованием 96% этанола в качестве фиксатора. Биоматериалы хранили при температуре +4°C. Макроморфологические характеристики были описаны на основе свежих базидиом, цветовые коды определялись с использованием цветовой шкалы [17]. Микроструктуры образцов исследовали при увеличении от $\times 400$ до $\times 1000$ с помощью цифрового микроскопа D320L Plus 3.1 (Levenhuk LLC, США). Для приготовления микроскопического препарата, выполняли срез ткани, сохраненной ранее в этаноле. Манипуляции проводили при помощи острого стерильного лезвия, после чего фрагмент плектенхимы помещали под покровное стекло и высушивали [13, 14]. Для изучения амилоидных и декстриноидных реакций в структурах базидиоспор ткани предварительно обрабатывали 5%-ным водным раствором, содержащим элементарный йод и йодид калия. Размеры базидиоспор определяли на основании измерений не менее 50 спор. Размеры были приведены в формате: (a) b–c (d), где «b–c» представляли 90% измеренных значений, в то время как «a» и «d» относились к экстремальным значениям. Дополнительно был рассчитан параметр Q (отношение длины споры к ее ширине), где Qm относится к среднему значению Q для всех базидиоспор [4, 7, 8].

Генетический анализ (экстракция ДНК, ПЦР и секвенирование генов-мишеней)

Тотальную геномную ДНК выделяли из образцов, выдержанных в этаноле, с использованием коммерческого набора DNeasy Plant Mini Kit (Qiagen) в соответствии с инструкциями производителя. Пары праймеров LSU-F/LSU-R и ITS-1-2-F/ITS-1-2-R были использованы для амплификации нуклеотидных последовательностей, кодирующих большую субъединицу рибосомальной РНК (LSU) и область, охватывающую полный внутренний транскрибируемый спейсер (ITS1, 5.8S, ITS2) (ITS), которые специфичны для *Mutinus* [21, 36]. В процессе дизайна олигонуклеотидов использовались данные из статей [9, 33, 35, 36].

Итоговые последовательности фланкирующих праймеров выглядели следующим образом:

LSU-F: 5'-atgcgctctcgaagatcgagtggtt-3';

LSU-R: 5'-attaagccagcatcctaagcgcgttac-3';

ITS-1-2-F: 5'-gtagtgtaacctgcggaagatcatt-3';

ITS-1-2-R: 5'-gtagtcctgcctgattgaggtcaaga-3'.

Фрагменты ДНК амплифицировали в реакционном объеме 25 мкл, содержащем 5 мкл 5X ScreenMix-HS (Евроген, Россия), 17 мкл ddH₂O, по 1 мкл прямого и обратного праймеров (10 мкМ) и 1 мкл геномной ДНК. ПЦР проводили в амплификаторе «Терцик» («ДНК-технология», Россия) при следующих условиях: 95°C – 5 мин; (94°C – 30 с, 57–62°C – 30 с, 69°C – var.) ×35; 72°C – 5 мин; 4°C – хранение. Фрагменты ДНК, полученные после амплификации, разделяли при помощи стандартного электрофореза в 1,5%-ном агарозном геле с бромистым этидием. В качестве рабочего использовали ТРИС-ацетатный буфер (ТАЕ). Результаты электрофореза считывали в ультрафиолетовом свете. Ампликоны были извлечены из геля с помощью набора Cleanup Standard (Евроген, Россия). Секвенирование ДНК с использованием меченых терминаторов и разделение продуктов секвенирования проводили на автоматическом секвенаторе ABI PRISM 3730xl (Applied Biosystems, США) в компании Евроген (Москва, Россия).

Выравнивание последовательностей и филогенетический анализ

Визуализацию хроматограмм, полученных в процессе секвенирования ДНК проводили с использованием программы Chromas 2.6.6 (Technelysium Pty Ltd, Австралия). Независимое множественное и попарное выравнивание нуклеотидных последовательностей для LSU и ITS было выполнено с использованием эвристического алгоритма ClustalW [6, 19, 31]. Алгоритм требовал предварительной настройки нескольких важных параметров, включая: GEP (Gap Elongation Penalty) и GOP (Gap Opening Penalty), от-

срочку различающихся последовательностей (delay divergent sequences), обеспечивающую приоритетное выравнивание более сходных участков ДНК, а также вес транзиций (transition weight) (A↔G или C↔T). В настоящем исследовании были применены стандартные параметры: для нуклеиновых кислот GEP и GOP составляли 6,66 и 15, соответственно, с отсрочкой для различающихся последовательностей, установленной на уровне 30%, в то время как вес транзиций по умолчанию был установлен как среднее значение 0,5 [19]. Полученные последовательности различных образцов *Mutinus* использовались для реконструкции филогении.

Для реконструкции филогенетических отношений использовали массив доступных данных по LSU и ITS, включая 30 представителей рода *Mutinus* и 2 представителя родственных видов (см. табл.1).

Применяли метод максимального правдоподобия (ML) в MEGA v.6.0 [18, 22, 28, 30] и байесовский вывод (BI) в MrBayes v.3.1.2 [25]. Модель GTR + I + G была использована как для анализа ITS, так и для анализа LSU. Представители рода *Clathrus* семейства Весёлковых были выбраны в качестве внешней группы. Значения бутстрэп поддержки ветвей (BS) ≥ 50% и/или апостериорной вероятности (PP) ≥ 0,95 считались надежными. Частоты встречаемости каждого из четырех нуклеотидов, отношение транзиций к трансверсиям для пуринов и пиримидинов, а также параметр Lnl были рассчитаны, как описано у Касап и соавт. [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Филогенетический анализ

Анализ проводили путем сравнения нуклеотидных последовательностей LSU и ITS, полученных в настоящем исследовании, с ранее опубликованными в GenBank и MycoBank (табл. 1).

В анализ были включены 18 нуклеотидных последовательностей фрагмента гена рРНК (LSU) и 19 межгенного спейсера ITS. Концевые GAP с неоднозначным выравниванием при этом не учитывали. В общей сложности было выровнено 396 пар оснований LSU, из них 309 были консервативными и 82 вариабельными, из которых 43 сайта были в максимальной степени информативными (parsimony informative). Финальный анализ ITS включал 365 сайтов, из которых 206 были консервативными, а 154 вариабельными, из которых 116 были признаны информативными. Изменение отношения транзиций к трансверсиям (R) было оценено на основе модели Тамуры-Ней [29] и варьировало от 1,25 до 1,37.

Реконструкция филогенетического древа на основе полученной матрицы попарных расстояний осуществлялась методами максимального правдоподобия (ML) и байесовского вывода (BI). При этом было подтверждено то, что *M. ravenelii* f. *aquilonis* является как ми-

Табл. 1.

Названия, номера изолятов и образцов, страны происхождения и номера доступных в GenBank последовательностей таксонов, использованных в филогенетическом анализе.

Таксон	Номер изолята или типового образца	Регион обнаружения	Уникальный идентификатор		Источник данных
			LSU	ITS	
<i>Mutinus albotruncatus</i> B.D.B. Silva & Baseia	UFRN2025	Бразилия	-	KT202281.1	[26]
<i>Mutinus albotruncatus</i>	UFRN-Fungos 2025	Бразилия	-	MF447826.1	[26]
<i>Mutinus bambusinus</i> (Zoll.) E. Fisch.	KH-TBG11-449	Бразилия	-	MF447820.1	GenBank
<i>Mutinus caninus</i> (Huds.) Fr.	K(M)_179606	Великобритания	MK598825.1	-	GenBank
<i>Mutinus caninus</i>	K(M)_161779	Великобритания	MK598828.1	-	GenBank
<i>Mutinus caninus</i>	KM81429	Великобритания	-	GQ981513.1	GenBank
<i>Mutinus caninus</i>	TENN_58051	Germany	MK598827.1	-	GenBank
<i>Mutinus caninus</i>	RE21118	Бразилия	-	MF447827.1	GenBank
<i>Mutinus elegans</i> (Mont.) E.Fisch.	UFRN-Fungos 2858	Бразилия	-	MF447832.1	GenBank
<i>Mutinus elegans</i>	KUO_06121101_IL	США	MK602335.1	-	GenBank
<i>Mutinus elegans</i>	MCA_4722_LA	США	MK602336.1	-	GenBank
<i>Mutinus elegans</i>	KUO_05170701_IL	США	MK602337.1	-	GenBank
<i>Mutinus elegans</i>	KUO_05030603_IL	США	MK602338.1	-	GenBank
<i>Mutinus fleischeri</i> Penz.	INPA240012	Бразилия	-	MF447828.1	GenBank
<i>Mutinus fleischeri</i>	HKAS122334	Китай	OL597962.1	-	GenBank
<i>Mutinus fleischeri</i>	HKAS18565	Китай	OL597964.1	-	GenBank
<i>Mutinus ravenelii</i> (Berk. & M. A. Curtis) E. Fisch.	-	-	-	SH0900530.09FU UDB019437	Myco-Bank
<i>Mutinus ravenelii</i>	MV-1262	Швеция	PQ652221.1	PQ652221.1	GenBank
<i>Mutinus ravenelii</i> f. <i>aquilonis</i>**	IBMC2024-L1	Россия	PV116332	PV055454	GenBank
<i>Mutinus ravenelii</i> f. <i>aquilonis</i>	IBMC2024-L2	Россия	PV056480	PV116424	GenBank
<i>Mutinus</i> sp. MA-2013	JD781	Сан-Томе и Принсипи	-	KC128650.1	GenBank
<i>Mutinus</i> sp. MA-2013	JD782	Сан-Томе и Принсипи	-	KC128651.1	GenBank
<i>Mutinus</i> sp.	KH-JPN11-372 (TNS)	Бразилия	KF783248.1	-	GenBank
<i>Mutinus</i> sp.	UFRN-Fungos 1371	Бразилия	-	MF447829.1	GenBank
<i>Mutinus</i> sp. 'IN03'	S.D. Russell ONT iNaturalist 119428853	США	-	OP749349.1	GenBank
<i>Mutinus</i> sp.	INPA240013	Бразилия	-	MF447830.1	GenBank
<i>Mutinus</i> sp. PW-2022a (<i>M. taishanensis</i>)	EFHAAU2895	Китай	OP584495.1	-	[36]
<i>Mutinus</i> sp. PW-2022a (<i>M. taishanensis</i>)	EFHAAU2894	Китай	OP584494.1	-	[36]
<i>Mutinus verrucosus</i> T.S. Cabral, B.D.B. Silva, K. Hosaka, M.P. Martín & Baseia	UFRN-Fungos 2803	Бразилия	MF447808.1	MF447810.1	GenBank
<i>Mutinus verrucosus</i>	UFRN-Fungos 2026	Бразилия	MF447809.1	NR_160483.1	GenBank
<i>Clathrus columnatus</i> Bosc.	MO-923	Япония	-	PX070132.1	GenBank
<i>Clathrus columnatus</i>	LTP 39 (ICN)	Бразилия	KF783238.1	-	GenBank

- последовательности, полученные в данном исследовании, выделены жирным шрифтом, символом (**) обозначен типовой образец.

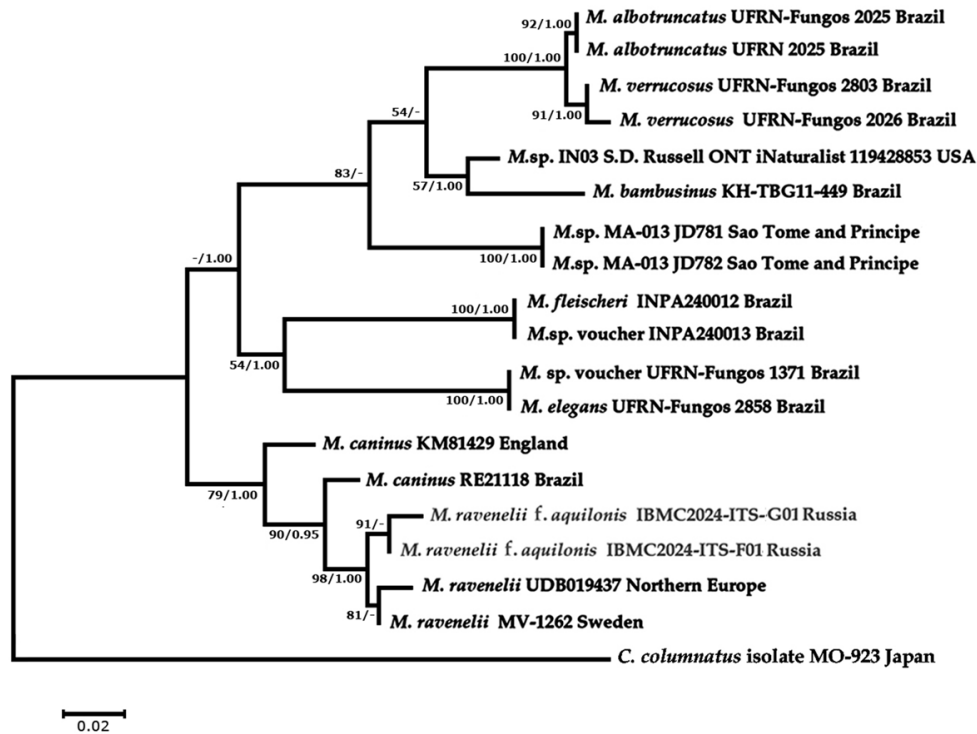


Рис. 2. Дендрограмма филогенетических отношений представителей рода *Mutinus*, основанная на сравнении нуклеотидных последовательностей внутреннего транскрибируемого спейсера (ITS). В качестве внешней группы взят *Clathrus columnatus*. Новые формы выделены серым цветом. В узлах показаны индексы бутстрэп-поддержки (BS) $\geq 50\%$ и байесовской апостериорной вероятности (PP) $\geq 0,95$. Внизу указан масштаб, отражающий, число нуклеотидных замен на один сайт.

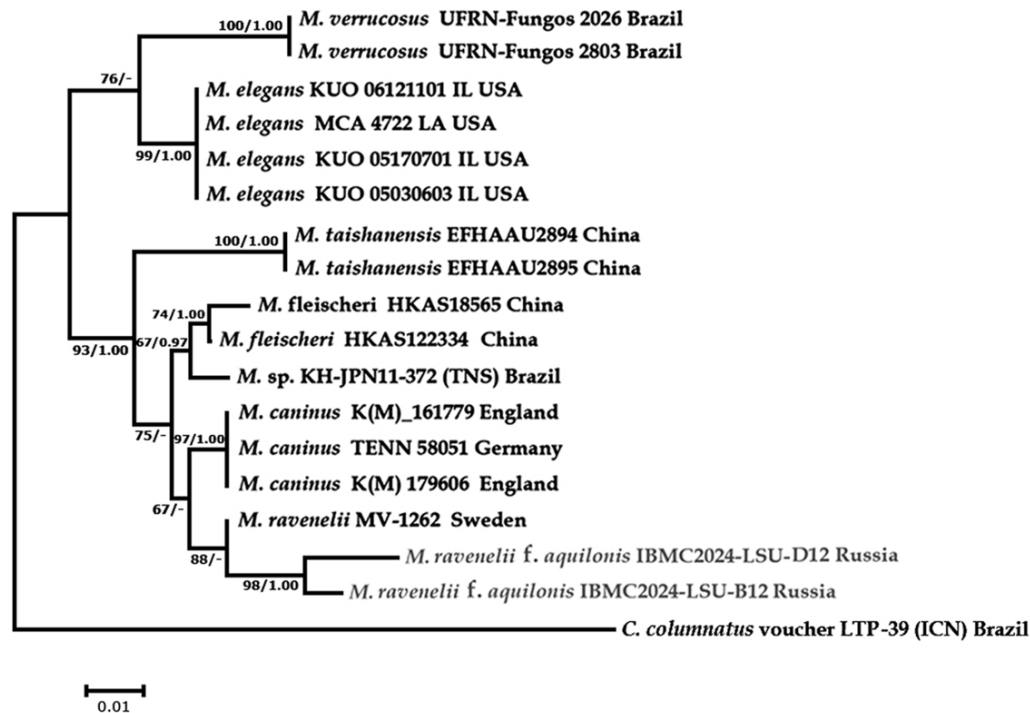


Рис. 3. Дендрограмма филогенетических отношений представителей рода *Mutinus*, основанная на сравнении нуклеотидных последовательностей большой субъединицы рибосомальной ДНК (LSU rDNA). В качестве внешней группы в анализ был включен *Clathrus columnatus*. Новые формы выделены серым цветом. В узлах показаны значения бутстрэп-поддержки (BS) $\geq 50\%$ и апостериорной вероятности (PP) $\geq 0,95$. Внизу указан масштаб, отражающий, число нуклеотидных замен на один сайт.

нимум новой формой, отличающейся от других представителей *Mutinus* на филограмме (рис. 2 и 3).

В случае последовательностей LSU и ITS наибольшее эволюционное расстояние отделяло от всех остальных видов выборки представителей рода *Clathrus* (0,154 и 0,327, соответственно). Наименьшие генетические расстояния ($<0,001$) для LSU выявлены у видов *M. caninus*, *M. elegans*, *M. fleischeri* и *M. verrucosus*, в то время как для маркера ITS минимальные генетические расстояния ($<0,001$) были обнаружены для видов *M. albotruncatus*, *M. fleischeri* и *M. elegans*.

Таксономия

Mutinus ravenelii (Berk. & M. A. Curtis) E. Fisch. f. *aquilonis* D.V. Grishin, E.Y. Kasap, f. nov. (рис. 4, 5). Fungal Names FN 574060.

Этимология

“*Aquilonis*” относится к античному названию земель, лежащих в северо-восточном направлении от Рима.

Диагностика

M. ravenelii f. *aquilonis* отличается от всех остальных известных представителей рода булавовидно-веретенообразной апикальной частью алого цвета, морщинистой текстурой поверхности, сочетанием нежно

сиреневых и светло-розовых оттенков ложноножки и регулярной альвеолярной микроструктурой псевдопаренхимы.

Голотип

Россия, Московская область, Богородский (Ногинский) городской округ, богатые гумусом почвы осушенного торфяника, 55°43'47.5"N, 38°18'01.0"E, 157 метров над уровнем моря, 24 августа 2024 года, Д.В. Гришин, Е.Ю. Касап, IBMC2024-L1. GenBank LSU: PV116332; ITS: PV055454.

Описание

Незрелые базидиомы округлые или яйцевидные, 10–15 × 8–12 мм, белые, гипогейные. Зрелые базидиомы состоят из вольвы и ложной ножки. Вольва тонкая, быстроисчезающая. Ложная ножка полая, цилиндрическая, 45–80 × 9–11 мм, веретенообразная или булавовидная в апикальной части, неперфорированная; поверхность мелкоморщинистая и губчатая; стерильная часть от бледно-сиреневой до светло-розовой, верхняя фертильная часть алая или красноватая, занимает примерно 3/8 от общей длины ножки, цветовой переход плавный. Глеба слизистая, темно-оливковая, при высыхании становится коричневой. В запахе преобладают летучие продукты протеолиза с



Рис. 4. Зрелые базидиомы *M. ravenelii* f. *aquilonis*.

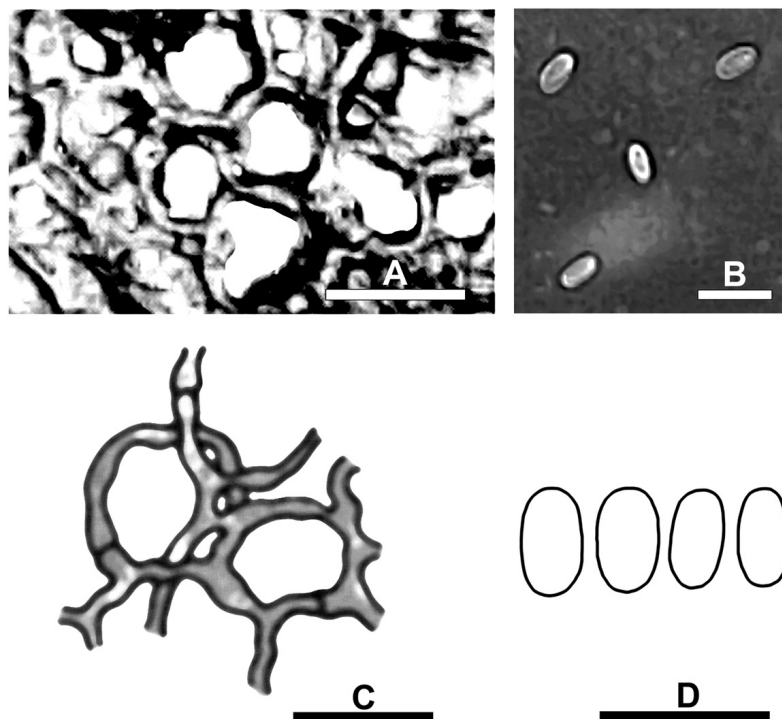


Рис. 5. Микроструктуры *M. ravenelii* f. *aquilonis*. **A.** Псевдопаренхиматозные гифы. **B.** Базидиоспоры. **C.** Графическое изображение псевдопаренхиматозных гиф. **D.** Графическое изображение базидиоспор. Шкалы: A, C = 50 мкм, B, D = 5 мкм.

индольным компонентом. Базидиоспоры (2,81) 3,65–4,05 (4,25) × (1,44) 1,74–2,56 (2,93) мкм, при $Q_m = 1,71 \pm 0,25$, эллипсоидные, гиалиновые, инамилоидные, гладкие (рис. 5).

Местообитание и экология.

Плодовые тела *M. ravenelii* f. *aquilonis* произрастали небольшими группами на богатых гумусом почвах осушенного свыше пятидесяти лет назад торфяника в двух локалитетах. В одном случае их наблюдали на открытом, хорошо освещенном участке, в другом – в затененной низменности, где преобладают травянистые растения: сныть *Aegopodium podagraria*, мятлик *Poa trivialis*, крапива *Urtica dioica* и одуванчик *Taraxacum officinale*, а также древесные и кустарниковые формы, среди которых можно выделить березу *Betula pendula*, иву *Salix acutifolia*, рябину *Sorbus aucuparia*, терн *Prunus spinosa* и сирень *Syringa vulgaris*.

Наблюдения показали, что преобладающими двукрылыми насекомыми на базидиомах, были представители родов мух-падальщиц *Lucilia* и синих мух *Calliphora* (рис. 4), которые, предположительно, являются основными распространителями спор этого гриба.

Для места обнаружения объектов исследования характерно высокое содержание низинного торфа с

долей органического вещества в поверхностном горизонте более 60% и кислотностью pH 4,5–5,0. При этом в гумусе региона агрессивные фульвокислоты преимущественно доминируют над гуминовыми соединениями [2].

Климат региона обнаружения классифицируется как умеренно-континентальный с теплым летом и умеренной зимой. Среднегодовой показатель температуры колеблется около +5,7°C. Средняя температура воздуха в самый холодный месяц (январь) составляет –7,3°C (при абсолютном минимуме –45°C), а в самый теплый месяц (июль) +20,1°C (при абсолютном максимуме +38,5°C). Среднегодовое количество осадков 560 мм, около 70% из которых выпадает в период с апреля по октябрь.

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование углубляет понятия о разнообразии макромицетов рода *Mutinus*, представляя описание недавно выявленной новой формы в рамках вида *M. ravenelii*, подкрепленное как морфологическим, так и филогенетическим анализом. Кроме того, исследование содержит информацию о некоторых важных элементах биотопа, в котором был собран типовой материал.

Морфологически *M. ravenelii* f. *aquilonis* имеет общие признаки с *M. elegans*, *M. caninus* и *M. ravenelii*. Однако, несмотря на внешнее сходство с этими видами, новый таксон обладает рядом отличительных черт. В отличие от *M. elegans*, его плодовые тела меньше по размеру и имеют тонкую быстро исчезающую вольву. У описываемых организмов нет ни облигатного остроконечного рецептакула, ни апикального отверстия. Также отсутствует сладковатый металлический запах, характерный для *M. elegans*.

В отличие от *M. caninus* [11], у новых представителей незрелые базидиомы имеют небольшой размер, у них нет желтых или оранжевых оттенков в структуре ложноножки, равно как отсутствует запах кошачьих экскрементов, присущий для *M. caninus*.

Новая филогенетическая форма отличается от своего родительского таксона, *M. ravenelii*, наличием плавного перехода окраски между фертильной и стерильной областями, а также иным соотношением окрашенного и неокрашенного участков ножки. Кроме того, важно отметить, что фертильная часть *M. ravenelii* f. *aquilonis* имеет преимущественно мелкоморщинистую текстуру, в то время как у типичных образцов *M. ravenelii* обычно выявляется гранулезная поверхность [36]. Помимо этих характеристик, новый представитель также отличается размерами базидиоспор. По данным микологического портала «Ultimate-mushroom», размеры спор *M. ravenelii* чаще всего колеблются в пределах $3,0\text{--}5,0 \times 1,5\text{--}2,0$ мкм (<https://ultimate-mushroom.com/edible/56-mutinus-ravenelii.html>).

Традиционно идентификация видов и подвидов в семействе *Phallaceae* основывалась на морфологических признаках. Однако достижения в области молекулярной биологии значительно повышают точность систематики, помогая устранить несоответствия по морфологии. Морфологические отличия, наблюдаемые у *M. ravenelii* f. *aquilonis*, соответствуют уникальному филогенетическому положению, подтверждающему таксономический статус. Проведенный филогенетический анализ согласуется с современным пониманием таксономии известных видов *Mutinus*, демонстрируя, что новая форма, при всей её близости к *M. ravenelii*, образует отдельную кладу с хорошей статистической поддержкой.

Относительно возможных причин появления новых форм в рамках вида *M. ravenelii* следует обратиться к таким понятиям как экологическое (симпатрическое) и географическое (аллопатрическое) видообразование. Если в первом случае дивергенция происходит из-за изменений условий среды или в процессе освоения новых мест обитания, то во втором случае изменения происходят тогда, когда популяции одного вида разделяются пространственными барьерами.

По всей видимости, оба процесса могут иметь место в популяциях *M. ravenelii*. В ходе миграции этих

грибов в Евразию с территории Американского континента преимущественно доминировали процессы аллопатрии. Первоначально важнейшими факторами, с которыми сталкивается адвентивный вид грибов, становятся ограниченный радиус распространения спор и иной видовой состав насекомых-потенциальных распространителей. В каждом регионе независимо друг от друга работают механизмы естественного отбора, возникают спонтанные мутации и происходит дрейф генов. В результате со временем могли накапливаться генетические различия и возникать предпосылки для репродуктивной изоляции.

На следующем этапе присоединяются факторы экологического видообразования, которое у грибов встречается гораздо чаще, чем у представителей других Царств. Резкие колебания температур, которые все чаще сопровождают процессы глобального изменения климата, являются стрессовыми факторами, заставляющими грибы адаптироваться к новым, порой экстремальным, условиям.

Деятельность человека также создает совершенно новые, зачастую агрессивные экологические ниши, меняя химический и минералогический состав почв. Биологическое, химическое или радиационное загрязнение окружающей среды способно стимулировать эволюционные процессы у макромицетов.

Процессам симпатрической дивергенции *M. ravenelii* также может способствовать присутствие у многих базидиомицетов чрезвычайно сложной системы регуляции половой совместимости.

Говоря об объектах исследования настоящей статьи, можно предположить, что описанные процессы видообразования еще не завершены, поскольку уровень генетического сходства между *M. ravenelii* и *M. ravenelii* f. *aquilonis* достаточно высок.

В связи с малой изученностью видового разнообразия *Mutinus* на мировом уровне и ограниченностью исследуемого материала всесторонний анализ рода и новых рангов в данном контексте затруднен. Такая скудность молекулярно-генетических данных по роду пока не позволяет досконально определить его таксономический статус.

Тем не менее, наши результаты предоставляют ценную информацию, касающуюся специфических аспектов морфологии, молекулярной генетики и среды обитания новой видовой формы. Это расширяет понимание адаптивных возможностей *Mutinus* и может оказаться полезным для будущих систематических исследований. Недавние открытия новых видов *Mutinus*, таких как *M. verrucosus* [24], *M. albotruncatus* [26] и *M. taishanensis* [36], свидетельствуют о гораздо большей внутривидовой вариативности, чем это было задокументировано ранее.

Будущие исследования должны быть направлены на пополнение коллекций и расширение спектра мор-



фологических наблюдений, расшифровку полных последовательностей наиболее информативных генов и, возможно, использование дополнительных генетических маркеров для углубления нашего понимания взаимоотношений внутри рода *Mutinus*.

Сотрудничество с международными исследовательскими группами, направленное на расширение деятельности по отбору проб также будет иметь большой потенциал для сведения к минимуму различий, вызванных экологическими и региональными факторами. Кроме того, сбор проб в экстремальных условиях может способствовать более тщательному и систематическому изучению представителей охарактеризованного рода.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы) (№122022800499-5).

Благодарности. Выражаем благодарность Н.Г. Сидорову и О.К. Парфеновой за участие в обработке материалов и ценные комментарии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ЛИТЕРАТУРА

Список русскоязычной литературы

1. Ивойлов АВ. Первая находка *Mutinus ravenelii* (Berk. & M. A. Curtis) E. Fisch. (*Phallaceae*) в Республике Мордовия. Вестник Мордовского университета. 2016;27(1):131-40. doi: 10.15507/0236-2910.027.201701.131-140.
2. Федосова МА, Галиуллина ЭГ, Юрченко ВИ. Атлас Московской области. Климатическая карта. 1 атл. Москва: ГУГК; 1976.

Общий список литературы/References List

1. Ivoylov AV. [First finding of *Mutinus Ravenelii* (Berk. & M. A. Curtis) E. Fisch. (*Phallaceae*) in the Republic of Mordovia]. Vestnik Mordovskogo Universiteta. 2017;1(27):131-40. doi: 10.15507/0236-2910.027.201701.131-140. (In Russ.)
2. Fedosova MA, Galiullina EG, Yurchenko VI. Atlas Moskovskoy Oblasti. Klimaticheskaya Karta. 1 atl. Moscow: GUGK; 1976. (In Russ.)
3. Andersson O. The distribution and ecology of *Phallus impudicus* in the Nordic countries. Svensk Botanisk Tidskrift. 1989; 83(4):219-41.
4. Bau T, Yan JQ. Two new rare species of *Candolleomyces* with pale spores from China. MycoKeys. 2021; 80:149-61. doi: 10.3897/mycokeys.80.67166. eCollection 2021.
5. Borg-Karlson A-K, Englund FO, Unelius CR. Dimethyl oligosulphides, major volatiles released from *Sauromatum guttatum* and *Phallus impudicus*. Phytochemistry. 1994;35(2):321-3. doi:10.1016/S0031-9422(00)94756-3.
6. Chenna R, Sugawara H, Koike T, Lopez R, Gibson TJ, Higgins DG, Thompson JD. Multiple sequence alignment with the Clustal series of programs. Nucl Acids Res. 2003;31(13):3497-500. doi: 10.1093/nar/gkg500.
7. Drummond-Herdman A, Malysheva E, Jakob S, Szafián DA, Nagy LG. (2025) A new species and a new record of *Bolbitius* (*Bolbitiaceae*, *Agaricales*) from Scotland and Britain, respectively. Phytotaxa. 733 (2): 155–71. doi: 10.11646/phytotaxa.733.2.1.
8. Gao T, Qu H, Ge ZW. Multi-gene phylogeny and morphological characters reveal seven new species of *Micropsalliota* (*Agaricales*, *Agaricaceae*) from southern China, with an updated key for the species distributed in China. Mycology. 2024;15(3):374-99. doi: 10.1080/21501203.2024.2323206.
9. Gardes M, Bruns TD. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes-application to the identification of mycorrhizae and rusts. Mol Ecol. 1993;2(2):113-8. doi: 10.1111/j.1365-294x.1993.tb00005.x.
10. Gopallawa B, Yakandawala DMD, Wijeweera S, Madola GKIS, Adikaram NKB. The first record of *Mutinus bambusinus* (Zoll.) E. Fisch. after 104 Years of its initial documentation in Sri Lanka. Ceylon J Sci. 2025;54 (2):419-23. doi: 10.4038/cjs.v54i2.83834.
11. Govindaraj R, Paulraj MG, Ignacimuthu S. New record of *Mutinus caninus* (Huds.) Fr. (*Phallaceae*) in Southern India, Tamil Nadu. J Acad Indust Res. 2016;4(9):206-10.
12. Hibbett DS, Bauer R, Binder M, Giachini AJ, Hosaka K, Justo A, Larsson E, Larsson KH, Lawrey JD, Miettinen O, Nagy LG, Nilsson RH, Weiss M, Thorn RG. *Agaricomycetes*. In: McLaughlin JD, Spatafora JW, eds. The Mycota v.7A: Systematics and Evolution. Springer; 2014. P. 373-429.
13. Hu Y, Karunarathna SC, Li H, Galappaththi MC, Zhao CL, Kakumyan P, Mortimer PE. The impact of drying temperature on basidiospore size.

- Diversity. 2022;14(4):239. doi: 10.3390/d14040239.
14. Junior NM, Asai T, Capelari M, Paccola-Meirelles LD. Morphological and molecular identification of four Brazilian commercial isolates of *Pleurotus* spp. and cultivation on corncob. *Braz Arch Biol Technol*. 2010; 53: 397-408.
15. Kasap EY, Parfenova OK, Kurkin RV, Grishin DV. Bioinformatic analysis of the coding region of the melatonin receptor 1b gene as a reliable DNA marker to resolve interspecific mammal phylogenetic relationships. *Math Biosci Eng*. 2023;20(3):5430-47. doi: 10.3934/mbe.2023251.
16. Kirk PM, Cannon PF, Minte, DW, Stalpers JA. *Dictionary of the Fungi*. 10th ed. Wallingford (UK): CAB International; 2008.
17. Kornerup A, Wanscher J. *Metheun Hand Book of Colour*. 3rd ed. Metheun: London Ltd., London, 1978.
18. Kumar S, Nei M, Dudley J, Tamura K. MEGA: a biologist-centric software for evolutionary analysis of DNA and protein sequences. *Brief Bioinform*. 2008;9(4):299-306. doi: 10.1093/bib/bbn017.
19. Larkin MA, Blackshields G, Brown NP, Chenna R, McGettigan PA, McWilliam H, Valentin F, Wallace IM, Wilm A, Lopez R, Thompson JD, Gibson TJ, Higgins DG. Clustal W and Clustal X version 2.0. *Bioinformatics*. 2007;23(21):2947-8.
20. List PH, Freund B. Methylmercaptane and hydrogen sulfide odorous substances of stinkmorel (*Phallus impudicus*). *Naturwissenschaften*. 1967;54(24):648. doi:10.1007/bf01142432.
21. Lv T, Li Y-R, Ao C-C, He J, Yu F-M, Tang S-M, Li S-H. *Phallus aureus* sp. nov. (*Phallaceae*, *Basidiomycota*) from Yunnan Province, China. *Phytotaxa*. 2022;567(1):61-70. doi:10.11646/phytotaxa.567.1.5.
22. Mailund T, Brodal GS, Fagerberg R, Pedersen CN, Phillips D. Recrafting the neighbor-joining method. *BMC Bioinformatics*. 2006;7:29. doi: 10.1186/1471-2105-7-29.
23. Rathnayaka AR, Tennakoon DS, Jones GE, Wanasinghe DN, Bhat DJ, Priyashantha AH, Stephenson SL, Tibpromma S, Karunarathna SC. Significance of precise documentation of hosts and geospatial data of fungal collections, with an emphasis on plant-associated fungi. *NZ J Bot*. 2025;63(2-3):462-89. doi:10.1080/0028825X.2024.2381734.
24. Ribeiro MS, Cabral TS, Melanda GCS, Baseia IG, Silva BDB. Funga faloide e floriforme (*Phallales*, *Basidiomycota*) no Estado da Bahia. *Brasil Hoehnea*. 2022;49: e142022.
25. Ronquist F, Huelsenbeck JP. MrBayes 3: Bayesian phylogenetic inference under mixed models. *Bioinformatics*. 2003;19(12):1572-4. doi: 10.1093/bioinformatics/btg180.
26. Silva BDBD, Cabral TS, Martín MP, Marinho P, Calonge FD, Baseia IG. *Mutinus albotruncatus* (*Phallales*, *Agaricomycetes*), a new phalloid from the Brazilian semiarid, and a key to the world species. *Phytotaxa*. 2015; 236(3): 237-48. doi:10.11646/phytotaxa.236.3.4.
27. Sleeman DP, Jones P, Cronin N. Investigations of an association between the stinkhorn fungus and badger setts. *J Nat Hist*. 1997; 31:983-92.
28. Sohal VK, Dey A, Singh A. MEGA biocentric software for sequence and phylogenetic analysis: a review. *Int J Bioinform Res Appl*. 2010;6(3):230-40. doi: 10.1504/IJBRA.2010.034072.
29. Tamura K, Nei M. Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. *Mol Biol Evol*. 1993;10(3):512-26. doi: 10.1093/oxford-journals.molbev.a040023.
30. Tamura K, Steche, G, Peterson D, Filipski A, Kumar S. MEGA6: Molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. *Mol Biol Evol*. 2013;30(12): 2725-9. doi: 10.1093/molbev/mst197.
31. Thompson JD, Higgins DG, Gibson TJ. CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucl Acids Res*. 1994; 22(22):4673-80.
32. Verma RK, Verma P, Mishra Y. Headless stinkhorn fungi (*Mutinus* spp.) with special reference to Indian species. *Indian J Trop Biodiv*. 2016;24(1):75-80.
33. Vilgalys R, Hester M. Rapid genetic identification and mapping of enzymatically amplified ribosomal DNA from several *Cryptococcus* species. *J Bacteriol*. 1990;172(8):4238-46. doi: 10.1128/jb.172.8.4238-4246.1990.
34. Wang W, Li Y, Wang H, Zu Y. Differences in the activities of tight enzymes from ten soil fungi and their possible influences on the surface structure, functional groups, and element composition of soil colloids. *PLoS One*. 2014; 9(11):e111740. doi: 10.1371/journal.pone.0111740.
35. White TJ, Bruns TD, Lee S, Taylor JW. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In Innis MA, Gel-fand DH, Sninsky JJ, White TJ, eds. *PCR protocols. A guide to methods and applications*. San Diego, Calif.: Academic Press; 1990. P. 315-22.
36. Zhou Z-L, Li Z, Lyu Y, Liu A, Gao Y-M, Wang P-M. A new species of *Mutinus* (*Phallaceae*, *Phallales*) from Shandong Province, China. *Phytotaxa*. 2023;583(2):174-82. doi:10.11646/phytotaxa.583.2.5.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНОГЛИН ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ВОД И ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДАМИ НЕФТИ

М.М. Герцен*, Л.В. Переломов

Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, Тула, Россия

*Эл. почта: mani.gertsen@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.05.2026; принята к печати 08.09.2026

Актуальная проблема загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами требует разработки новых материалов и технологий для ремедиации загрязненных экосистем. Глинистые минералы, являющиеся группой водных силикатов, представляющих основную массу глинистых отложений и большей части почв, известны как эффективные адсорбенты различных поллютантов. Однако их использование для поглощения углеводородов нефти ограничено гидрофильными свойствами поверхностей филоосиликатов, препятствующими эффективному взаимодействию с неполярными органическими загрязнителями. Модификация поверхностей глинистых минералов различными органическими веществами позволяет активировать их путем придания полностью или частично липофильных свойств. Одним из перспективных органических модификаторов слоистых силикатов являются поверхностно-активные вещества. Будучи амфифильными, они существенно изменяют свойства как поверхности адсорбента, так и жидкой фазы, а наличие в составе их молекул разнообразных структурных фрагментов и функциональных групп может приводить к новым взаимодействиям между органоминеральными комплексами, синтезированными с их участием, и органическими поллютантами. Эффективность органоглин при адсорбции сырой нефти и ее дистиллятов (бензина, керосина, дизеля, масел) подтверждена многочисленными исследованиями. При этом адсорбция отдельных компонентов нефти, в частности парафинов и нафтен, изучена недостаточно. В представленном обзоре приведена информация о способах синтеза органоминеральных систем и их сорбционных свойствах по отношению к различным нефтяным компонентам, достоинства и недостатки применения данных сорбентов и перспективность их применения. Показаны сложная природа сырой нефти и нефтепродуктов и примеры использования органоглин для очистки водных и почвенных экосистем, загрязненных нефтяными углеводородами.

Ключевые слова: сырая нефть, нефтепродукты, глинистые минералы, органоглины, адсорбция

PROSPECTS FOR USING ORGANOCLAYS TO REMEDIATE WATER AND SOILS CONTAMINATED WITH PETROLEUM HYDROCARBONS

M.M. Gertsen*, L.V. Perelomov

Tula State Pedagogical University names after L.N. Tolstoy, Tula, Russia

*Email: mani.gertsen@gmail.com

Managing the current problem of oil and petroleum pollution requires new materials and technologies to remediate polluted ecosystems. The clay minerals, a group of aqueous silicates representing the bulk of clay sediments and most soils, are known to be effective pollutant sorbents. However, their use for petroleum hydrocarbons sorption is limited by the hydrophilic properties of phyllosilicate sheet surfaces, which prevent their effective interactions with non-polar organic pollutants. Modification of the surfaces with various organic substances allows activating them by imparting partially lipophilic properties. One of the promising organic modifiers of silicate sheets are surfactants. Being amphiphilic, they substantially change the properties of both the sorbent sheet surface and the liquid phase, whereas the presence of various functional groups in surfactants can lead to additional interactions of organic pollutants with organomineral complexes synthesized using surfactants. The effectiveness of organoclays in sorption of crude oil and oil distillates (gasoline, kerosene, diesel, and lubricants) has been confirmed in numerous studies. However, the sorption of individual components of oil, such as paraffin and naphthenes, is not studied sufficiently. The presented review provides information on the methods of synthesis of organomineral systems and their sorption properties related to various petroleum components, the advantages and disadvantages of using these sorbents, and the prospects for their application. The complex nature of crude oil and petroleum products is disclosed, and examples of the practical use of organoclays for cleansing water and soil ecosystems contaminated with petroleum hydrocarbons.

Keywords: crude oil, petroleum products, clay minerals, organoclays, sorption

Введение

Развитие нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности приводит к крупномасштабному загрязнению вод, почв и грунтов нефтью и нефтепродуктами [16, 54]. Разливы нефти могут происходить при ее добыче, транспортировке и хранении по разным причинам, включая аварии, халатность и преднамеренный сброс [19]. Основные объемы нефти попадают в гидросферу в результате аварий танкеров. И хотя в последнее время число таких аварий значительно сократилось¹, подобным путем происходит масштабное загрязнение морских, океанических и сопряженных с ними экосистем [63].

Другой важной причиной попадания нефти в окружающую среду является ежедневная утечка топлива и смазочных материалов из автомобилей. Сегодня в мире насчитывается около 1,5 миллиардов автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Даже небольшой выброс нефтесодержащих материалов от каждого автомобиля приводит к существенному суммарному загрязнению окружающей среды.

Следует также отметить естественные причины разливов нефти, на которые приходится примерно 6% от их общего количества. Такие разливы могут происходить вследствие движения тектонических плит планеты и выхода нефти из слоев под морским дном [32].

Существенным фактором, приводящим к разливам нефти и загрязнению наземных экосистем, является ее добыча (бурение, подготовка, эксплуатация и ремонт скважин). Основным компонентом этих выбросов является пластовая жидкость, которая содержит нефть, пластовую воду и растворенный газ. Попадание нефти в результате разливов в водоемы способствуют ее распространению на большие расстояния и загрязнению обширных территорий. Подобные проблемы характерны и при авариях на трубопроводах.

Попадая в окружающую среду, нефть наносит ей значительный ущерб. Негативные последствия загрязнения могут сохраняться в течение длительного времени. Живые организмы погибают под прямым воздействием нефтяных углеводородов или при изменении условий среды обитания. Происходит деградация почв и потеря их плодородия. Естественный процесс самоочищения основан, прежде всего, на микробном разложении углеводородов и протекает относительно медленно, особенно в районах с низкими температурами [28]. Таким образом, проблема очистки окружающей среды от разливов нефти является одной из приоритетных экологических задач. Решение этой задачи требует разработки новых и совершенствования уже существующих методов и технологий восстановления нефтезагрязненных почв и вод.

При выборе подходящего метода для ремедиации нефтезагрязненных экосистем необходимо учитывать ряд

факторов. К ним относятся химический состав загрязнителей, а также физические, химические и биологические характеристики загрязненной среды, включая наличие или отсутствие специфических штаммов-нефтедеструкторов в составе автохтонных микробных сообществ. Кроме того, существенными факторами является время, необходимое для ремедиации, а также экономическая эффективность используемых технологий.

Ремедиация экосистем, загрязненных углеводородами нефти, может быть достигнута с помощью четырех основных хорошо известных групп методов очистки: механических, химических, физико-химических, биологических и возможных комбинаций этих методов [21].

Основная цель большинства современных методов ремедиации заключается в изолировании, полном или частичном удалении загрязнителя и/или переводе токсичных веществ в менее токсичные или нетоксичные соединения [41]. Эффективность ремедиации может быть существенно повышена путем комбинации различных методов. На рис.1 показаны преимущества и недостатки различных методов очистки.

Эффективность химической очистки нефтезагрязненных сред достигает 90%, но многие химические вещества, используемые в этом процессе, а также продукты их взаимодействия с углеводородами токсичны [24, 33, 40, 51]. Основным ограничением биологической очистки является длительность процесса ремедиации, замедление процесса при низких температурах, а также конкуренция вносимых бактериальных штаммов-нефтедеструкторов с аборигенными штаммами [29]. Физико-химическая очистка в первую очередь предполагает адсорбцию нефтяных углеводородов на различных материалах с возможным последующим биологическим разложением иммобилизованных токсикантов или удалением продуктов взаимодействия адсорбента и адсорбата из загрязненной экосистемы. В качестве адсорбентов используются твердые пористые вещества с большой удельной поверхностью, способные связывать частицы загрязнителя (из жидкой или газовой фазы) на своей поверхности [42].

Для сорбции нефти и ее компонентов используются природные сорбенты биологического происхождения (торф, опилки, активированный уголь, биочар и др.) [13, 22, 27, 48, 61, 64] и минеральные материалы (филлосиликаты, цеолиты, перлит и др.). Также применяются искусственные материалы на основе вискозы, гидратцеллюлозы, синтетических волокон и термопластичных материалов [56]. Адсорбционные методы являются эффективными, простыми и безопасными. В качестве адсорбентов обычно используют устойчивые в окружающей среде материалы, нетоксичные, легкодоступные и недорогие [7].

Глинистые минералы, которые относятся к филлосиликатам, т.е. минералам слоистого строения, характеризуются уникальными свойствами, позво-

¹ ITOFF. Oil tanker spill statistics 2025. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2025>

ляющими использовать их в качестве адсорбентов: это стабильные, экологически безопасные материалы, обладающие высокой удельной поверхностью и сорбционной емкостью. Месторождения глинистых минералов широко распространены, что делает их недорогими и доступными [49]. Однако, природные глинистые минералы имеют отрицательно заряженные поверхности и поэтому способны адсорбировать,

главным образом, гидрофильные вещества. Химическая модификация поверхностей глин поверхностно-активными веществами (ПАВ), синтез так называемых органоглин, делает поверхности феллосиликатов полностью или частично гидрофобными, что значительно расширяет спектр возможных адсорбатов, включая нефть и ее компоненты [17]. Для модификации могут использоваться различные ПАВ – как

Механическая очистка	Химическая очистка	Физико-химическая очистка	Биологическая очистка	Гибридный биотехнологический метод
Преимущества	Преимущества	Преимущества	Преимущества	Преимущества
- Скорость очистки - Способность очищать большие площади - Возможность непрерывной очистки - Воспроизводимость	- Возможность использования с различными типами загрязнений - Скорость очистки - Способность удалять токсиканты в высокой концентрации	- Высокая степень очистки - Простота технологий - Возможность использования экологически чистых сорбентов и флокулянтов	- Низкая стоимость - Экологичные технологии - Простота в применении - Эффективна при низких концентрациях токсикантов	- Возможность использования с различными типами загрязнений - Способность удалять трудновыводимые и стойкие загрязнения - Возможность рецикла - Скорость очистки - Положительное воздействие на почвенные и водные микробные сообщества
Недостатки	Недостатки	Недостатки	Недостатки	Недостатки
- Высокая стоимость - Вероятность вторичного загрязнения - Разрушительное воздействие на окружающую среду	- Высокая стоимость - Зависимость от факторов окружающей среды, таких как pH и температура - Токсичность сорбентов - Высокий расход реагентов - Способность образовывать токсичные промежуточные продукты распада	- Длительность очистки - Часто высокая стоимость	- Длительность очистки - Зависимость от факторов окружающей среды, таких как pH и температура - Не подходит для очистки высоких концентраций токсикантов и стойких загрязнений	- Высокая стоимость - Вероятность вторичного загрязнения

Рис. 1. Методы очистки водных и почвенных экосистем от нефтезагрязнений. Преимущества и недостатки



Рис. 2. Число публикаций за последние 10 лет в базе данных ScienceDirect на 7 февраля 2026 года.

природные, так и синтетические. Органоглины в значительной степени сохраняют кристаллические свойства глинистых минералов.

Работ, посвященных использованию органоглин для адсорбции нефтяных углеводородов (ключевые слова «Organoclays oil sorbent»), в современной научной литературе относительно немного (рис. 2).

В нашем обзоре мы даем краткую характеристику органоглин как адсорбционных материалов, показываем сложный химический состав нефти как адсорбата и обобщаем основные опубликованные к настоящему времени данные о поглощении нефтяных углеводородов органоглинами.

Органоглины: синтез и свойства

Адсорбционная способность глинистых минералов определяется главным образом химическими свойствами и разветвленностью их поверхностей. Из-за гидрофильной природы поверхностей большинства природных глинистых материалов они, как правило, малоэффективны для адсорбции неполярных органических загрязнителей, таких как антибиотики, красители, пестициды, нефтяные углеводороды и т. д. [30]. При модификации поверхностно-активными веществами поверхностей глинистых минералов за счет различных физических, химических и физико-химических механизмов получаемые материалы сочетают большую удельную поверхность, сопоставимую с таковой у глин, и частично или преимущественно гидрофобные свойства, что расширяет их применение для поглощения более широкого круга загрязнителей, включая неполярные органические вещества.

Поверхностно-активные вещества – это группа органических веществ, молекулы которых содержат как заряженные (гидрофильные), так и незаряженные (гидрофобные) фрагменты. ПАВ классифицируются на основе продуктов их диссоциации в воде на катионные, анионные, амфотерные, неионогенные и ПАВ типа гемини [30]. Получение органоглин основано на химических реакциях (ионный обмен, комплексообразование и др.) и физико-химических взаимодействиях глинистых минералов с органическими соединениями. Наиболее распространенным методом синтеза органоглин является взаимодействие филлосиликата с ПАВ в водном растворе [26]. Присутствие воды в межслоевом пространстве и вокруг обменных катионов усиливает силы отталкивания, что приводит к расслоению филлосиликатных листов, обеспечивая полный доступ к их поверхности и облегчая адсорбцию и взаимодействие с ПАВ [26]. Ряд авторов использовали в качестве растворителей для ПАВ спирты – этанол и растворы этанола в воде [2, 10], изопропанол [20], диметилсульфоксид (ДМСО) и другие органические растворители [59], например, ацетон [38].

Другим распространенным методом синтеза органоглин является интеркаляция органических веществ в минералы путем сплавления филлосиликатов с ПАВ. Принято считать, что отсутствие растворителей, особенно органических, делает производство органоглин более экологически безопасным и пригодным для крупномасштабного производства [15]. Интеркаляция органических молекул в межпакетное пространство глин при сухом синтезе подтверждается с помощью рентгеновской дифракции – происходит увеличение базального дифракционного рефлекса d_{001} [15].

Иногда для синтеза органоглин используется двухэтапная процедура (с преадсорбцией и предварительным раскрытием). Так, короткоцепочечные жирные кислоты с числом атомов менее 10 могут быть интеркалированы непосредственно в кальцевый монтмориллонит. Но жирные кислоты с 10-18 атомами углерода интеркалируются только после предварительной адсорбции гексанола или октанола [12].

Когда в качестве модификаторов используются полярные органические вещества, они замещают молекулы воды и обменные катионы в межслоевом пространстве смектитов и вермикулитов [35]. Только катионные и цвиттерионные ПАВ имеют положительный заряд и, следовательно, обладают сильным химическим сродством к глинистым минералам, что позволяет им интеркалироваться в межслоевое пространство путем ионного обмена. Анионные ПАВ в основном адсорбируются на поверхности глинистых минералов за счет электростатического взаимодействия с положительно заряженными краевыми участками или через мостиковые катионы. Адсорбция неионогенных ПАВ происходит главным образом за счет водородных связей [5, 50]. Следует иметь в виду, что при наличии нескольких разных функциональных групп, ПАВ могут проявлять как кислотные, так и основные свойства в зависимости от pH.

Свойства получаемых органоглин зависят от природы исходного глинистого минерала, типа используемого ПАВ и условий синтеза. Основной характеристикой органоглин является увеличение межслоевого расстояния, что подтверждает успешную интеркаляцию органических катионов или молекул в межслоевое пространство. Также происходит изменение характера поверхности с гидрофильной на гидрофобную (органогидрофобную) [66].

Структура и свойства органоглин могут изменяться в широких пределах. В зависимости от плотности заряда глинистого минерала и размера органического катиона, молекулы ПАВ могут формировать в межслоевом пространстве различные конфигурации: монослойные, бислойные, псевдотримолекулярные или парафиноподобные структуры [25, 55]. Эти конфигурации в свою очередь определяют доступность меж-

слоевого пространства для адсорбатов и, следовательно, общую сорбционную емкость материала.

Нефть и нефтепродукты как адсорбаты: состав и свойства

Сырая нефть – это чрезвычайно сложная смесь, состоящая в основном из углеводородов, а также содержащая небольшие количества соединений серы, азота, кислорода и металлов [16]. Состав сырой нефти сильно варьирует в зависимости от ее происхождения (месторождения). Традиционно различают парафинистые, нафтеновые и смешанные сырые нефти в зависимости от преобладания парафиновых, нафтенных, ароматических и асфальтеновых углеводородов. Смешанные сырые нефти содержат сопоставимые количества парафиновых и нафтенно-ароматических углеводородов [39]. Низкоуглеродистые, с высоким содержанием водорода и высокой плотностью по шкале Американского института нефти (API) сырые нефти, как правило, богаты парафинами и дают больше бензина и легких нефтепродуктов; высокоуглеродистые, с низким содержанием водорода и низкой плотностью по шкале API, обычно богаты ароматическими соединениями [1]. Сырая нефть может содержать до нескольких тысяч различных углеводородных соединений (рис. 3).

Поскольку возможно практически бесконечное число различных углеводородных смесей, существует огромное количество типов сырой нефти. Основные группы углеводородов, содержащихся в нефти, перечислены ниже.

Парафины (алканы)

Алканы, или насыщенные углеводороды, являются основными компонентами сырой нефти и большинства нефтепродуктов. Атомы углерода, составляющие углеродный скелет алканов, связаны вместе, образуя цепь (линейные или разветвленные алканы), кольцо (циклические алканы) или их сочетания. Линейные и разветвленные алканы называются парафинами. Эти соединения имеют общую эмпирическую формулу $C_n H_{2n+2}$. Линейные алканы, то есть соединения, атомы углерода которых расположены в виде прямой цепи или ряда, называются нормальными парафинами (нормальными алканами). Разветвленные алканы часто называют изопарафинами (изоалканами) [34]. Большинство нефтяных парафинов имеют углеродную цепь из 17–35 атомов. Некоторые парафины являются жидкостями и имеют температуру плавления $\leq 27^\circ C$.

Нафтенны

Нафтенны (циклоалканы) – это насыщенные углеводороды, которые имеют по меньшей мере одно кольцо из атомов углерода. Их общая формула – $C_n H_{2n}$. Плотность и температура кипения нафтеннов выше, чем у алканов с тем же числом атомов углерода. Нафтенны, обычно встречающиеся в сырой нефти, представляют собой кольца с пятью или шестью атомами углерода. К этим кольцам часто присоединены алкильные заместители. Полициклические нафтенны присутствуют в более тяжелых фракциях сырой нефти. Примерами нафтеннов являются циклопентан, циклогексан, метилциклогексан и другие [18].

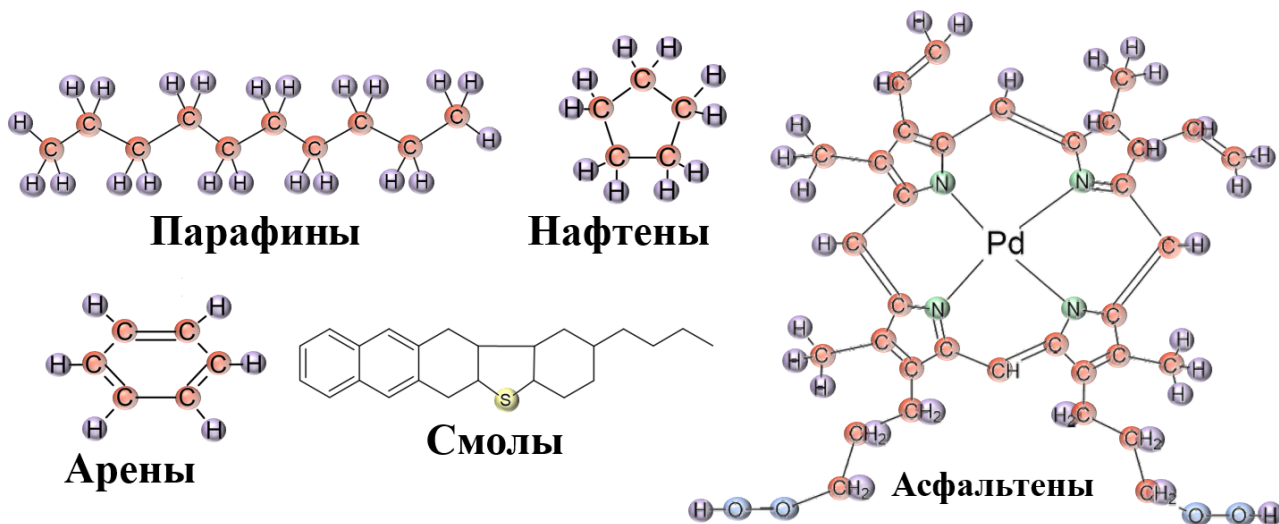


Рис. 3. Компоненты сырой нефти

Ароматические углеводороды

Еще одним важным типом нефтяных углеводородов являются ароматические соединения (арены). Ароматические углеводороды обычно имеют эмпирическую формулу C_nH_{2n-6} и содержат шестичленное углеродное кольцо. Кольцо имеет три двойные углерод-углеродные связи. Такое расположение трех двойных связей внутри шестичленного кольца придает этим соединениям особые химические свойства. Бензол и все более крупные арены имеют характерную планарную структуру, обусловленную электронными требованиями шести (или более) π -электронов. Группа ароматических углеводородов включает не только бензол, но и его производные, такие как толуол ($C_6H_5CH_3$), изомерные диметилбензолы ($CH_3C_6H_4CH_3$) и другие [57]. Высшие ароматические соединения, такие как нафталин и бензо(а)пирен, содержат более одного бензольного кольца и относятся к классу углеводородов, называемых полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) [34].

Олефины

Олефины (алкены или ненасыщенные углеводороды) – это углеводородные соединения с общей формулой C_nH_{2n} , содержащие по меньшей мере одну двойную углерод-углеродную связь. Обычно считается, что олефины образуются на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах и не являются природными компонентами сырой нефти.

Один из возможных источников олефинов в нефти связан с процессами миграции и загрязнения, при котором легкие нефти выступают в качестве растворителей для сингенетичных олефинов, образовавшихся вдоль пути миграции или в пределах коллектора. Два других возможных источника связаны с абиогенным изменением сырой нефти. К ним относится «холодная» радиолитическая дегидрогенизация насыщенных нефтяных углеводородов вследствие распада радиоактивных элементов (урана, тория и др.) в минералах пласта. Кроме этого, возможен пиролиз, вызванный термическим воздействием магматических интрузий, расположенных вблизи нефтяных резервуаров [14].

Помимо этих соединений, сырая нефть содержит ряд поверхностно-активных веществ в качестве примесей. Они встречаются в широком спектре нефтяных фракций, но более распространены в тяжелых фракциях, таких как смолы и асфальтены. Их считают полярными компонентами, содержащими кислород, азот и серу, с очень сильной межфазной активностью, способной изменять смачиваемость минеральных поверхностей [53].

Смесь этих органических веществ можно разделить с помощью фракционной перегонки. Известно более 2000 видов нефтепродуктов, получаемых из сырой нефти [6].

Сорбция сырой нефти и нефтепродуктов органоглинами

Большое число исследований посвящено поглощению сырой нефти органоглинами, которые были синтезированы, в основном с использованием катионных ПАВ [7]. Так, показано [43], что органоглина, полученная путем ионного обмена гексадецилтриметиламмония бромидом (HDTMA-Br) на ионы натрия в структуре монтмориллонита, сорбировала (удерживала) больше сырой нефти, керосина, бензина и толуола, чем необработанная глина. Кроме того, органоглина поглощала больше бензина и толуола, чем керосина и сырой нефти. Для определения сорбционной емкости органоглин использовался метод ASTM F726-99 (Advancing Standards Transforming Markets International – организация, занимающаяся разработкой международных стандартов)² Этот метод дает информацию об удерживании нефти и нефтепродуктов пористыми материалами, которое зависит от вязкости вещества, а не от факторов, определяющих классическую физико-химическую адсорбцию. В связи с этим удержание органоглиной углеводородов превышало ее собственную массу в 5 раз

Органоглины на основе латерита и бентонита (монтмориллонита) с двумя ПАВ – гексадецилтриметиламмония хлоридом (HDTMA-Cl) и тетрадецилтриметиламмония бромидом (TDTMA-Br) – оказались эффективными сорбентами для дизельного топлива и моторного масла из водных эмульсий. Органоглины на основе монтмориллонита обладали более высокой поглотительной емкостью, а HDTMA-Cl был наиболее эффективным модификатором [46]. Для определения сорбционной емкости (удерживающей способности) использовался аналогичный метод, который включает контакт адсорбента с маслами с последующим сливанием излишков и взвешиванием³

Коммерческая органоглина на основе бентонита использовалась для удаления нефтесодержащих продуктов из воды [44]. В качестве нефтепродуктов в эмульсиях использовалось стандартное минеральное масло, два вида смазочно-охлаждающих масел, а также были использованы стоки нефтеперерабатывающего завода и пластовая вода из добывающих скважин в Эстеване (Канада). Концентрации нефти в нефтесодержащих водах изменялась от 26 до 381 мг/л.³ Эксперименты показали, что время установления относительного равновесия для сорбции нефти органоглиной составляло менее 1 ч для всех эмульсий. Аппроксимация экспериментальных данных адсорб-

² (ASTM. Standard test methods for sorbent performance of absorbents. ASTM F726-99. Доступно по ссылке: <https://store.astm.org/f0726-99.html>)

³ (ASTM. Standard test methods for sorbent performance of absorbents. ASTM F716-09. Доступно по ссылке: <https://doi.org/10.1520/F0716-09>).

ционными моделями выявила, что наиболее подходящей для описания адсорбции стандартного минерального масла, одного из смазочно-охлаждающих масел и пластовой воды, является модель Фрейндлиха, описывающая полимолекулярную адсорбцию. Изотермы Ленгмюра и расчеты методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ)⁴ описывали с высокими коэффициентами корреляции адсорбцию второго смазочно-охлаждающего масла и стоков нефтеперерабатывающего завода соответственно. Результаты показали, что органоглина может практически полностью удалять нефть из эмульсий в воде [44].

При использовании трех органоглин, полученных на основе вайомингского Na-монтмориллонита с разными катионными ПАВ – октадецилтриметиламмония бромидом (ODTMA-Br, $C_{21}H_{48}NBr$), дидецилдиметиламмония бромидом (DDDMA-Br, $C_{22}H_{48}NBr$) и хлорид ди(гидрогенизированного таллового)диметиламмония – наибольшая эффективность для поглощения дизельного топлива оказалась у третьего сорбента, а для сорбции гидравлического и моторного масла – у органоглины на основе DDDMA-Br. Таким образом, сорбционная емкость органоглин по отношению к нефтепродуктам зависела от вида ПАВ, использованного при синтезе этих сорбционных материалов. Две длинные углеродные цепи в молекулах DDDMA-Br и таллового ПАВ, по-видимому, повышают сорбционную емкость органоглин. В отличие от этого, глинистый минерал, модифицированный ODTMA-Br, сорбировал значительно меньше нефтепродуктов [13].

Органоглины, синтезированные с участием катионных ПАВ – четвертичных аммониевых солей – дистеарилдиметиламмония хлорида (DSDMA-Cl) и алкилдиметилбензиламмония хлорида (ADMBA-Cl) – эффективно поглощали бензин, керосин и дизельное топливо [45]. Изучение полученных органоглин с помощью рентгеновской дифракции показало, что величины базального рефлекса (d_{001}), а значит и межслоевого расстояния в них после обработки четвертичными аммониевыми солями увеличились, что подтверждает интеркаляцию ПАВ в глину. Наибольшее увеличение межслоевого расстояния наблюдалось у глин, обработанных ADMBA-Cl. Инфракрасные спектры выявили новые полосы колебаний CH_2 и CH_3 , отражающие присутствие ПАВ в структуре глины [45]. Все полученные органоглины продемонстрировали лучшую поглотительную емкость ко всем нефтепродуктам по сравнению с немодифицированной глиной. При этом органоглина с DSDMA-Cl поглощала больше изученных нефтепродуктов, чем органоглина с ADMBA-Cl. Использование смеси ПАВ (DSDMA-Cl/ADMBA-Cl) для модификации показало несколько более высокую эффективность по сравне-

нию с модификацией отдельным DSDMA-Cl. Для органоглины, синтезированной с DSDMA-Cl, поглотительная емкость уменьшается в следующем порядке: дизельное топливо > керосин > бензин. Это взаимодействие, возможно, напрямую связано с химическим составом адсорбатов (бензин: C_5-C_{10} , керосин: $C_{11}-C_{12}$, дизельное топливо: $C_{13}-C_{17}$). Результаты также могут быть связаны с вязкостью нефтепродуктов, учитывая, что дизельное топливо имеет наибольшую вязкость. В случае органоглин с ADMBA-Cl порядок иной: бензин $\approx$ дизельное топливо > керосин [45].

Бентонит, модифицированный цетилтриметиламмония бромидом (СТА-Br), четвертичным аммониевым соединением, обладающим свойствами катионного ПАВ, был испытан в качестве адсорбента для бензина, керосина и автомобильного дизельного топлива. Наиболее эффективным было использование органоглины в отношении последнего автомобильного газойля; адсорбция керосина и бензина была меньшей и примерно одинаковой. Увеличение дозы модификатора для синтеза органоглин несколько снижало адсорбцию нефтепродуктов [47].

Адсорбция нефтяных углеводородов органоглинами

Несмотря на актуальность проблемы, адсорбция нефтяных парафинов органоглинами изучена недостаточно. Низкомолекулярные алканы часто используются в качестве растворителей при изучении адсорбции ароматических углеводородов [31] и часто оказывают на нее значительное влияние. Однако адсорбция самих отдельных нефтяных парафинов практически не изучалась. В работе [26] отмечается, что использование ПАВ с длинными алкильными цепями, таких как гексадецилтриметиламмоний (HDTMA), при синтезе органоглин приводит к образованию сорбентов, которые эффективно адсорбируют алканы или другие гидрофобные соединения. Модификаторы с ароматическими кольцами, такие как бензилдиметилтридециламмоний (BDTA) или бензилтриметиламмоний (BTA), демонстрируют высокое сродство к ароматическим соединениям (рис. 4).

Использование органоглины, полученной из натриевого монтмориллонита и катионного ПАВ диметилдиоктадециламмония хлорида (DODMA-Cl), в качестве адсорбента для нефти, содержащей 67% масс. парафиновых соединений и 33% масс. нафтеновых соединений (Marcol 52, Exxon Mobil), привело к более эффективной адсорбции парафиновой нефти по сравнению с природным монтмориллонитом. Многократная регенерация сорбента путем промывки N,N-диметилциклогексиламином сохраняла сорбционную емкость органоглины и даже несколько увеличивала ее [39].

Также пока еще мало литературных данных по адсорбции нафтенов органоглинами. Изучение ад-

⁴ <https://paar.ru/news/kak-pravilno-opredelit-ploshchad-po-bet-mikroporistogo-materiala/>

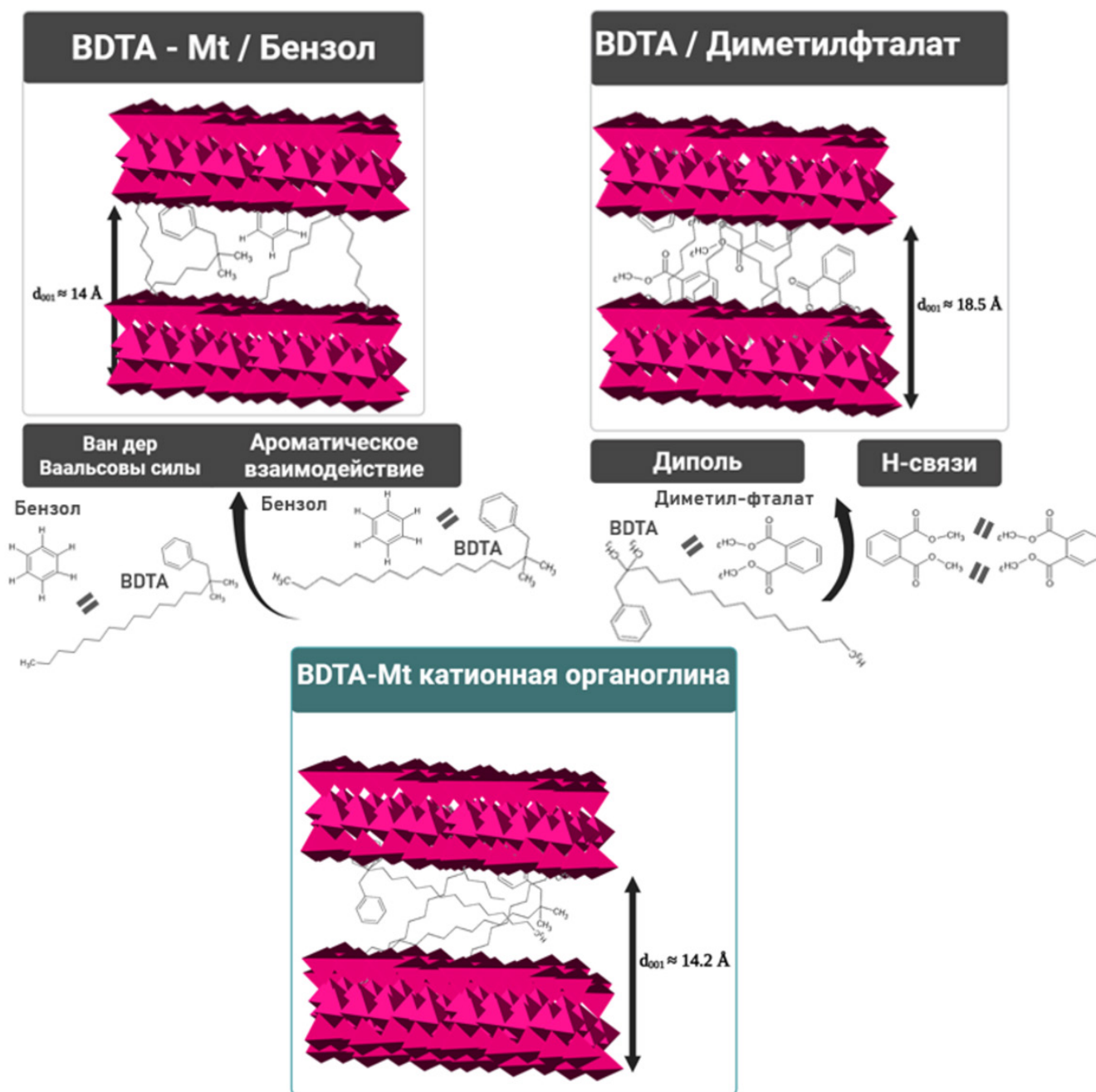


Рис. 4. Возможные механизмы адсорбции в катионной органоглине BDTA-Mt, демонстрирующие латеральное расположение поверхностно-активного вещества, участвующего в связывании бензола, неполярного гидрофобного органического соединения

сорбции летучих соединений – циклогексана (нафтена) вместе с ароматическими углеводородами (толуолом и хлорбензолом) – на природном, натриевом и модифицированном дидодецилдиметиламмония бромидом филлосиликате (смешаннослойный иллит/сметит) показало, что адсорбционная емкость органоглины для циклогексана достигает 2,5 мг/г, а для толуола и хлорбензола – 2 мг/г и 3,5 мг/г соответ-

ственно. Изотермы адсорбции углеводородов относились к типу II по классификации БЭТ (S-образная кривая с выпуклостью вверх), следовательно, поглощение было многослойным. Изотермы показали, что интеркаляция дидодецилдиметиламмония бромида (двухцепочечного катионного ПАВ) значительно улучшила адсорбцию нафтеновых и ароматических органических веществ. В случае смеси циклогексана

и хлорбензола изотермы адсорбции также относились к типу II по классификации БЭТ. При этом количество обоих веществ, адсорбированных органоглиной, уменьшилось, что может указывать на их конкуренцию за сорбционные центры, несмотря на различия в гидрофобности [31].

Адсорбция ароматических веществ, содержащихся в нефти, изучена на многих соединениях. Например, монтмориллонит, модифицированный ПАВ с длинной алкильной цепью – гексадецилтриметиламмония бромидом (HDTMA-Br), и коммерческая органоглина РМ199 были использованы для исследования адсорбции нафталина и бензина. Было показано, что органоглина с HDTMA-Br адсорбировала 3,5% (по массе) нафталина и 6,9% бензина. Коммерческая органоглина РМ199 адсорбировала 21,8% бензина из раствора с концентрацией 200 мкг/мл при использовании смеси метанол/вода в качестве растворителя. Сорбция нафталина и углеводородов бензина органоглинами обусловлена короткодействующими силами взаимодействия между органофильными адсорбентами и адсорбатами. Расширение межслоевого пространства органоглины с HDTMA-Br при взаимодействии с раствором нафталина примерно на 2Å (от 19,44Å до 21,32Å) указывает на то, что молекулы нафталина проникают в межслоевое пространство органоглины. Межслоевое расстояние в органоглине с HDTMA-Br при адсорбции бензина достигало лишь 20,1Å. Достаточно большой размер молекул алканов в бензине (до 10,5Å) привел к меньшему поглощению углеводородов бензина и менее выраженному расширению межслоевого пространства (0,66Å). Органоглина РМ199 с начальным межслоевым расстоянием 35,58Å была более эффективна при адсорбции органических соединений с более крупными размерами молекул. В процессе сорбции углеводородов бензина молекулы адсорбата смогли проникнуть в межплоскостное пространство и расширить его на 3,0Å до 38,66Å [23]. Для органоглин с длинной углеродной цепью модификатора основным механизмом сорбции считается межфазный перенос. Агрегаты ПАВ на этих органоглинах могут формировать наноразмерные органические фазы, которые являются основным местом для сорбции органических веществ [66].

В наших исследованиях органоглины на основе амфотерных ПАВ (динатрий кокоамфодиацетат и натрий кокоиминодипропионат) и неионогенных ПАВ (лаурамин оксид, кокамид диэтаноламин и алкилполиглюкозид) использовались для адсорбции ПАУ – высокомолекулярного бензапирена и низкомолекулярного нафталина. Результаты показали, что адсорбционная емкость органоглин для ПАУ увеличилась по сравнению с исходным бентонитом, причем адсорбция бензапирена была выше, чем нафталина. Процесс адсорбции бензапирена изученными адсор-

бентами лучше всего описывался изотермой Ленгмюра. Напротив, адсорбция нафталина лучше описывалась уравнением Фрейндлиха, что может указывать на ее многослойный характер. Было обнаружено, что органоглины, синтезированные с динатрийкокоамфодиацетатом, были наиболее эффективны для адсорбции бензапирена, в то время как органоглины, синтезированные с использованием натрийкокоиминодипропионата, были более эффективны для адсорбции нафталина [17].

Органоглины с небольшими, компактными органическими катионами модификатора, такими как тетраметиламмоний, могут поглощать углеводороды без значительного расширения межслоевого пространства [67]. Было обнаружено [36,37], что сорбция трех ароматических молекул монтмориллонитом, модифицированным ТМА, уменьшается в порядке бензол > толуол > ксилол, что обратно пропорционально размеру их молекул [67].

Бентонитовая глина, органофилизированная путем интеркаляции четвертичных аммониевых солей, таких как цетилпиридиния хлорид и бензалкония хлорид, была использована для изучения процента удаления бензола, толуола и ксилола из бензина. Начальные и конечные концентрации соединений бензола, толуола и ксилола определяли методом газовой хроматографии с паровым анализатором. Один грамм органоглины с цетилпиридиния хлоридом из 15% (по объему) удалял 0,216 мг/г (60,3%) бензола, 0,346 мг/г (60,1%) толуола, и 0,125 (50,4%) мг/г ксилола из эмульсии бензина в воде [11]. Органоглина с цетилпиридиния хлоридом показала наибольшую сорбционную емкость для бензина [8, 65]. При этом сорбция была в 3,7 раза выше (около 4,4 г/г) по сравнению с природным минералом. Данная органоглина поглощала больше бензина, чем дизельного топлива, в то время как органоглина с бензалкония хлоридом поглощала в большем количестве дизельное топливо [11].

Органоглины на основе монтмориллонита и дидецилдиметиламмония бромида не способствовали биodeградации полициклических ароматических соединений сырой нефти, особенно низкомолекулярных, таких как диметилнафталины. Это служит косвенным доказательством более прочного связывания аренов органоглинами по сравнению с исходным минералом, адсорбция ПАУ на котором способствовала их более эффективной биodeградации и сохраняла их способность к улетучиванию. Органоглина на основе сапонита и дидецилдиметиламмония бромида также не усиливала микробную деградацию диметилнафталинов, но усиливала биodeградацию некоторых других ПАУ, таких как фенантрен [60].

Органоглина с длинноцепочечным алкильным четвертичным аммониевым катионом – гексадецилтриметиламмония бромидом (HDTMA-Br) – была

использована для сорбции фенола, который присутствует в небольших количествах в нефти, но более распространен в дистиллятах. Результаты исследования показали, что сорбция фенолов этой органоглиной увеличивается с ростом гидрофобности молекулы вещества (с добавлением хлора): фенол < п-хлорфенол < 2,4-дихлорфенол. Механизмы, посредством которых эти органические вещества адсорбируются органоглиной, включают как адсорбцию, так и межфазный перенос, при этом адсорбция является доминирующим механизмом при низких концентрациях, а межфазный перенос – при высоких [52]. Эффективная адсорбция толуола на бентоните, модифицированном цетилтриметиламмонием, показана в работе [62]. Органоглины, включенные в состав проницаемых барьеров, значительно снижали концентрации флуорена, пирена, антрацена, нафталина и других органических веществ в сточных водах [4].

Примеры практического применения органоглин

На основе лабораторных исследований органоглины успешно используются в практике ремедиации окружающей среды. Например, на нефтяной платформе в Мексиканском заливе произошел разлив примерно 3 миллионов баррелей нефти. Компания-производитель органоглины поставила специальную органоглину подрядчику, работавшему над ликвидацией разлива нефти. Подрядчик провел предварительные испытания, а затем разработал систему очистки с использованием поставленного материала. Данная система очистки эффективно обработала миллионы галлонов загрязненной воды.⁵

В Соединенных Штатах Америки разрыв трубопровода привел к крупному разливу нефти в близлежащую реку. Компания-производитель органоглины была привлечена для помощи в очистке поверхностных вод в водоеме. Двенадцать больших резервуаров для гидроразрыва были заполнены загрязненной водой от разлива сырой нефти. После использования системы флотации растворенным воздухом загрязненная вода поступала в напорные сосуды, содержащие органоглину, которая поглощала до 75% от собственного веса нефти. После трех месяцев очистки почти пятидесяти пяти миллионов галлонов воды система на основе органоглины снизила высокие концентрации масел и нефтехимических углеводородов на 99%. Отработанная органоглина была утилизирована в соответствии с государственными нормативами⁶

Органоглины используются для создания проницаемых реактивных барьеров для удаления неводных

жидких фаз и плохо растворимых органических веществ из грунтовых вод. Предварительные фильтры из органоглины также могут быть установлены перед фильтрами с активированным углем.⁷

Система очистки сточных вод на базе Военно-воздушных сил в Юте, США, включает флокуляцию, воздушную флотацию, колонны с гранулами органоглины, воздушный выпарной аппарат и колонны с активированным углем. Органоглина – монтмориллонит, обработанный солями четвертичного аммония, производными от гидрогенизированного жира, – содержится в трех резервуарах, работающих со скоростью потока 350 галлонов в минуту. Органоглина в этих колоннах смешана с антрацитом, который действует как фильтрующий материал и сводит к минимуму проблему набухания органоглины. Использование органоглин сокращает материальные затраты на 30% [9].

Органоглины были успешно использованы для очистки скважинных жидкостей с морских платформ с целью получения воды, пригодной для сброса за борт. Скважинные жидкости имеют кислую среду и концентрацию нефти порядка 50 до 800 ppm. Первоначальная очистка проводилась с использованием колонн с неподвижным слоем из 30% органоглины и 70% антрацита. Позднее с большим успехом использовались емкости с радиальным потоком, содержащие 100% гранул органоглины. Данная технология также использовалась для очистки пластовой воды, сопровождающей добычу нефти из устья скважины [3].

Система очистки нефтезагрязненной воды на основе органоглины была разработана и установлена на заводе по производству компонентов для кондиционирования воздуха и отопления на юго-востоке США. Использование органоглин привело к более высокой прозрачности воды и более эффективному удалению нефти и жиров по сравнению с обработкой квасцами. Стоимость очистки воды в колоннах с органоглиной стоила 0,50 доллара за 10 000 галлонов воды при средней концентрации нефти и жиров на входе 25-30 ppm. При этом фильтрующие органоглины в колоннах требуют замены примерно каждые 3-4 месяца [9].

Выводы

Несмотря на развитие альтернативных источников энергии, нефть продолжает оставаться важным энергетическим ресурсом, а также сырьем для химической промышленности. Однако крупномасштабная добыча и переработка нефти могут приводить к значительному загрязнению окружающей среды на каждом этапе цикла обращения нефти и нефтепродуктов. Для решения проблемы ремедиации загрязняющей среды предложены органоглины, получаемые

⁵ (Hydrosil International LTD. Gulf oil spill disaster. <https://hydrosilintl.com/resources/articles/gulf-oil-spill-disaster>).

⁶ (Hydrosil International LTD. Crude oil spill. <https://hydrosilintl.com/resources/articles/crude-oil-spill>).

⁷ (CETCO. Groundwater treatment and control. <https://www.mineralstech.com/business-segments/performance-materials/cetco/environmental-products/applications/groundwater-treatment-and-control>).

модификацией глинистых минералов поверхностно-активными веществами. Органоглины обладают рядом преимуществ по сравнению с природными филлосиликатами, в том числе увеличенным межслоевым расстоянием и полностью или частично гидрофобной поверхностью, что делает их идеальными для использования в качестве сорбентов для удаления нефтяных углеводородов из загрязненных природных сред. Использование различных типов ПАВ в процессе модификации позволяет создавать индивидуальные материалы на основе глин с заданными свойствами, что дополнительно повышает их эффективность в операциях по ликвидации разливов нефти.

Многочисленные исследования продемонстрировали эффективность органоглин для адсорбции сырой нефти и ее различных дистиллятов, таких как бензин, керосин и масла. Однако очень мало исследований посвящено адсорбции индивидуальных химических соединений, содержащихся в сырой нефти, особенно парафинов и нафтен. Адсорбция ароматических углеводородов, содержащихся в сырой нефти и нефтепродуктах, включая бензол, нафталин, толуол, фенол, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и другие, изучена более подробно и демонстрирует высокую эффективность органоглин.

Традиционно исследования сосредоточены главным образом не на адсорбции нефти сорбентами, а на удерживании нефти, которое может в несколько раз превышать массу сорбента. Существует очень мало работ, которые действительно рассматривают адсорбцию индивидуальных углеводородов на поверхности органо-

глин, в которых количество углеводородов определяется с помощью хроматографических методов. Вопрос конкуренции за сорбционные центры между различными группами нефтяных углеводородов и между различными углеводородами внутри одной группы является интересной и малоизученной областью. Знание специфики адсорбции помогло бы решать проблемы, связанные с очисткой природных сред и разделением углеводородов различных групп при добыче.

Кроме того, потенциальные пути регенерации органоглин, экотоксичность отработанных материалов и методы их безопасной утилизации также являются актуальными направлениями для будущих исследований по данной теме.

Органоглины на основе глинистых минералов (главным образом группы смектита) и различных поверхностно-активных веществ являются эффективными материалами для адсорбции и удержания нефти, ее дистиллятов и компонентов и могут использоваться для ремедиации загрязненных сред. Однако существуют некоторые негативные аспекты использования органоглин при ликвидации разливов нефти, такие как стоимость, биоразлагаемость и возможность рециркуляции.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минпросвещения России по теме: «Использование био-минеральных композиций из бактерий-нефтедеструкторов и глинистых минералов для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов» (Соглашение № 073-00098-26-02 от 17.02.2026 года).

Литература

1. Aitani AM. Oil refining and products. In: Cleveland CJ, edr. Encyclopedia of Energy. Amsterdam (Netherlands): Elsevier; 2004. P. 715-29. DOI: 10.1016/b0-12-176480-x/00259-x.
2. Alcántara ACS, Darder M, Aranda P, Ruiz-Hitzky E. Effective intercalation of zein into na-montmorillonite: Role of the protein components and use of the developed biointerfaces. Beilstein J Nanotechnol. 2016;7:1772-82. DOI: 10.3762/bjnano.7.170.
3. Ali SA, Hill DG, McConnell B, Johnson MR. Process, optimized acidizing reduce production facility upset. Oil Gas J. 1997;95(6):44-51.
4. Alther GR. The versatility of organoclays for permeable barriers. Proc Annu Int Conf Soils. 2014;12(1):21.
5. Amirianshoja T, Junin R, Idris AK, Rahmani O. A comparative study of surfactant adsorption by clay minerals. J Pet Sci Eng. 2013;101:21-7. DOI: 10.1016/j.petrol.2012.10.002.
6. Azizian S, Khosravi M. Advanced oil spill decontamination techniques. Interf Sci Technol. 2019;30:283-332. DOI: 10.1016/b978-0-12-814178-6.00012-1.
7. Bandura L, Wozuk A, Kolodynska D, Franus W. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review. Minerals. 2017;7(3):37. DOI: 10.3390/min7030037.
8. Banik N, Jahan S, Mostofa S, Kabir H, Sharmin N, Rahman M, Ahmed S. Synthesis and characterization of organoclay modified with cetylpyridinium chloride. Bangladesh J Sci Ind Res. 2015;50(1):65-70. DOI: 10.3329/bjsir.v50i1.23812.
9. Beall GW. The use of organo-clays in water treatment. Appl Clay Sci. 2003;24(1-2):11-20. DOI: 10.1016/j.clay.2003.07.006.

10. Bee SL, Abdullah MAA, Mamat M, Bee ST, Sin LT, Hui D, Rahmat AR. Characterization of silylated modified clay nanoparticles and its functionality in PMMA. *Compos B Eng.* 2017;110:83-95. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.084.
11. Bertagnolli C, da Silva MGC. Characterization of Brazilian bentonite organoclays as sorbents of petroleum-derived fuels. *Mat Res.* 2012;15(2):253-9. DOI: 10.1590/s1516-14392012005000017
12. Brindley GW, Moll WF. Complexes of natural and synthetic Ca montmorillonites with fatty acids. *Amer Mineralogist.* 1965;50:1355-70.
13. Carmody O, Frost R, Xi Y, Kokot S. Adsorption of hydrocarbons on organo- clays—implications for oil spill remediation. *J Coll Interf Sci.* 2007;305(1):17-24. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.09.032.
14. Curiale JA, Frolov EB. Occurrence and origin of olefins in crude oils. A critical review. *Org Geochem.* 1998;29(1-3):397-408. DOI: 10.1016/s0146-6380(98)00058-8.
15. de Paiva LB, Morales AR, Valenzuela Díaz FR. Organoclays: Properties, preparation and applications. *Appl Clay Sci.* 2008;42(1-2):8-24. DOI: 10.1016/j.clay.2008.02.006.
16. Du W, Wan Y, Zhong N, Fei J, Zhang Z, Chen L, Hao J. Status quo of soil petroleum contamination and evolution of bioremediation. *Petrol Sci.* 2011;8:502-14. DOI: 10.1007/s12182-011-0168-3.
17. Dudnikova T, Burachevskaya M, Minkina T, Mandzhieva S, Zamulina I, Perelomov L, Gertsen M. Sorption properties of bentonite-based organoclays with amphoteric and nonionic surfactants in relation to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Minerals.* 2024;14(11):1132. DOI: 10.3390/min14111132.
18. Fahim MA, Alshahaf TA, Elkilani A. Refinery feedstocks and products. In: Fahim MA, Alshahaf TA, Elkilani A., eds. *Fundamentals of Petroleum Refining.* Amsterdam (Netherlands): Elsevier; 2010. P. 11-31. DOI: 10.1016/B978-0-444-52785-1.00002-4.
19. Ferreira NM, Coutinho R, de Oliveira LS. Emerging studies on oil pollution biomonitoring: A systematic review. *Mar Pollut Bull.* 2023;192:115081. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115081.
20. Fröscher A, Hasse H. Adsorption of oleic acid dissolved in isopropanol-water mixtures on hydrotalcite. *Adsorption Sci Technol.* 2017;36(3-4):919-26. DOI: 10.1177/0263617417730187.
21. Gertsen MM, Arlyapov VA, Perelomov LV, Khar-kova AS, Golysheva AN, Atroshchenko YM, Cardinale AM, Reverberi AP. Environmental implications of energy sources: A review on technologies for cleaning oil-contaminated ecosystems. *Energies.* 2024;17(14):3561. DOI: 10.3390/en17143561.
22. Gertsen MM, Perelomov LV, Arlyapov VA, Atroshchenko YM, Meshalkin VP, Chistyakova TB, Reberberi AP. Degradation of oil and petroleum products in water by bioorganic compositions based on humic acids. *Energies.* 2023;16(14):5320. DOI: 10.3390/en16145320.
23. Ghavami M, Zhao Q, Javadi S, Jangam JSD, Jasinski JB, Saraei N. Change of organobentonite interlayer microstructure induced by sorption of aromatic and petroleum hydrocarbons – A combined study of laboratory characterization and molecular dynamics simulations. *Coll Surf A Physicochem Eng Asp.* 2017;520:324-34. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.01.038.
24. Giwa A, Chalermthai B, Shaikh B, Taher H. Green dispersants for oil spill response: A comprehensive review of recent advances. *Mar Pollut Bull.* 2023;193:115118. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115118.
25. Griffiths S, Sovacool BK, Kim J, Bazilian M, Uratani JM. Decarbonizing the oil refining industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Res Soc Sci.* 2022;89:102542. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102542.
26. Guégan R. Organoclay applications and limits in the environment. *Comptes Rendus Chim.* 2019;22(2-3):132-41. DOI: 10.1016/j.crci.2018.09.004.
27. Hussein SNCM, Othman NH, Dollah A, Rahim ANCA, Japperi NS, Ramakrishnan NSMA. Study of acid treated mixed sawdust as natural oil sorbent for oil spill. *Mater Today Proc.* 2019;19(4):1382-9. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.156.
28. Igalavithana AD, Ok YS, Usman ARA, Al-Wabel MI, Oleszczuk P, Lee SS. The effects of biochar amendment on soil fertility. In: Guo M, He Z, Uchimiya SM, eds. *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers.* Madison (WI, US): Soil Science Society of America, Inc.; 2015. p. 123-44. DOI: 10.2136/sssaspecpub63.2014.0040
29. Imomov S, Kholikova N, Alimova Z, Nuritov I, Temirkulova N. Oil purification devices used in internal combustion engines. *Int J Innovative Tech Exploring Eng.* 2019;9(1):3103-7. DOI: 10.35940/ijitee.A9141.119119.
30. Ismadji S, Soetaredjo FE, Ayucitra A. Modification of clay minerals for adsorption purpose. In: Ismadji S, Soetaredjo FE, Ayucitra A, eds. *Clay Materials for Environmental Remediation.* Cham (Switzerland): Springer; 2015. p. 39-56. DOI: 10.1007/978-3-319-16712-1_3.
31. Jarraya I, Fourmentin S, Benzina M, Bouaziz S. VOC adsorption on raw and modified clay materials. *Chem Geol.* 2010;275(1-2):1-8. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2010.04.004.

32. Keramea P, Spanoudaki K, Zodiatis G, Gikas G, Sylaios G. Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. *J Mar Sci Eng*. 2021;9(2):181. DOI: 10.3390/jmse9020181.
33. King W, Dethier MN. Oil dispersant effectiveness and ecological consequences in San Juan County marine waters. *Encyclopedia of Puget Sound*. 2017. Available at: <https://www.eopugetsound.org/articles/oil-dispersant-effectiveness-and-ecological-consequences-san-juan-county-marine-waters>. Accessed 06 May 2026.
34. Kostecki P, Morrison R, Dragun J. Hydrocarbons. In: Hillel D, ed. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. London (UK): Academic Press; 2005. p. 217-26. DOI: 10.1016/b0-12-348530-4/00098-9.
35. Lagaly G, Ogawa M, Dekány I. Clay mineral-organic interactions. In: Bergaya F, Lagaly G, editors. *Developments in Clay Science*. Vol 5. Amsterdam (Netherlands): Elsevier; 2013. p. 435-505. DOI: 10.1016/b978-0-08-098258-8.00015-8.
36. Lee JF, Mortland MM, Boyd SA, Chiou CT. Shape-selective adsorption of aromatic molecules from water by tetramethylammonium-smectite. *J Chem Soc Faraday Trans 1*. 1989;85:2953-62. DOI: 10.1039/F19898502953.
36. Lee JF, Mortland MM, Chiou CT, Kile DE, Boyd SA. Adsorption of benzene, toluene, and xylene by two tetramethylammonium-smectites having different charge densities. *Clays Clay Minerals*. 1990;38(2):113-20. DOI: 10.1346/CCMN.1990.0380201.
38. Lin S-H, Juang R-S. Heavy metal removal from water by sorption using surfactant-modified montmorillonite. *J Haz Mat*. 2002;92(3):315-26. DOI: 10.1016/s0304-3894(02)00026-2.
39. Luan LY, Zhang L, Wang LH. Reuse of organobentonites with a carbon dioxide responsive solvent. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(22):21693-700. DOI: 10.1007/s11356-018-2288-4.
40. Lv Y, Bao J, Zhu L. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. *Energy Rep*. 2022;8:7976-88. DOI: 10.1016/j.egy.2022.06.034.
41. Maletic S, Dalmacija B, Roncevic S. Petroleum hydrocarbon biodegradability in soil-implications for bioremediation. In: Kutcherov V, Kolesnikov A, eds. *Hydrocarbon*. London (UK): IntechOpen; 2013. p. 43-64. doi: 10.5772/50108.
42. Mambwe M, Kalebaila KK, Johnson T. Remediation technologies for oil contaminated soil. *Global J Environ Sci Manag*. 2021;7(3):419-38. DOI: 10.22034/gjesm.2021.3.07.
43. Masooleh MS, Bazgir S, Tamizifar M, Nemati A. Adsorption of petroleum hydrocarbons on organoclay. *JACR*. 2010;4(14):19-23.
44. Moazed H, Viraraghavan T. Removal of oil from water by bentonite organoclay. *Pract Period Hazard Toxic Radioact Waste Manag*. 2005;9(2):130-4. DOI: 10.1061/(asce)1090-025x(2005)9:2(130).
45. Mota MF, Rodrigues MGF, Machado F. Oil-water separation process with organoclays: A comparative analysis. *Appl Clay Sci*. 2014;99:237-45. DOI: 10.1016/j.clay.2014.06.039.
46. Nafees M, Waseem A, Khan AR. Comparative study of laterite and bentonite based organoclays: Implications of hydrophobic compounds remediation from aqueous solutions. *Sci World J*. 2013;2013:681769. DOI: 10.1155/2013/681769.
47. Oraegbunam C, Okoye PI, Ngobiri NC. The performance of an organomodified natural bentonite in the adsorption of petroleum fractions. *J Environ Poll Control*. 2020;3(1):101.
48. Pandey S, Alam A. Peat moss: A hyper-sorbent for oil spill cleanup-a review. *Plant Sci Today*. 2019;6(4):416-9. DOI: 10.14719/pst.2019.6.4.586.
49. Perelomov L, Gersten M, Mandzhieva S, Sychev V, Dudnikova T, Khaidanov I, Perelomova I, Minkina T, Atroshchenko Y. Adsorption of antibiotics by natural clay minerals. *Minerals*. 2025;15(7):733. DOI: 10.3390/min15070733.
50. Perelomov L, Gertsen M, Burachevskaya M, Hemalatha S, Vijayalakshmi A, Perelomova I, Atroshchenko Y. Organoclays based on bentonite and various types of surfactants as heavy metal remediants. *Sustainability*. 2024;16(11):4804. DOI: 10.3390/su16114804.
51. Rajan H, Yusuf NR, Mohsim DF, Halim NHB. Chemical demulsification of oil-in-water emulsion from gas condensate field. *Substantia*. 2023;7(2):7-19. DOI: 10.36253/Substantia-2035.
52. Rawajfih Z, Nosur N. Characteristics of phenol and chlorinated phenols sorption onto surfactant-modified bentonite. *J Coll Interf Sci*. 2006;298(1):39-49. DOI: 10.1016/j.jcis.2005.11.063.
53. Sagbana PI, Sarkodie K, Nkrumah WA. A critical review of carbonate reservoir wettability modification during low salinity waterflooding. *Petroleum*. 2023;9(3):317-30. DOI: 10.1016/j.petlm.2022.01.006.
54. Sharma K, Shah G, Singhal K, Soni V. Comprehensive insights into the impact of oil pollution on the environment. *Region Stud Marine Sci*. 2024;74:103516. DOI: 10.1016/j.rsma.2024.103516.
55. Shobuke H, Matsumoto T, Hirosawa F, Miyagawa M, Takaba H. Estimation of adsorbed amounts in organoclay by machine learning. *ACS Omega*. 2023;8(1):1146-53. DOI: 10.1021/acsomega.2c06602.
56. Sirotkina EE, Novoselova LY. Materials for adsorption of water from oil and oil products. *Chem Sustain Dev*. 2005;13:359-75.

57. Speight JG. Organic chemistry. In: Speight JG, ed. Environmental organic chemistry for engineers. Oxford (UK): Butterworth-Heinemann; 2017. P. 43-86. DOI: 10.1016/B978-0-12-804492-6.00002-2.
58. Stage H. The physical refining process. J Am Oil Chem Soc. 1985;62:299-308. DOI: 10.1007/BF02541395.
59. Stoski A, Machado BR, Vilinskii BH, Carvalho LMG, Muniz EC, Almeida CAP. New methodology for modifying sodium montmorillonite using DMSO and ethyl alcohol. Materials. 2024;17(12):3029. DOI: 10.3390/ma17123029.
60. Ugochukwu UC, Fialips CI. Removal of crude oil polycyclic aromatic hydrocarbons via organoclay-microbe-oil interactions. Chemosphere. 2017;174:28-38. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.080.
61. Vasilyeva GK, Strijakova ER, Ortega-Calvo JJ. Remediation of soils polluted by oil industries. In: Ortega-Calvo JJ, Coulon F, eds. Soil Remediation Science and Technology. The Handbook of Environmental Chemistry. Cham (Switzerland): Springer, 2024. P. 191-234). DOI: 10.1007/978_2024_1080.
62. Vidal N, Volzone C. Influence of organobentonite structure on toluene adsorption from water solution. Mat Res. 2012;15(6):944-53. DOI: 10.1590/s1516-14392012005000126.
63. Yan K, Zhao F, Pan L, Jiang Y, Shi Y, Yu G. High-throughput clean-up of viscous oil spills enabled by a gel-coated mesh filter. Nat Sustain. 2023;6:1654-62. DOI: 10.1038/s41893-023-01217-2.
64. Yang L, Wang Z, Yang L, Li X, Zhang Y, Lu C. Coco peat powder as a source of magnetic sorbent for selective oil-water separation. Ind Crops Prod. 2017;101:1-10. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.02.040.
65. Yarza F, Morantes CF, Montes ML, Bellotti N, Salduondo J, Yapar S, Cravero F, Sanchez RMT. Quantification of the distribution of cetylpyridinium chloride on the external and internal surfaces of montmorillonite: Relevance in antifungal activity assessment. Mat Chem Phys. 2020;253:123390. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123390.
66. Zhu R, Chen Q, Zhou Q, Xi Y, Zhu J, He H. Adsorbents based on montmorillonite for contaminant removal from water: A review App Clay Sci. 2016;123:239-58. DOI: 10.1016/j.clay.2015.12.024.
67. Zhu R, Zhou Q, Zhu J, Xi Y, He H. Organo-clays as sorbents of hydrophobic organic contaminants: Sorptive characteristics and approaches to enhancing sorption capacity. Clays Clay Minerals. 2015;63:199-221. DOI: 10.1346/ccmn.2015.0630304.



РАЗРАБОТКА МИКРОБНОГО КОНСОРЦИУМА НА ОСНОВЕ PSEUDOMONAS И ACINETOBACTER ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЧВ

Н.В. Фотина*, Ю.Р. Серазетдинова, Е.Р. Фасхутдинова,
И.С. Милентьева, Л.К. Асякина, Е.А. Жидкова

¹Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

*Эл. почта: fotina.natashenka@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.05.2026; принята к печати 04.08.2026

Техногенно нарушенные грунты угольных отвалов характеризуются низкой биологической активностью, дефицитом питательных веществ и повышенным содержанием тяжёлых металлов, что затрудняет их естественное восстановление. В этих условиях перспективным направлением является применение ростостимулирующих бактерий, способствующих лучшей адаптации растений к неблагоприятным факторам грунтов угольных отвалов. Целью работы являлось выделение и характеристика бактерий из техногенных почв, а также разработка микробных консорциумов для повышения устойчивости растений и ускорения процессов биоремедиации. Из образца техногенно нарушенного грунта, отобранного на территории угольного отвала в Кемеровской области-Кузбассе, выделены 8 штаммов микроорганизмов. Штаммы существенно различались по способности продуцировать метаболиты, восстанавливающие 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (индикатор антиоксидантной активности), и фитогормоны индолил-3-уксусную и гибберелиновую кислоты. На основании многофакторного ранжирования этих показателей биологической активности отобраны пять наиболее эффективных штаммов. Анализ биосовместимости позволил выявить штаммы, пригодные для совместного культивирования. Ими по результатам видовой идентификации методом секвенирования переменных участков 16S-rPHK оказались *Pseudomonas donghuensis* штамм B-14444, *P. donghuensis* штамм B-14445, *Acinetobacter calcoaceticus* штамм B-14440. Оценка биологической активности сконструированных консорциумов показала, что наиболее перспективным является консорциум *P. donghuensis* B-14444, *P. donghuensis* B-14445 и *A. calcoaceticus* B-14440 в соотношении 1:1:2. Полученные результаты подтверждают перспективность использования новых выделенных штаммов и консорциумов на их основе для биоремедиации техногенно нарушенных почв и повышения устойчивости растений к стрессовым факторам.

Ключевые слова: биоремедиация, техногенные почвы, ростостимулирующие бактерии, микробные консорциумы, антиоксидантная активность, индолил-3-уксусная кислота, гибберелиновая кислота.

DEVELOPMENT OF A MICROBIAL CONSORTIUM BASED ON PSEUDOMONAS AND ACINETOBACTER FOR REMEDIATION OF MAN-MADE SOILS

N.V. Fotina*, Y.R. Serazetdinova, E.R. Faskhutdinova, I.S. Milentyeva, L.K. Asyakina,
E.A. Zhidkova

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

*Email: fotina.natashenka@mail.ru

Anthropogenically disturbed soils of coal dumps feature low biological activity, nutrient deficiency, and high heavy metals contents, which hamper their natural recovery. In these conditions, a promising approach is the use of growth-stimulating bacteria that promote plants adaptation to the adverse factors of coal dumps soils. The aim of the present work was to isolate and characterize bacteria from man-made soils, as well as to develop microbial consortia effective in increasing plant resistance and accelerating bioremediation processes. Eight strains of microorganisms were isolated from a sample of disturbed soil taken from a coal dump in the Kemerovo region (Kuzbass). The strains differed significantly in their ability to produce metabolites that reduce 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (an indicator of antioxidant activity) and the phytohormones indole-3-acetic acid and gibberellic acid. Based on a multifactorial ranking of these indicators of biological activity, five of the most effective strains were selected. Using sequencing of the variable 16S rRNA sites, these strains were identified as *Pseudomonas donghuensis* strain B-14444, *P. donghuensis* strain B-14445, and *Acinetobacter calcoaceticus* strain B-14440. Assessing the biological activity of the constructed consortia showed that the most promising is the consortium of *P. donghuensis* B-14444, *P. donghuensis* B-14445, and *A. calcoaceticus* B-14440 at a ratio of 1:1:2. The results confirm the promise of using the newly isolated strains and their consortia for bioremediation of anthropogenically disturbed soil and for improving plant resistance to stress.

Keywords: bioremediation, man-made soils, growth-stimulating bacteria, microbial consortia, antioxidant activity, indolyl-3-acetic acid, gibberellic acid.

Введение

Кемеровская область-Кузбасс, будучи одним из ведущих горнодобывающих центров России (свыше 150 действующих предприятий), характеризуется существенными изменениями структуры землепользования. Масштабная промышленная эксплуатация угольных месторождений сопряжена со значительным изъятием земель из природного цикла и созданием обширных техногенных ландшафтов, таких как карьеры, отвалы вскрышных пород [6]. Указанные антропогенные формы рельефа при отсутствии сформированного почвенно-растительного слоя оказывают негативное влияние на экологическое состояние окружающей среды [19, 32]. Физико-химические свойства техногенных грунтов угольных карьеров – низкая влагоемкость, дефицит биогенных элементов и слабая структурированность – препятствуют естественному возобновлению растительного покрова и снижают интенсивность процессов почвообразования [20]. Отсутствие сформированного растительного покрова выступает фактором интенсификации эрозионных процессов, нарушения гидрологического баланса и потери устойчивости склонов, что обуславливает прогрессирующую деградацию экосистем [22].

В структуре нарушенных ландшафтов особое значение имеют отвалы вскрышных пород и хвостохранилища. Занимая обширные территории, такие техногенные объекты оказывают системное негативное воздействие на биогеоценозы. Они характеризуются минимальной биологической активностью, неблагоприятными физико-химическими параметрами, что снижает интенсивность процессов спонтанной сукцессии и самовосстановления [23].

Эффективность восстановления техногенно измененных земель во многом определяется созданием качественного почвенного слоя, способного поддерживать минеральное питание флоры и обеспечивать стабильный режим влагозадержания. Таким образом, объективная оценка качества техногенных почв и понимание механизмов их формирования являются фундаментальными условиями для разработки программ рекультивации. Согласно современным исследованиям, для вовлечения подобных территорий в хозяйственный или природный оборот нужен комплексный подход, в структуре которого важное значение приобретают биологические методы, направленные на активизацию природных процессов восстановления [2].

В структуре биологической стадии рекультивации актуализируется применение биоремедиации – специализированной технологии восстановления почвенного покрова, основывающейся на применении микроорганизмов. Благодаря высокой метаболической пластичности, микроорганизмы способны использовать широкий спектр веществ в качестве источника энергии и углерода, адаптируясь к экстремальным

условиям техногенных ландшафтов [21]. В ходе ферментативных реакций микробные сообщества трансформируют токсичные соединения в безопасные продукты, такие как вода и углекислый газ, которые затем включаются в природные биогеохимические циклы [10].

Помимо детоксикации среды, микроорганизмы выполняют ряд ключевых экосистемных функций, необходимых для формирования почвы. Они участвуют в разложении органических остатков и синтезе гумусовых веществ, способствуют накоплению доступных форм азота, фосфора и других элементов питания, а также выделяют органические кислоты и полисахариды, улучшающие структуру техногенной почвы и ее влагоудерживающую способность [13]. Микроорганизмы играют важную роль в процессе биовыветривания горных пород, при котором микробные метаболиты ускоряют разрушение минеральной матрицы и высвобождение питательных элементов [12].

Особое значение имеет взаимодействие микроорганизмов с растениями. В ризосфере формируются сложные симбиотические системы, в которых микроорганизмы стимулируют рост растений, повышают их устойчивость к неблагоприятным условиям и способствуют успешной колонизации техногенных субстратов [26]. К таким микроорганизмам относятся ростостимулирующие бактерии, способствующие развитию растений, микоризные грибы и азотфиксирующие бактерии. Они способны синтезировать фитогормоны, повышать доступность элементов питания, защищать растения от стрессов и патогенов, что существенно увеличивает приживаемость растительности на отвалах [14].

Для практической реализации биоремедиации применяются как специально подобранные консорциумы микроорганизмов, так и аборигенная микрофлора, естественно сформированная в условиях техногенных субстратов. Последняя обладает существенным преимуществом, поскольку адаптирована к экстремальным условиям среды и способна эффективно функционировать без дополнительной акклиматизации [17]. Совместное взаимодействие различных групп микроорганизмов в составе консорциумов повышает устойчивость биосистем к неблагоприятным факторам и ускоряет восстановительные процессы [7].

Таким образом, для регионов с интенсивной горнодобывающей нагрузкой, к которым относится Кузбасс, применение микробных технологий рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений рекультивации. Микроорганизмы играют фундаментальную роль на начальных стадиях почвообразования: они способствуют накоплению органического вещества, улучшению структуры субстрата и формированию благоприятных условий для последующего развития растительного покрова.



Цель исследования – конструирование микробных консорциумов на основе аборигенных штаммов техногенно нарушенных грунтов Кузбасса для улучшения роста растений на биологическом этапе рекультивации.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись бактерии, выделенные из образцов техногенно нарушенного грунта, отобранного на территории угольного отвала в Кемеровской области-Кузбассе (рис. 1). Отбор осуществляли в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа».

Для выделения бактерий в стерильной ступке растирали 1 г отобранного образца и вносили в пробирку с 5 мл стерильной дистиллированной воды. Пробирку инкубировали в шейкере-инкубаторе LSI-3016R («Daihan Labtech», Южная Корея) в течение 1,5 ч при температуре 25–30 °С. Далее осуществляли посев 5 мл полученной суспензии в 50 мл мясопептонного бульона следующего состава, г/л: мясной экстракт («Pronadisa Conda», Испания) – 11,0; пептон («ЛенРеактив», Россия) – 10,0; натрий хлористый («ЛенРеактив», Россия) – 5,0. Культивирование проводили при температуре 25–30 °С в течение 18–24 ч. Из культуральной жидкости осуществляли пересев разведением 10^{-10} , 10^{-11} , 10^{-12} глубинным способом в чашки Петри на среду следующего состава, г/л: мясной экстракт – 11,0; пептон – 10,0; натрий хлористый – 5,0; мальтоза («HiMedia Laboratories», Индия)

– 5,0; аммоний сернокислый («ЛенРеактив», Россия) – 3,0; натрий лимоннокислый («ЛенРеактив», Россия) – 3,0; магний сернокислый («ChemExpress», Россия) – 0,5; калий фосфорнокислый однозамещенный («ChemExpress», Россия) – 0,4; кальций хлористый («Компонент реактив», Россия) – 0,2; марганец сернокислый («Химлабприбор», Россия) – 0,1; железо II сернокислое («ChemExpress», Россия) – 0,01; цинк сернокислый («ЛенРеактив», Россия) – 0,005; медь сернокислая («ЛенРеактив», Россия) – 0,001; агар-агар («ЛенРеактив», Россия) – 20,0 [3]. Культивировали при 28–30 °С в течение 18–24 ч. Затем для получения чистых культур осуществляли серию пересевов методом истощающего штриха на среду мясопептонный агар следующего состава, г/л: мясной экстракт – 11,0; пептон – 10,0; натрий хлористый – 5,0; агар-агар – 15.

Определение способности штаммов продуцировать метаболиты, восстанавливающие 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (далее DPPH). Для этого готовили суспензию исследуемой чистой культуры в 3 мл стерильного физиологического раствора до коэффициента мутности по МакФарланду, равного 0,8–1,0 (титр микроорганизмов $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл), определяемого с помощью денситометра Densichek plus (Sendle, Россия). Далее 1 мл полученной суспензии вносили в 10 мл мясопептонного бульона с добавлением 0,3 г/л L-триптофана («Химмед», Россия). Культивировали на шейкере-инкубаторе в течение 48 ч при температуре 25–30 °С и 110 об/мин. Отделяли культуральную жидкость от клеток с помощью центрифугирования при 8000 об/мин в течение 10 мин. Далее бесклеточную культуральную жидкость и реактив DPPH (кон-



Рис. 1. Территория угольного отвала для отбора образцов грунта (Кемеровская область)

центрация DPPH в 0,079 г/л в 96 % этаноле) смешивали в соотношении 1:3 и оставляли на 30 минут в темном месте. Оптическую плотность определяли при длине волны 517 нм на спектрофотометре UV 1800 («Shimadzu», Япония). В качестве контроля использовали культуральную жидкость с 95% спиртом (K_1), питательную среду с реактивом DPPH (K_2) и питательную среду с 95% спиртом (K_3) в соотношении 1:3 [9]. Степень восстановления DPPH рассчитывали по формуле 1.

$$X = 1 - \frac{(ОП_{об} - ОП_{K1})}{(ОП_{K2} - ОП_{K3})} \times 100 \quad (1)$$

где: X – степень восстановления DPPH, %; ОП_{об} – оптическая плотность образца; ОП_{K1} – оптическая плотность K_1 ; ОП_{K2} – оптическая плотность K_2 ; ОП_{K3} – оптическая плотность K_3 ; 100 % – пересчет на проценты.

Для определения количества синтезируемой индолил-3-уксусной кислоты готовили бесклеточную культуральную жидкость чистой культуры по методике, указанной в анализе антиоксидантной активности. К 1 мл бесклеточной культуральной жидкости добавляли 1 мл реактива Сальковского. Спустя 30 мин измеряли оптическую плотность полученного раствора на спектрофотометре при длине волны 535 нм. Количество синтезируемой индолил-3-уксусной кислоты определяли по калибровочному графику стандартного раствора индолил-3-уксусной кислоты («Диа-М», Россия) в пределах от 50 до 200 мкг/мл [11].

Для определения количества синтезируемой гиббереллиновой кислоты к 2 мл бесклеточной культуральной жидкости, полученной по методике в анализе антиоксидантной активности, добавляли по 280 мкл 1 М ацетата цинка («ЛенРеактив», Россия) и 10,6% раствора ферроцианида III калия («ЛенРеактив», Россия), энергично встряхивали. Затем центрифугировали в течение 10 мин при 4500 об/мин. Получившийся супернатант смешивали с 30% соляной кислотой в соотношении 1:1 и выдерживали 75 минут. Оптическую плотность измеряли по отношению к 5% соляной кислоте на спектрофотометре при длине волны 254 нм [4].

Для оценки показателей биологической активности выделенных штаммов микроорганизмов осуществляли их ранжирование (табл. 1).

Для изучения биосовместимости чистые культуры выращивали на мясопептонном бульоне при температуре 28–30 °С в течение 48 ч. После культивирования культуральную жидкость центрифугировали в течение 10 мин. при 8000 об/мин. На мясопептонный бульон в чашках Петри наносили тест-культуру, в лунки диаметром 4 мм вносили супернатант и культивировали при температуре 25–30 °С в течение 24 ч. В данном исследовании каждый штамм изучался и в качестве тест-культуры, и в качестве вносимого в лунки супернатанта. Штаммы считались биосовместимыми при отсутствии зоны ингибирования роста тест-культуры вокруг лунки [1].

Молекулярно-генетическая идентификация отобранных бактериальных штаммов выполнена сотрудниками Национального биоресурсного центра – Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (НБЦ ВКПМ) на договорной основе в рамках оказания платных услуг. Идентификация проводилась на основании анализа нуклеотидных последовательностей фрагмента гена, кодирующего 16S рРНК. Исследуемые культуры предварительно рассеивали до получения изолированных колоний, после чего накапливали биомассу и выделяли геномную ДНК. Фрагмент гена 16S рРНК амплифицировали методом полимеразной цепной реакции с использованием универсальных праймеров 8f (5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3') и 926r (5'-CCG TCA ATT CCT TTR AGT TT-3'). Амплификацию осуществляли в следующем температурно-временном режиме: начальная денатурация при 95 °С в течение 3 мин; 35 циклов, включавших денатурацию при 95 °С – 30 с, отжиг праймеров при 57 °С – 30 с и элонгацию при 72 °С – 1,5 мин; заключительная элонгация при 72 °С – 5 мин. Наличие и размер полученных ампликонов контролировали методом электрофореза в 1% агарозном геле при напряженности электрического поля 5 В/см. Полученные ампликоны секвенировали на автоматическом секвенаторе AE3000. Первичную таксономическую идентификацию штаммов проводили путем сопоставления полученных нуклеотидных последовательностей с последовательностями, представленными в базе данных GenBank, с использованием алгоритма

Табл. 1

Ранжирование сравнительных показателей биологической активности микроорганизмов

Факторы	Последовательность рангов				
	5	4	3	2	1
Степень восстановления DPPH, %	80,0–70,1	70,0–60,1	60,0–50,1	50,1–25,1	25,0–0
ИУК, мкг/мл	200,0–180,0	179,9–130,0	129,9–90,0	89,9–55,0	54,9–0
ГК, мкг/мл	800,0–600,0	599,9–450,0	449,9–350,0	349,9–250,0	249,9–0

BLAST. Штамм относили к соответствующему виду при уровне идентичности последовательностей не менее 97% [5].

Для получения консорциумов готовили суспензии чистых культур на мясопептонном бульоне с использованием денситометра Densichek plus (Sendle, Россия) до коэффициента мутности 0,8–1,0 по МакФарланду (титр микроорганизмов $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл). Культивировали при температуре 28 ± 2 °С в течение 48 ч и 110 об/мин. Затем в пробирки со средой мясопептонный бульон вносили 5% от объема питательной среды суспензий микроорганизмов, входящих в консорциум (количество вносимой суспензии микроорганизмов зависит от количества и соотношения штаммов в консорциуме) [1].

Антиоксидантную активность, количество синтезируемых индолил-3-уксусной и гиббереллиновой кислот в консорциумах определяли по методикам, описанным выше.

Статистическая обработка данных. Все эксперименты проводили в трехкратной повторности. Полученные значения выражали как среднее трех измерений со стандартным отклонением. Использовали Microsoft Office Excel 2007. Применяли дисперсионный анализ с апостериорным критерием Шеффе.

Результаты и обсуждение

Из образцов техногенно нарушенного грунта выделено восемь бактериальных штаммов. С целью отбора наиболее перспективных культур проведена сравнительная оценка их способности продуцировать метаболиты, восстанавливающие DPPH, и фитогормоны. Результаты, а также ранжирование показателей представлены в табл. 2.

Сравнительно высокая способность продуцировать метаболиты, восстанавливающие DPPH, отмечена у 5 исследуемых штаммов: № 8, 2, 7, 5, 3. Данный по-

казатель позволяет сравнивать штаммы по способности продуцировать потенциально антиоксидантные соединения, однако не является прямым доказательством нейтрализации ими активных форм кислорода или защиты растений от окислительного стресса. Вместе с тем продуцирование таких метаболитов может иметь значение для адаптации растений к техногенной нагрузке и требует дальнейшего изучения. Токсическое действие тяжёлых металлов в почвах угольных отвалов имеет комплексный характер и реализуется посредством различных механизмов, одним из которых является усиленное образование активных форм кислорода в растительных клетках [13]. Воздействие свинца, кобальта, цинка и кадмия также может приводить к нарушению синтеза ДНК и белков, ингибированию активности ферментов, дисбалансу минерального питания, изменению морфологии растений и развитию хлороза [31, 33].

Микроорганизмы, продуцирующие метаболиты, способные восстанавливать DPPH, а значит и нейтрализовать АФК, могут повышать приживаемость растений на угольных отвалах. Так, в работе М. Neshat и соавт. [27] показано, что активные формы кислорода вызывают накопление пероксида водорода в клетках растений. Инокуляция штаммами *Enterobacter* sp. S16-3 и *Pseudomonas* sp. C16-20 приводила к снижению уровня перекисного окисления липидов мембран.

В исследовании J. Mesa-Marín и соавт. [25] инокуляция *Spartina maritima* консорциумом ростостимулирующих бактерий привела к снижению активности антиоксидантных ферментов и интенсивности корневого дыхания *in vivo*. Исследователи предположили, что наблюдаемые изменения могут быть связаны со снижением затрат углерода на дыхание и ослаблением стрессовой нагрузки на растения. По мнению авторов, улучшение углеродного баланса способствовало увеличению корневой биомассы и аккумуляции тяжёлых металлов.

Табл. 2

Результаты оценки биологической активности и ранжирования выделенных штаммов

№ штамма	Степень восстановления DPPH		Индолил-3-уксусная кислота		Гиббереллиновая кислота		Среднее значение ранга
	%	Ранг	мкг/мл	Ранг	мкг/мл	Ранг	
№ 1	53,5 ^a ±1,6	3	61,5 ^a ±3,2	1	518,3 ^{a6} ±20,1	4	2,7
№ 2	76,7 ^b ±2,2	5	153,1 ^b ±6,6	4	459,2 ^a ±18,0	4	4,3
№ 3	64,0 ^a ±2,4	4	110,9 ^a ±5,0	3	485,5 ^{a6} ±19,4	4	3,7
№ 4	54,7 ^a ±1,8	3	134,5 ^b ±5,3	4	648,0 ^b ±25,9	5	4,0
№ 5	67,4 ^a ±2,6	4	58,7 ^a ±2,3	2	38,5 ^a ±1,5	1	2,3
№ 6	24,4 ^a ±1,1	1	52,3 ^a ±1,9	1	31,0 ^a ±1,2	1	1,0
№ 7	75,6 ^b ±2,5	5	192,3 ^a ±7,6	5	532,5 ^b ±21,3	4	4,7
№ 8	78,0 ^b ±2,9	5	178,6 ^a ±7,1	4	784,4 ^a ±31,3	5	4,7

Примечание: Различия в буквенных индексах, расположенных справа от значений, показывают достоверность различий между штаммами (в пределах одного исследуемого параметра), рассчитанную методом дисперсионного анализа с апостериорным критерием Шеффе. При отсутствии достоверных различий буквенный индекс одинаков.

В этом контексте штаммы, выделенные в рамках настоящего исследования, демонстрируют потенциал для применения в технологиях фиторемедиации и биорекультивации техногенно нарушенных территорий, благодаря антиоксидантной активности.

Одним из способов взаимодействия бактерий с растениями является продуцирование фитогормона, в частности, индолил-3-уксусной кислоты (ИУК). Наибольшей активностью в этом отношении обладали штаммы № 7, 8, 2.

Полученные данные согласуются с результатами исследования М. Kuffner и соавт. [18], где показано, что изоляты из ризосферы ивы, относящиеся к родам *Pseudomonas*, *Janthinobacterium*, *Serratia*, *Flavobacterium*, *Streptomyces* и *Agromyces*, способны синтезировать ИУК. Изоляты, выделенные из *Salix caprea* L., также повышали накопление цинка и кадмия в растительных тканях. Аналогично, штаммы *Rhizobium* sp., выделенные М. Pešić и др. [28], продуцировали индолил-3-уксусную кислоту, стимулируя рост *Trifolium pratense* L., увеличивая сухую массу побегов и содержание азота, а также способствуя большому накоплению никеля в корнях.

В исследованиях Q. Song и соавт. [30] установлено, что инокуляция *Pinus sylvestris* var. *mongolica* L. штаммами *P. mandelii*, *Serratia plymuthica* и *P. koreensis*, продуцирующими индолил-3-уксусную кислоту, приводило к увеличению роста саженцев.

Гиббереллиновая кислота также является фитогормоном, контролирующим важные аспекты роста растений, такие как прорастание семян, рост в длину и цветение [29]. В настоящем исследовании наибольшая способность продуцировать гиббереллиновую кислоту отмечено у штаммов № 8, 4, 7, 1.

Таким образом, выделенные штаммы представляют интерес в качестве перспективных кандидатов для разработки микробных биопрепаратов, обеспечивая комплексный эффект за счет синтеза фитогормонов и высокой антиоксидантной активности.

Интегральная оценка, основанная на среднем значении рангов, позволила провести сравнительный анализ общей биологической активности штаммов. По результатам ранжирования показателей биологической активности для дальнейших исследований отобрали 5 перспективных штаммов микроорганизмов, для которых средний балл оказался в диапазоне от 3,7 до 4,7: № 7 (4,7), № 8 (4,7), № 2 (4,3), № 4 (4,0), № 3 (3,7).

Антагонистические взаимодействия между микроорганизмами, проявляющиеся в подавлении роста и/или метаболической активности других штаммов, ограничивают разработку комбинированных микробных препаратов и могут снижать их практическую эффективность. В связи с этим при формировании консорциумов была проведена оценка биосовместимости указанных штаммов (табл. 3).

Изучение биосовместимости штаммов позволяет конструировать консорциумы таким образом, чтобы входящие в их состав изоляты не оказывали взаимного отрицательного влияния. По результатам испытаний биосовместимости для дальнейшего составления консорциумов отобраны три штамма (№ 2, 4 и 7).

Молекулярно-генетическая идентификация показала, что штамм № 2 представляет собой *P. donghuensis*, в коллекции присвоен номер B-14444, штамм № 4 – *P. donghuensis* (номер B-14445), штамм № 7 – *Acinetobacter calcoaceticus* (номер B-14440).

Табл. 3

Биосовместимость штаммов микроорганизмов с наибольшими средними баллами биологической активности

№ штамма	№ 2	№ 3	№ 4	№ 7	№ 8
№ 2		–	+	+	–
№ 3	–		–	–	+
№ 4	+	+		+	–
№ 7	+	–	+		–
№ 8	–	–	–	–	

Примечание: «+» – отсутствие взаимного ингибирования роста исследуемых штаммов (штаммы биосовместимы), а знак «–» – наличие ингибирования роста одного из штаммов (отсутствие биосовместимости).

Табл. 4

Составы бактериальных консорциумов

Штамм	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
<i>Pseudomonas donghuensis</i> B-14444	1	2	1	1	3	1	1
<i>Pseudomonas donghuensis</i> B-14445	1	1	2	1	1	3	1
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> B-14440	1	1	1	2	1	1	3

На основе биологически совместимых штаммов были сформированы 7 микробных консорциумов. Микробный консорциум, как правило, обладает более выраженным ростостимулирующим эффектом по сравнению с отдельными микроорганизмами [8]. Как отмечают Х. Liu и др. [24], отдельные штаммы часто имеют ограничения по функциям, тогда как в консорциуме разнообразие и функциональная complemen-

тарность участвующих микроорганизмов формирует более устойчивый эффект инокуляции, а также нивелирует недостатки монокультур. Соотношение штаммов в сконструированных микробных консорциумах представлено в табл. 4.

Далее консорциумы исследовали по показателям биологической активности (антиоксидантная активность, способность продуцировать восстановите-

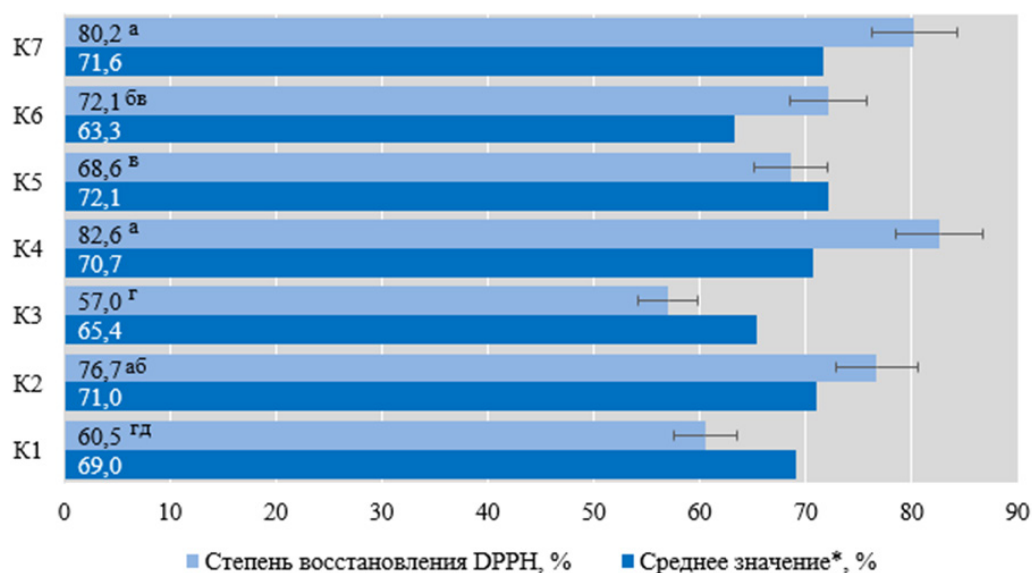


Рис. 2. Способность консорциумов синтезировать восстановители DPPH

Примечание: * – средняя оценка активности по микроорганизмам, входящим в консорциум.

Различия в буквенных индексах, расположенных справа от значений, показывают достоверность различий между растениями (в пределах одного исследуемого параметра), рассчитанную методом дисперсионного анализа с апостериорным критерием Шеффе. При отсутствии достоверных различий буквенный индекс одинаков.

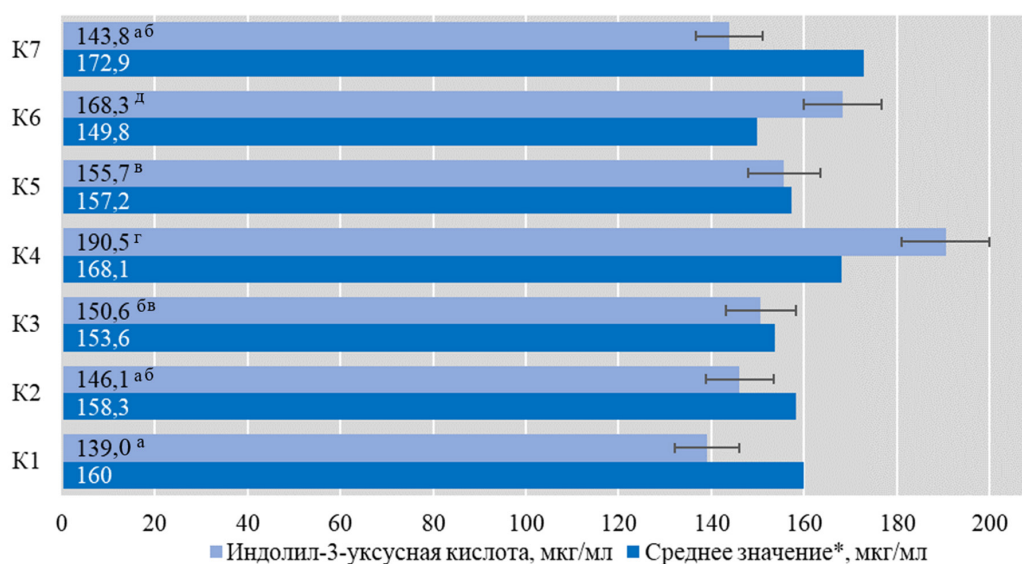


Рис. 3. Продуцирование индоллил-3-уксусной кислоты консорциумом

Примечание: см. рис. 2.

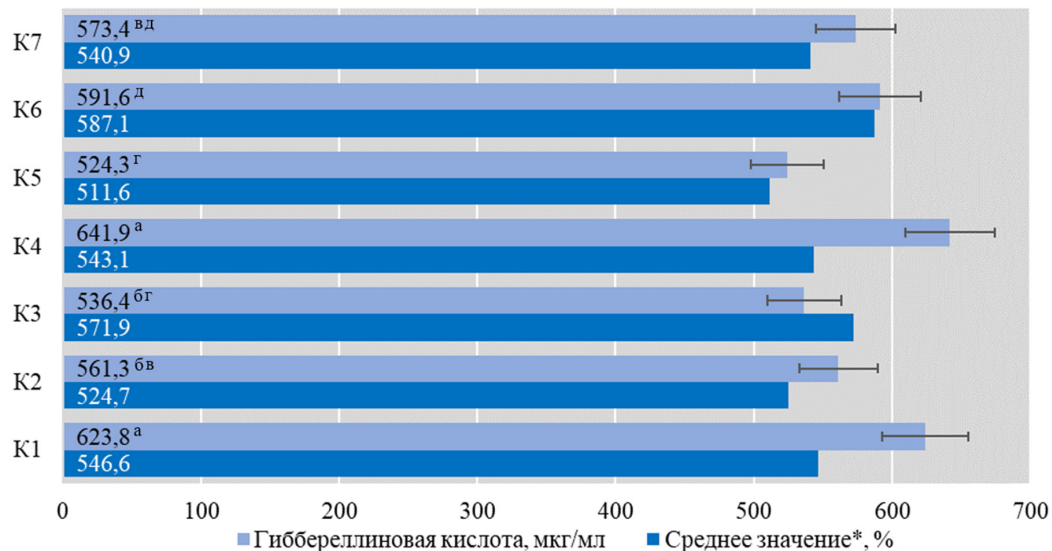


Рис. 4. Производство гиббереллиновой кислоты консорциума
Примечание: см. рис. 2.

ли DPPH и индолил-3-уксусную и гиббереллиновую кислоты). Для сравнительной оценки эффективности учтены средние значения показателей биологической активности штаммов, входящих в консорциумы, в соответствии с соотношением бактерий. Результаты приведены на рис. 2–4.

Установлено, что наибольшей способностью продуцировать метаболиты, восстанавливающие DPPH, обладали три консорциума микроорганизмов: K4, K7 и K2. Степень восстановления DPPH у данных консорциумов выше, чем усредненные показатели у отдельных микроорганизмов, входящих в их состав. При этом наибольшая разница отмечена для K4 (больше на 11,9%).

Консорциумы K4 и K6 синтезировали большее количество индолил-3-уксусной кислоты как в сравнении с другими исследуемыми консорциумами, так и в сравнении со средним содержанием в культуральной жидкости отдельных микроорганизмов, входящих в их состав. Наибольшую разницу между количеством индолил-3-уксусной кислоты в консорциуме и средним содержанием в культуральной жидкости отдельно взятых микроорганизмов, входящих в их состав, показал консорциум K4 (больше на 22,4 мкг/мл).

Консорциумы K1 и K4 синтезировали большое количество гиббереллиновой кислоты в сравнении с другими консорциумами и усредненными показателями отдельных микроорганизмов, входящих в их состав. Наибольшую разницу между количеством синтезируемой гиббереллиновой кислоты и средним показателем отдельно взятых микроорганизмов, входящих в состав консорциума, показал консорциум K4 (больше на 98,8 мкг/мл).

Таким образом, наибольшей биологической эффективностью обладал консорциум K4, включающий штаммы *P. donghuensis* B-14444, *P. donghuensis* B-14445 и *A. calcoaceticus* B-14440 в соотношении 1:1:2, что свидетельствует о синергетическом эффекте взаимодействия микроорганизмов. Более высокая эффективность бактериальных консорциумов по сравнению с монокультурами может быть обусловлена комплементарностью метаболических функций микроорганизмов и снижением конкуренции за ресурсы [16].

Заключение

В работе представлены результаты выделения и определения биологических характеристик микроорганизмов, полученных из техногенно нарушенных грунтов угольных разрезов Кузбасса. Определены штаммы, обладающие наибольшей способностью, в сравнении с другими, продуцировать восстановители DPPH и фитогормоны.

Для разработки консорциумов изучена биосовместимость наиболее биологически активных штаммов микроорганизмов, по результатам чего отобраны 3 штамма микроорганизмов, в последствии идентифицированных как *P. donghuensis* штамм B-14444, *P. donghuensis* B-14445 и *A. calcoaceticus* B-14440.

Показано, что формирование микробных консорциумов приводит к усилению биологической активности по сравнению с монокультурами, что может быть обусловлено синергетическим взаимодействием микроорганизмов и комплементарностью их метаболических функций. В составе консорциумов отмечено увеличение синтеза фитогормонов и антиоксидантной

активности. Наиболее перспективным признан консорциум К4, включающий *P. donghuensis* В-14444, *P. donghuensis* В-14445 и *A. calcoaceticus* В-14440 в соотношении 1:1:2, у которого найдены наибольшие, в сравнении с другими сочетаниями, антиоксидантная активность и синтез фитогормонов.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования идентифицированных штаммов и консорциумов на их основе для биоремедиации техногенно нарушенных почв, а также для повышения устойчивости растений к абиотическим стрессам. На следующих этапах исследования планируется осуществить комплексную оценку (всхожесть, развитие корневой и надземной части, накопление биомассы) ростостимулирующих свойств консорциумов на модельных растениях-рекультивантах.

Благодарность: Работа ведется в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р, комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» («Чистый уголь – зеленый Кузбасс»), мероприятие 3.1 «Экополигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1200 от 28.09.2022 г.).

ЛИТЕРАТУРА

Список русскоязычной литературы

1. Асякина ЛК, Бородин ЕЕ, Фотина НВ, Неверова ОА, Милентьева ИС. *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium* и *Pseudomonas putida* в восстановлении техногенно нарушенных территорий Кузбасса. Поволжский экологический журнал. 2024;(4):385-98. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-4-385-398>.
2. Асякина ЛК, Дышлюк ЛС, Просеков АЮ. Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов. Техника и технология пищевых производств. 2021;51(4):805-18. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818>.
3. Асякина ЛК, Фотина НВ, Безъязыкова МВ, Милентьева ИС, Федорова АМ, Позднякова АВ, Просеков АЮ. Пат. 2819915 «Способ выделения бактерий из грунта угольных отвалов для биологической рекультивации», 28.05.2024. Заяв. 2023125626, опубл. 06.10.2023.
4. Бородин ЕЕ, Гордиенко АВ, Плешивцев ИИ, Фотина НВ, Федорова АМ, Мартиросян ВВ. Биологический потенциал бактериального штамма рода *Pantoea* в защите от биотического стресса и стимуляции роста зерновых культур. Техника и технология пищевых производств. 2025;55(4):710-22. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606>.
5. Дышлюк ЛС, Агафонова СВ, Казимирченко ОВ. Молекулярно-генетическая идентификация изолятов бактерий – продуцентов ксиланаз. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2024;(4)123-34. <https://doi.org/10.5922/vestniknat-2024-4-9>.
6. Осинцева МА, Бузова НВ. Использование плодородного слоя почвы для рекультивации. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2024;(1):17-25.
7. Фасхутдинова ЕР, Осинцева МА, Неверова ОА. Перспективы использования микробиома почв угольных отвалов с целью ремедиации антропогенно нарушенных экосистем. Техника и технология пищевых производств. 2021;51(4):883-904. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-883-904>.

Общий список литературы/References

1. Asyakina LK, Borodina EE, Fotina NV, Neverova OA, Milentyeva IS. [*Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium* and *Pseudomonas putida* in the restoration of anthropogenically disturbed territories of the Kuzbass]. Povolzhskiy Ekologicheskii Zhurnal. 2024;(4):385-98. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-4-385-398>. (In Russ.).
2. Asyakina LK, Dyshlyuk LS, Prosekov AYU. [Reclamation of post-technological landscapes: International experience]. Food processing: techniques and technology. 2021;51(4):805-18. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818>. (In Russ.).
3. Asyakina LK, Fotina NV, Bezzyazkova MV, Milentyeva IS, Fedorova AM, Pozdnyakova AV, Prosekov AYU. [Pat. 2819915 «A method for isolating bacteria from coal waste soil for biological reclamation», 28.05.2024]. Applic. 2023125626, publ. 06.10.2023. (In Russ.).
4. Borodina EE, Gordienko AV, Pleshivtsev II, Fotina NV, Fedorova AM, Martirosyan VV. [New *Pantoea* strain as antistress agent and growth stimula-

- tor in grain growing]. Food processing: techniques and technology. 2025;55(4):710-22. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606>. (In Russ.).
5. Dyshlyuk LS, Agafonova SV, Kazimirchenko OV. [Molecular genetic identification of bacterial isolates – xylanase producers]. Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences. 2024;(4)123-34. <https://doi.org/10.5922/vestniknat-2024-4-9>. (In Russ.).
 6. Osintseva MA, Burova NV. [Fertile soil layer use for reclamation]. Bulliten KrasSAU. 2024;(1):18-25. (In Russ.).
 7. Faskhutdinova ER, Osintseva MA, Neverova OA. [Prospects of using soil microbiome of mine tips for remediation of anthropogenically disturbed ecosystems]. Food processing: techniques and technology. 2021;51(4):883-904. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-883-904>. (In Russ.).
 8. Abou Jaoudé R, Luziatelli F, Ficca AG, Ruzzi M. Effect of plant growth-promoting rhizobacteria synthetic consortium on growth, yield, and metabolic profile of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown under suboptimal nutrient regime. Horticulturae. 2025;11(1):64. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010064>.
 9. Ashry NM, Alaidaroos BA, Mohamed SA, Badr OAM, El-Saadony MT, Esmael A. Utilization of drought-tolerant bacterial strains isolated from harsh soils as a plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). Saudi J Biol Sci. 2022;29(3):1760-9. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.054>.
 10. Ayilara MS, Babalola OO. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. Front Agronomy. 2023;5:1183691. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>.
 11. Chaiharn M, Lumyong S. Screening and optimization of indole-3-acetic acid production and phosphate solubilization from rhizobacteria aimed at improving plant growth. Curr Microbiol. 2011;62:173-81. <https://doi.org/10.1007/s00284-010-9674-6>.
 12. Chen J, Li F, Zhao X, Wang Y, Zhang L, Yan L, Yu L. Change in composition and potential functional genes of microbial communities on carbonatite rinds with different weathering times. Front Microbiol. 2022;13:1024672. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1024672>.
 13. Das D, Riamei M, Paul P, Singh N, Ingti B, Sarkar RD, Rose R, Sharma PL, Paul S. Understanding the role of soil microorganisms in alleviating hydric and edaphic stress towards sustainable agriculture. Discover Soil. 2025;2(1):47. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00076-x>.
 14. Gupta R, Khan F, Alqahtani FM, Hashem M, Ahmad F. Plant growth–promoting rhizobacteria (PGPR) assisted bioremediation of heavy metal toxicity. App Biochem Biotechnol. 2024;196(5):2928-56. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04545-3>.
 15. Hassan MK, McNroy JA, Kloepper JW. The interactions of rhizodeposits with plant growth-promoting rhizobacteria in the rhizosphere: a review. Agriculture. 2019;9:142. <https://doi.org/10.3390/agriculture9070142>.
 16. Joshi N, Raval B, Jha CK. The art of amalgamation: advancing crop productivity with PGPR consortia solutions. Curr Agricult Res J. 2025;13(1). <https://doi.org/10.12944/CARJ.13.1.02>.
 17. Kekana IKJ, Kgopa PM, Munjonji L. Bioremediation of non-essential toxic elements using indigenous microbes in soil following irrigation with treated wastewater. App Sci. 2025;15:2299. <https://doi.org/10.3390/app15052299>.
 18. Kuffner M, Puschenreiter M, Wieshammer G, Gorfer M, Sessitsc A. Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows. Plant Soil. 2008;304(1):35-44. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9517-9>.
 19. Kuznetsova IV, Timofeeva SS. Green technologies in land recultivation for coal mining enterprises. IOP Conf. Ser.: Earth. Environ. Sci. 2020;408:012075. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012075>.
 20. Li D, Yin N, Xu R, Wang L, Zhang Z, Li K. Sludge amendment accelerating reclamation process of reconstructed mining substrates. Sci. Rep. 2021;11:2905. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81703-9>.
 21. Li H, Cui X, Sun Y, Zheng P, Wang L, Shi X. Advances in microbial remediation of heavy metal-contaminated soils: mechanisms, synergistic technologies, field applications and future perspectives. Toxics. 2025;13:1069. <https://doi.org/10.3390/toxics13121069>.
 22. Li Y, Zhao H, Liu J, Chaonan C, Yuxuan G. A framework for selecting and assessing soil quality indicators for sustainable soil management in waste dumps. Sci Rep. 2024;14(1):8491. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58930-x>.
 23. Lim B-S, Kim A-R, Seol J, Oh W-S, An J-H, Lim C-H, Lee C-S. Effects of soil amelioration and vegetation introduction on the restoration of abandoned coal mine spoils in South Korea. Forests. 2022;13:483. <https://doi.org/10.3390/f13030483>.
 24. Liu X, Mei S, Salles JF. Inoculated microbial consortia perform better than single strains in living soil: A meta-analysis. App Soil

- _____



ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕКОРНЕВОЙ ПОДКОРМКИ ГОРОХА ПОСЕВНОГО (*PISUM SATIVUM*) ЦИНКОМ В ВИДЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА НА УСТОЙЧИВОСТЬ К СТРЕССУ, ВЫЗВАННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ПОЧВЫ СВИНЦОМ

О.В. Ракова, А.М. Угаев, С.С. Дёмин, Д.Ю. Липухина,
Е.А. Петрова, Т.Г. Крупнова

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Эл. почта: rakovaov@susu.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2026; принята к печати 21.08.2026

Загрязнение почвы тяжелыми металлами, в частности свинцом (Pb), является серьезным экологическим стрессором, снижающим продуктивность сельскохозяйственных культур. Горох посевной (*Pisum sativum*) чувствителен к техногенному загрязнению, что требует поиска эффективных и экологически безопасных методов повышения его толерантности. Данное исследование направлено на оценку защитного действия внекорневой обработки наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) со средним размером 80 нм, в сравнении с раствором сульфата цинка, на морфологические, фотосинтетические и биохимические параметры гороха в условиях почвенного загрязнения свинцом (50 и 100 мг/кг). Проведён вегетационный эксперимент с моделированием свинцового умеренного и сильного стресса с внесением 50 и 100 мг Pb на кг почвы соответственно. Оценивались высота побегов, длина корней, масса побегов и корней, содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, накопление H_2O_2 и цинка в стручках гороха. Методом сканирующей электронной микроскопии изучено проникновение наночастиц через устьица. Установлено, что ZnO НЧ по защитному действию во всех сценариях превосходит сульфат цинка. Обработка препаратом ZnO НЧ привела к увеличению высоты побегов, длины корней, массы побегов и корней, общее содержание фотосинтетических пигментов достоверно увеличивалось. Подтверждено, что внекорневая обработка препаратом ZnO НЧ эффективнее снижает накопление H_2O_2 и увеличивает содержание цинка в стручках и, таким образом, может быть эффективным агроприёмом, повышающим устойчивость гороха посевного к свинцовому стрессу. Данный метод можно рекомендовать для использования на техногенно загрязнённых почвах.

Ключевые слова: экологический стресс, загрязнение свинцом, внекорневая подкормка, цинк, посевной горох

LABORATORY STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE FOLIA FEEDING OF GARDEN PEAS (*PISUM SATIVUM*) WITH ZINC APPLIED AS ZINC OXIDE NANOPARTICLES ON RESIS- TANCE TO STRESS CAUSED BY SOIL CONTAMINATION WITH LEAD

O.V. Rakova, A.M. Ugaev, S.S. Domin, D.Y. Lipukhina, E.A. Petrova, T.G. Krupnova

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Email: rakovaov@susu.ru

Soil contamination with heavy metals, particularly lead (Pb), is a serious environmental stress, which reduces crop productivity. Garden peas (*Pisum sativum*) sensitivity to anthropogenic pollution necessitates searching for effective and environmentally friendly means for increasing its tolerance. The present study aims to assess the protective effect of 80 nm nanoparticles of zinc oxide (ZnO NP) applied to leaves, compared to zinc sulphate solution, on the morphological, photosynthetic and biochemical parameters of pea in conditions of soil contamination with lead (50 and 100 mg/kg). Moderate and severe lead stresses were induced by adding 50 and 100 mg Pb per kg of soil respectively. Shoot height, root length, shoot and root masses, chlorophylls *a* and *b* and carotenoids contents, H_2O_2 accumulation, and zinc content in pea pods were assessed. Nanoparticles penetration through folia stomata was visualized using scanning electron microscopy. The protective effect of ZnO NP is found to be superior to that of zinc sulfate in all experimental scenarios. Treatment with ZnO NP resulted in increases in shoot height, root length, shoot and root masses, and photosynthetic pigments contents. It has been confirmed that treatment with ZnO NP is effective in reducing of H_2O_2 accumulation and increasing of zinc content in pods, and thus may be a potent agricultural means for increasing pea resistance to lead stress. This method may be recommended for use on contaminated soils.

Keywords: environmental stress, pollution with lead, folia feeding, zinc, garden peas

Введение

В современных условиях сельское хозяйство сталкивается с серьёзными вызовами, связанными с ухудшением экологической обстановки и изменением климата. Растения постоянно подвергаются воздействию различных абиотических стрессоров, среди которых особое место занимают тяжёлые металлы. Почва выступает ключевым элементом в распространении тяжёлых металлов, аккумулируя их и способствуя попаданию в биоту вследствие высоких коэффициентов аккумуляции. Накопление свинца в сельскохозяйственных почвах представляет особую опасность. Этот металл легко поглощается растениями. Даже незначительные концентрации Pb вызывают серьёзные нарушения. К ним относятся окислительное повреждение тканей, нарушение метаболизма, снижение фотосинтетической активности и подавление роста растений [12]. Кроме того, свинец является токсикантом. Он способен накапливаться в съедобных частях сельскохозяйственных культур. В условиях растущего населения Земли к 2050 году потребуется увеличить производство продовольствия на 60–110 % [15]. Это делает проблему устойчивости сельскохозяйственных растений к стрессовым факторам высоко актуальной.

Известно, что цинк повышает устойчивость растений к стрессам, поскольку он участвует в регуляции процессов роста, фотосинтеза, синтеза белка, выполнении антиоксидантной функции и контроле активных форм кислорода (АФК), в экспрессии генов и обеспечении целостности мембран [6]. Лишь малое количество цинка может быть усвоено из почвы; по некоторым данным, эффективность использования цинка при почвенных подкормках составляет менее 3,5% [17]. При этом от дефицита цинка страдает почти каждый третий человек в мире [11]. Дефицит цинка негативно влияет на организм человека, вызывая замедление роста, нарушения в работе иммунной системы, снижение способности к обучению, развитие рака и нарушения в структуре ДНК [9]. Повышение содержания цинка в продуктах питания и полевых культурах – важная задача. В качестве перспективного решения данных проблем рассматривается применение нанотехнологий. Особого внимания заслуживают наночастицы оксида цинка (ZnO НЧ), демонстрирующие высокую эффективность в защите растений от негативного воздействия тяжёлых металлов.

Горох посевной (*Pisum sativum*) остается одной из самых востребованных сельскохозяйственных культур, благодаря комплексу полезных свойств, высокой урожайности и универсальности применения в различных отраслях сельского хозяйства и пищевой промышленности. Российскими учеными [2] было показано, что зернобобовые культуры (горох и фасоль) обладают большей устойчивостью к проник-

новению соединений свинца при сравнении с другими, например, овощными культурами. Тем не менее в лабораторном опыте добавление раствора соли свинца в соответствии с ПДК приводило к снижению процента прорастания семян гороха овощного в 1,5 раза. Содержание моносахаридов, фенольных соединений и хлорофилла в проростках гороха посевного было снижено при выращивании на загрязненной свинцом почве. Поскольку в почвах ряда регионов РФ фиксируются превышения ПДК пахотного слоя почвы по свинцу [1, 3], актуальной задачей остается поиск эффективных агроприемов, позволяющих снизить поступление токсиканта в растения и ослабить вызванный им стресс. Ранее было показано, что ZnO НЧ усиливают антиоксидантную защиту растений, тем самым нейтрализуя активные формы кислорода (АФК), и снижают поглощение свинца стеблями, листьями и семенами горчицы [16]. Вместе с тем, сведения об использовании ZnO НЧ в качестве средства защиты *P. sativum* от свинцового стресса остаются фрагментарными, и потенциал этих НЧ как экологичной замены традиционным агрохимикатам требует дальнейшего изучения. Целью настоящей работы было лабораторное изучение влияния различных концентраций ZnO НЧ (в сравнении с раствором сульфата цинка) при внекорневом внесении на рост, биохимические показатели и антиоксидантную систему при выращивании *P. sativum* в загрязненных свинцом почвах.

Материалы и методы

В качестве тест-культуры для лабораторного эксперимента использовали семена ультрараннего сорта гороха Амброзия («Гавриш», Россия).

Эксперименты по использованию наноксидов в качестве внекорневой добавки для подавления экологического стресса ведутся лишь в нескольких лабораториях в мире, и для разработки плана эксперимента нами были рассмотрены результаты этих исследований (табл. 1).

Эксперимент, спланированный с учетом табл. 1, был проведен в лаборатории Южно-Уральского государственного университета, в 2025 году. Растения были высажены в глиняные горшки (высотой 20 см, диаметром 15 см) с питательным универсальным почвогрунтом, содержащим N₂ 400 мг/кг, P₂O₅ 1000 мг/кг, K₂O 600 мг/кг, pH 6–7. Масса почвы в каждом горшке составляла 2 кг. В каждый горшок высадили по 10 семян, всхожесть составила от 40 до 60%. В каждом горшке оставляли по 4 растения. Растения выращивали при фотопериоде 14/10 ч (свет/темнота) с использованием фитоламп для дополнительного освещения. Температура в лаборатории поддерживалась на уровне 18–19 °С, относительная влажность воздуха составляла 50–60 %.

Для внекорневой подкормки использовали ZnO НЧ с размерами (80 ± 20) нм, синтезированные в Научно-образовательном центре «Нанотехнологии» ЮУрГУ. Обработку проводили суспензиями ZnO НЧ с концентрациями 50 и 100 мг на 1 л и раствором Zn^{2+} в виде сульфата цинка при концентрации, в пересчете на оксид цинка, 100 мг на 1 л. (х.ч., Китай). Для моделирования свинцового загрязнения в эксперименте использовался нитрат свинца ($Pb(NO_3)_2$) в концентрациях 0 (контроль), 50 (умеренный стресс) и 100 мг на кг (сильный стресс). Каждая из этих 12 экспериментальных групп была представлена в трех повторностях, всего 36 горшков. Соли свинца в почву вносили непосредственно перед посадкой растений. Внекорневые удобрения вносили на стадии появления 3–4 листка, на стадии начала цветения и через 2 недели после начала цветения. Схема эксперимента представлена в таблице 2.

Эксперимент длился три месяца. После аккуратного извлечения растения были разделены на корни и побеги и промыты водопроводной водой. Стручки были отделены от побегов. Была измерена общая высота растения и длина его корней с помощью метрической шкалы. Для оценки биомассы свежих растений использовались электронные весы.

В свежей зеленой массе (ЗМ) листьев определяли содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла – суммарно *a* и *b*, а также их соотношение, каротина) и перекиси водорода. Хлорофиллы *a* и *b* и каротиноиды определяли спектрофотометрическим методом. Для этого растительный экстракт готовили путем гомогенизации навески листьев (например, 0,1–0,2 г) с 95% этанолом, после чего инкубировали при комнатной температуре в темноте в течение 24 ч для полной экстракции пигментов. Полученную

Табл. 1

Опубликованные эксперименты по изучению воздействия внекорневых добавок наноксида цинка на растения в почве, загрязненной тяжелыми металлами

Локация эксперимента, ссылка	Культура	Использованный наноксид. Вид стресса	Условия эксперимента
Сад лекарственных растений Джамия Хамдард, Нью-Дели, Индия. Естественные условия сада [16]	Горчица (<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern.	ZnO НЧ (Sigma Aldrich, США). Свинец в почве	Растения выращивали в глиняных горшках с суглинистой почвой (pH 7) без свинца или с 250 μ M либо 500 μ M свинца, без внекорневой обработки наночастицами или с использованием ZnO НЧ в концентрациях 250, 500 или 1000 ppm
Исламский университет Бахавалпура, Пакистан. Естественные условия экспериментальной площадки университета [4]	Барвинок розовый <i>Catharanthus roseus</i>	ZnO НЧ (Sigma-Aldrich, США). Кадмий в почве	Растения выращивали в глиняных горшках с супесчаным суглинком (pH 7). Через две недели после посадки растений в почву вводили кадмий ($CdCl_2$ 0,5 μ M). При внекорневом применении ZnO НЧ использовали в концентрации 25 мг/л. Горшки были разделены на четыре группы: без опрыскивания (контроль), с опрыскиванием листьев ZnO НЧ, с добавлением Cd, с добавлением Cd и опрыскиванием ZnO НЧ.
Тебризский университет, Тебриз, Иран. Теплица [14]	Эхинацея пурпурная <i>Echinacea purpurea</i> (L.) Moench	TiO_2 НЧ и ZnO НЧ, синтезированные в лаборатории. Свинец в почве.	Растения высаживали в горшки с садовой почвой и песком (3:1). В почву добавляли сульфат свинца ($PbSO_4$) 50 мг/кг и 100 мг/кг. В эксперименте использовали TiO_2 НЧ (50 мг/л), ZnO НЧ (50 мг/л) и совместно TiO_2 НЧ и ZnO НЧ (50 мг/л)
Ботанический сад университета Хохай, Нанкин, Китай. Теплица [18]	Шпинат <i>Spinacia oleracea</i> L.	ZnO НЧ и FeO НЧ (источник не указан). Мышьяк в почве	Почва (pH 6,9) была собрана на экспериментальных станциях университета Хохай. Горшки с растениями были разделены на три группы: без обработки почвы мышьяком, с добавлением 60 μ M или 120 μ M мышьяка. Внекорневую обработку производили FeO НЧ в концентрации 10 или 20 мг/л, а также ZnO НЧ в концентрации 20 или 40 мг/л.

суспензию осветляли центрифугированием при 10 000 об/мин в течение 15 мин (центрифуга Centurion Scientific Limited PRO-ASTM BC, Великобритания). Оптическую плотность супернатанта измеряли на спектрофотометре Shimadzu UV-270 (Япония) при следующих длинах волн: 664 нм (хлорофилл *a*), 648 нм (хлорофилл *b*) и 470 нм (каротиноиды). Концентрацию пигментов рассчитывали по формулам для 95% этанола, согласно работе [5]. Содержание перекиси водорода (H_2O_2) в листьях определяли фотокolorиметрически по образованию окрашенного комплекса пероксида титана [19], измеряя оптическую плотность на спектрофотометре Shimadzu UV-270 (Япония) при 410 нм.

Содержание цинка в сухой массе стручков с зернами определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7700х, Agilent Technologies Inc., США) в Центре коллективного пользования Южно-Уральского научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс). Для этого стручки вместе с зернами, находящимися внутри, предварительно высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 60°C, после чего измельчали в агатовой ступке до однородного порошка. Навеску образца (0,5 г) помещали в тefлоновые автоклавы и проводили минерализацию в ми-

кроволновой системе с использованием концентрированной азотной кислоты (HNO_3 , 65 %, марка «ос.ч.») при температуре 200 °C в течение 20 мин. Для контроля правильности измерений параллельно анализировали сертифицированный стандартный образец состава растительного материала (ГСО 8923-2007, листья березы). Все измерения выполняли в трёх повторностях, результаты выражали в мг/кг сухой массы.

Для лучшего понимания механизма воздействия наночастиц при внекорневой подготовке изучали поверхность листьев с применением комплекса сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионным рентгеновским анализом Jeol JSM-7001F (Япония).

Для каждой экспериментальной группы рассчитывали стандартную ошибку среднего на основе выборочной дисперсии, а доверительные интервалы для средних значений определяли с использованием критерия Стьюдента (двусторонний) при уровне значимости $p = 0,05$. В таблицах данные представлены как среднее $\pm$ стандартная ошибка среднего. Нормальность выборок была определена по критерию Шапиро–Уилка для каждой экспериментальной группы, состоящей из трех технических повторностей (3 параллельных опыта в трех горшках) и четырех биологических повторностей (по четыре растения в каждом

Табл. 2

Схема эксперимента

Шифр экспериментальной группы	Описание	Внесение реактивов	
		<i>Pb</i> в почве, мг/кг	<i>ZnO</i> или Zn^{2+} , мг по <i>ZnO</i> в 1 л
Без Pb	К	Контроль (без стресса и без внекорневой обработки)	–
	ZnO50	Без стресса с внекорневой обработкой разбавленной суспензией ZnO НЧ	50
	ZnO100	Без стресса с внекорневой обработкой высококонцентрированной суспензией ZnO НЧ	100
	Zn^{2+}	Без стресса с внекорневой обработкой раствором соли цинка	100
Pb_50	К	Средний стресс без внекорневой обработки	50
	Pb50ZnO50	Умеренный стресс с внекорневой обработкой мало концентрированной суспензией ZnO НЧ	50
	Pb50ZnO100	Умеренный стресс с внекорневой обработкой мало концентрированной суспензией ZnO НЧ	100
	Pb50 Zn^{2+}	Умеренный стресс с внекорневой обработкой раствором соли цинка	100
Pb_100	К	Сильный стресс без внекорневой обработки	100
	Pb100ZnO50	Сильный стресс с внекорневой обработкой высоко концентрированной суспензией ZnO НЧ	100
	Pb100ZnO100	Сильный стресс с внекорневой обработкой высоко концентрированной суспензией ZnO	100
	Pb100 Zn^{2+}	Сильный стресс с внекорневой обработкой раствором соли цинка	100

горшке). Значимость различий между показателями обработанных и контрольных растений оценивали с помощью двустороннего t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. На рисунках значимо различающиеся выборки обозначены знаком *. Статистическую обработку результатов проводили в программе IBM SPSS Statistics 23 (США), а визуализацию данных и построение графиков выполняли в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Стресс, вызванный наличием свинца в почве, привел к депрессии роста растений (рис. 1).

Умеренный стресс не повлиял на морфологические показатели гороха посевного. В условиях сильного стресса высота и масса побегов уменьшались на 20% и 21%, а длина и масса корней на 25% и 28% (рис. 1). Под действием внекорневых подкормок в виде ZnO НЧ эти параметры статистически значимо измени-

лись в сторону роста как ВП и ДК, так и МП и МК (рис. 1). Так для растений, выращенных в условиях отсутствия свинцового стресса обработка суспензией ZnO НЧ с концентрацией 50 мг/л вызвала увеличение ВП, ДК, МП и МК на 30%, 42%, 50% и 72% по сравнению с контролем, а обработка суспензией с концентрацией 100 мг/л привела к увеличению ВП, ДК, МП и МК на 35%, 33%, 63% и 76%.

Внекорневая подкормка суспензией ZnO НЧ с концентрацией 50 мг/л вызвала увеличение по сравнению с контролем ВП, ДК, МП и МК на 50%, 38%, 71% и 43% у растений, подвергавшихся умеренному стрессу от загрязнению почв свинцом, и на 56%, 44%, 69% и 43%, соответственно, при сильном стрессе. Обработка высоко концентрированной суспензией ZnO НЧ (100 мг/л) при умеренном стрессе вызвала увеличение показателей ВП, ДК, МП и МК на 78%, 38%, 124% и 57%. При сильном стрессе от введения свинца в почву обработка высоко концентрированной суспензией также показала прекрасный результат и показатели

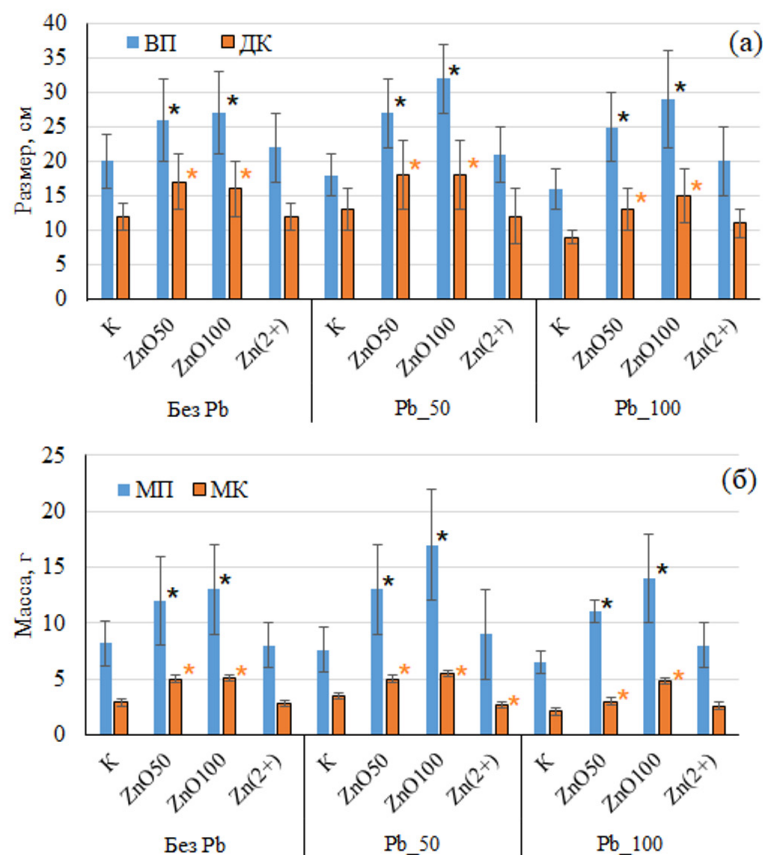


Рис. 1. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л (ZnO50), 100 мг/л (ZnO100) и сульфатом цинка 100 мг/л [Zn(2+)] при сравнении с контролем (К) на высоту побега (ВП) и длину корня (ДК) (а); массу побега (МП) и массу корня (МК) (б) в сериях экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb) и в условиях умеренного (Pb_50) и сильного (Pb_100) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена по двустороннему t-критерию Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Значимо отличные от контроля выборки указаны знаком *.

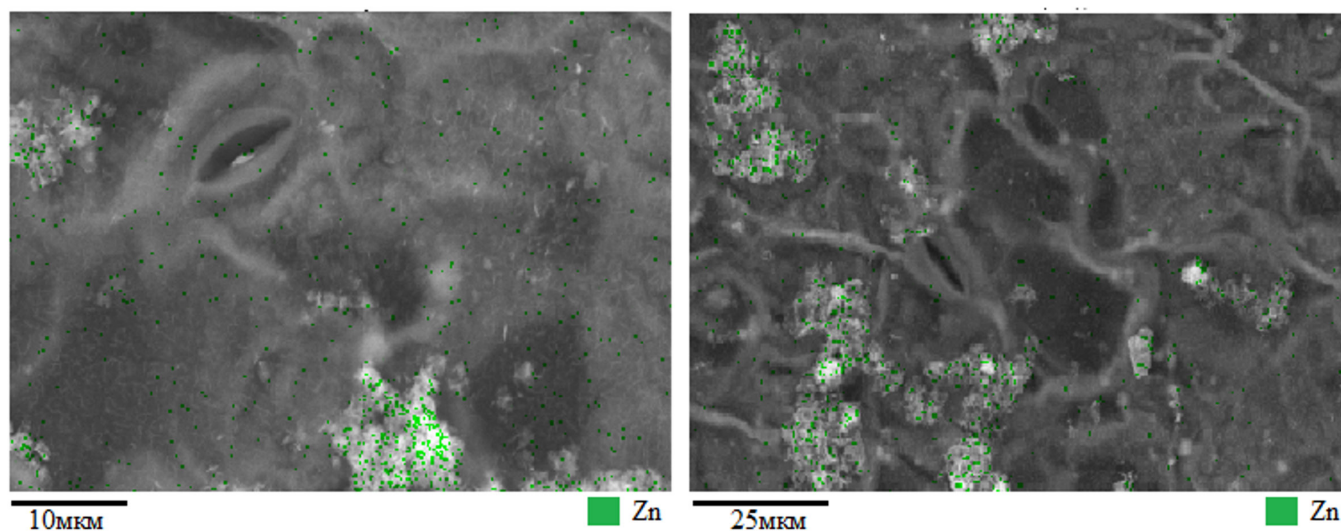


Рис. 2. СЭМ-изображение устьиц.

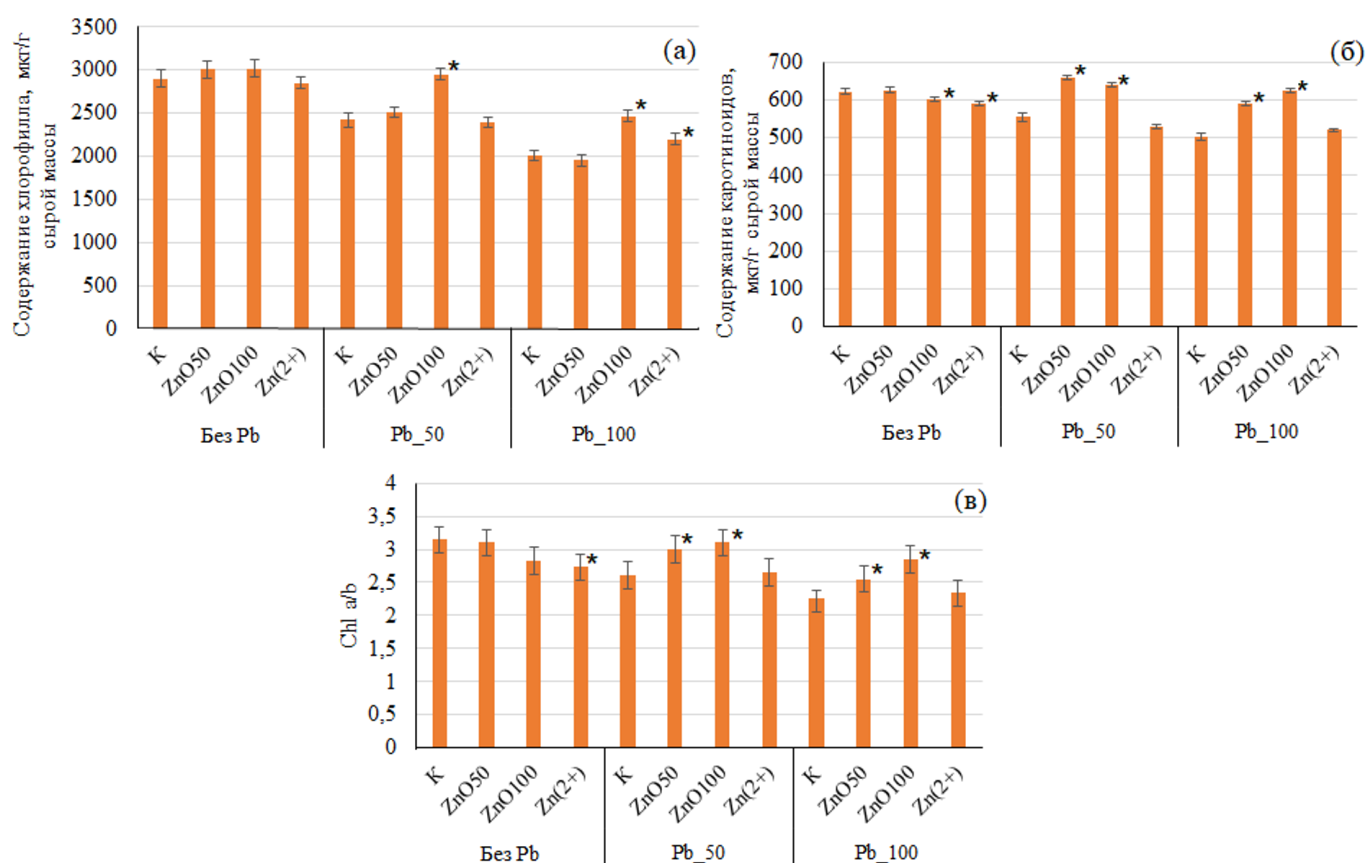


Рис. 3. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л (ZnO50), 100 мг/л (ZnO100) и сульфатом цинка 100 мг/л [Zn(2+)] по сравнению с контролем на суммарную концентрация хлорофилла а и б (а), соотношение хлорофиллов, Chl a/b (б) и каротина (в) в сериях экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb), умеренного (Pb₅₀) и сильного (Pb₁₀₀) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена по двустороннему t-критерию Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Значимо отличные от контроля выборки указаны знаком *.

были превышены по сравнению с контролем на 81%, 115%, 71% и 129 %, соответственно (рис. 1). Внекорневая обработка раствором соли цинка ни в одной серии экспериментов не привела к статистически значимому увеличению морфологических параметров растений по сравнению с контролем.

Наиболее выраженный протекторный и ростостимулирующий эффект наблюдается при использовании концентрации ZnO НЧ 100 мг/л, особенно в условиях сильного загрязнения почвы свинцом, где прирост показателей массы и длины корней достигал максимальных значений (до 129%). Эффективность ZnO НЧ обусловлена их наноразмерными свойствами, обеспечивающими высокую биодоступность цинка, тогда как применение раствора соли цинка в идентичных условиях оказалось неэффективным. Это указывает на то, что положительный эффект связан не просто с восполнением дефицита микроэлемента, а с комплексным действием наночастиц, вероятно, включающим антиоксидантную защиту и модуляцию физиологических процессов, как было показано в литературе [20].

СЭМ-изображения на рис. 2 позволяют судить о пути внекорневого проникновения наночастиц в растения через листья.

СЭМ четко показывает, что наночастицы и их скопления в виде конгломератов микронных размеров оседают в устьичной полости и на поверхности замыкающих клеток. Но устьица предназначены для газообмена, а не для поглощения жидкости. Поверхность устьиц обычно гидрофобная, и СЭМ показывает, что просто так капля внутрь не всасывается, а наночастицы находятся по краям устьиц. Наночастицы вызывают повреждение кутикулы и «ожоги» устьиц [10]:

замыкающие клетки теряют тургор и сморщиваются. СЭМ фиксирует разрыв мембран в районе устьичной щели, куда устремляются частицы. Здесь возможны две трактовки: (1) агрессивный путь, когда частицы сами проделывают отверстия и (2) пассивный путь, ведь любое опрыскивание (даже водой через пульверизатор) вызывает микротравмы листа (разрывы кутикулы из-за гидроудара) и частицы используют эти готовые повреждения.

Влияние на фотосинтетические пигменты в физиологических условиях и при свинцовом стрессе показано на рис. 3.

На рис. 3 видно, что свинцовый стресс 50 мг Pb /кг привёл к умеренному снижению содержания общего хлорофилла в свежих листьях (на 17% от контроля) и незначимому увеличению каротиноидов, в то время как сильный свинцовый стресс (100 мг Pb /кг) значительно снизил содержание хлорофилла (на 31 %) и каротиноидов (на 25%). Причина снижения хлорофилла может состоять в том, что Pb замещает Mg в молекуле хлорофилла, ингибирует синтез аминолевулиновой кислоты (предшественника) и вызывает окислительный стресс [13]. Одновременно с этим каротиноиды – важные антиоксиданты и светособирающие пигменты. При умеренном свинцовом стрессе их содержание сначала незначительно увеличивается (возможно, как защитная реакция на окислительный стресс), а при высоком содержании Pb падает из-за разрушения мембран хлоропластов [7]. Соотношение хлорофилл a /хлорофилл b ($Chl\ a/b$) чувствительно к структурным изменениям фотосистем. Его норма для гороха составляет около 2,8–3,2, в нашем случае в контрольном образце соотношение было 3,15. Под действием Pb соотношение снизилось при среднем стрессе до

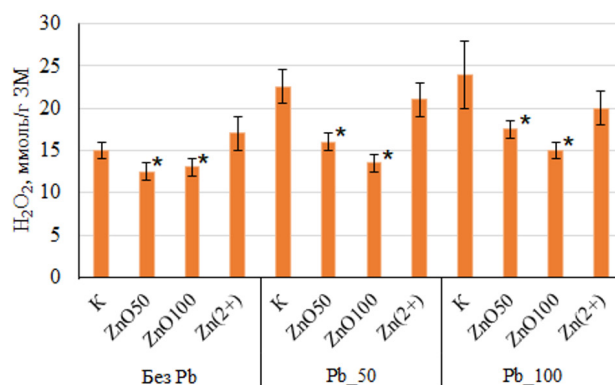


Рис. 4. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л ($ZnO50$), 100 мг/л ($ZnO100$) и сульфатом цинка 100 мг/л [$Zn(2+)$] по сравнению с контролем на содержание перекиси водорода в листьях гороха (H_2O_2 , ммоль/г ЗМ) в сериях экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb), умеренного (Pb_{50}) и сильного (Pb_{100}) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена с помощью двустороннего t -критерия Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Достоверно отличные от контроля выборки указаны знаком *.

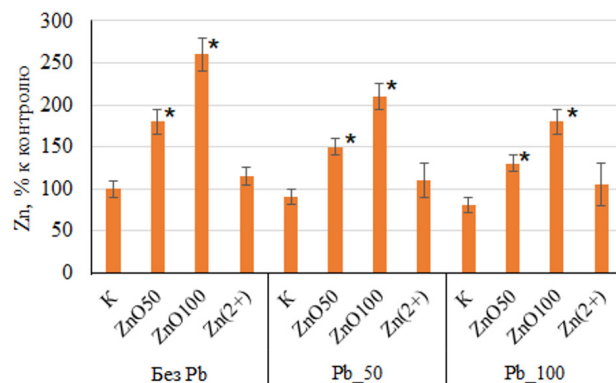


Рис. 5. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л (ZnO50), 100 мг/л (ZnO100) и сульфатом цинка 100 мг/л [Zn(2+)] на содержание Zn в стручках гороха при физиологических условиях и при свинцовом стрессе в % относительно контроля (без свинца в почве и внекорневой обработки) [Содержание цинка (100 %) в контрольных растениях (без свинца в почве и внекорневой обработки) составило 85 мкг/г сухой массы]. Показаны серии экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb), умеренного (Pb_50) и сильного (Pb_100) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена по двустороннему t-критерию Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Значимо отличные от контроля выборки указаны знаком *.

2,6, а при сильном упало до 2,25. Pb сильнее повреждает фотосистему II, где преобладает хлорофилл *a* (Chl *a*), а белки антенного комплекса (с Chl *b*) более устойчивы. Также может нарушаться превращение Chl *b* в Chl *a*. Таким образом, снижение Chl *a/b* выступает маркером деградации реакционных центров фотосистемы II [8]. Обработка наночастицами ZnO при 100 мг/л частично нормализует Chl *a/b*, возвращая к значению 3,1 за счет защиты белков фотосистемы II и поддержки синтеза Chl *a*. ZnO НЧ (особенно в концентрации 100 мг/л) действуют эффективнее сульфата цинка. Внекорневая обработка препаратом ZnO НЧ ведёт к статистически значимому увеличению содержания каротиноидов по сравнению с контролем (рис. 3). Сульфат цинка (100 мг/л в пересчете на ZnO) даёт меньший или статистически не значимый прирост. Предположительно, это связано с тем, что ионы Zn^{2+} при высоком уровне Pb могут быть токсичны, а также обладают худшей, чем у НЧ, способностью проникать через устьица в составе ионного раствора, тогда как НЧ, как показано выше, проникают через повреждённую кутикулу.

Количество H_2O_2 в листьях гороха при свинцовом стрессе возрастало и варьировалось в зависимости от концентрации наночастиц, нанесённых на растения (рис. 4).

В растениях, обработанных ZnO НЧ, содержание H_2O_2 было значимо ниже, чем в растениях, обработанных сульфатом цинка, как в отсутствие стресса, так и при умеренном и сильном свинцовом стрессе (рис. 4).

Измерения количества цинка в стручках гороха (рис. 5) показали, что при физиологических условиях содержание цинка в листьях после опрыскивания наночастицами ZnO пропорционально увеличивает-

ся. Кроме того, результаты показали, что содержание цинка в листьях снижается при воздействии свинцового стресса, и это снижение более выражено компенсируется после опрыскивания наночастицами ZnO, чем после опрыскивания раствором сульфата цинка.

Выводы

Внекорневая подкормка суспензиями ZnO НЧ превосходит раствор сульфата цинка по защите от загрязнения почв свинцом. Во всех сценариях свинцового стресса обработка ZnO НЧ обеспечивала лучшее восстановление морфологических параметров (высота побега, длина корней, масса побегов и корней), чем эквивалентная по концентрации соль цинка, что может быть связано с более эффективным преодолением устьичного барьера наночастицами.

Внекорневая подкормка суспензиями ZnO НЧ эффективно восстанавливает фотосинтетический пигментный комплекс. Особенно при 100 мг/л наблюдается нормализация соотношения Chl *a/b* до 3,1, восстановление общего хлорофилла (до 85% от контроля при сильном свинцовом стрессе). Сульфат цинка не обеспечивает такой эффект, возможно из-за худшего проникновения через устьица и кутикулу.

Внекорневая подкормка суспензиями ZnO НЧ снижает накопление H_2O_2 (маркера окислительного стресса) в растениях, подвергшихся стрессу от загрязнения почв свинцом, тогда как сульфат цинка не даёт такого эффекта. Кроме того, обработка наночастицами увеличивает содержание цинка в стручках гороха даже на фоне свинцового стресса, тогда как обработка раствором сульфата цинка не приводит к статистически значимому увеличению содержания цинка в стручках по отношению к контролю.

СЭМ-изображения показывают, что наночастицы и их конгломераты оседают в устьичной полости и на замыкающих клетках, чем могут вызывать локальные повреждения кутикулы («ожоги»), потерю тургора и разрывы мембран, через которые частицы проникают в ткань листа.

Представленное исследование имеет ограничения. Работа выполнена в вегетационном опыте (почва в горшках). Не учтены полевые факторы (ветер, осадки, УФ, перепады температур), которые могут повлиять на стабильность суспензии наночастиц и их взаимодействие с листом. Механизм проникновения наночастиц в растения остается дискуссионным. Был исследован один вид растений и одна форма наночастиц. Перенос на другие культуры (злаки, пасленовые) требует проверки. В работе отсутствуют данные о долгосрочной судьбе ZnO НЧ.

Полученные данные являются основанием для продолжения исследования в полевых условиях. Для сельского хозяйства на почвах, загрязненных свинцом (особенно в диапазоне 50–100 мг/кг), рекомендуется

двукратная внекорневая обработка суспензией нано-ZnO в концентрации 100 мг/л (что соответствует ~2 кг ZnO/га). Эта доза обеспечивает максимальное восстановление биомассы и фотосинтеза даже при сильном стрессе. При умеренном загрязнении возможно использование более низкой дозы (50 мг/л) для экономии препарата и мягкой стимуляции корневой системы. Также работа выявила важные рекомендации по мониторингу в процессе полевого эксперимента. Необходимо оценивать состояние растений не только по высоте и массе, но и по соотношению Chl a/b (пороговое значение <2,7 – сигнал стресса) и содержанию каротиноидов (рост на начальных этапах стресса – благоприятный признак).

Благодарности: Работа выполнена при поддержке грантовой программы Виктора Христенко “Шаг в будущее”, ЮУрГУ. Благодарим НОЦ «Нанотехнологии» ЮУрГУ и ЦКП ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН за помощь в проведении анализов, Екатерину Булатову за синтез образца наноксида цинка.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Байкенова ЮГ. Оценка степени опасности загрязнения почв тяжелыми металлами. Аграрный вестник Урала. 2014;7(125):10-4.
2. Демиденко ГА. Влияние свинца на рост и развитие семян и проростков гороха овощного. Вестник КрасГАУ. 2019;(4):16-23.
3. Павлов АА. Содержание валовых форм цинка, свинца и кадмия в дерново-подзолистых супесчаных почвах земель сельскохозяйственного назначения. Аграрный вестник Урала. 2024;24(9):1138-46. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-09-1138-1146>.

Общий список литературы / Reference List

1. Baikenova YuG. [Estimation of the degree of danger of soil pollution with heavy metals]. Agrarnyi Vestnik Urala. 2014;7(125):10-4. (In Russ).
2. Demidenko GN. [The Influence of lead on growth and development of seeds and seed growth of vegetable pea]. Vestnik Krasnoyarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2019;(4):16-23 (In Russ.).
3. Pavlov AA. [Content of gross forms of zinc, lead and cadmium in sod-podzolic sandy loam soils of agricultural lands]. Agrarnyi Vestnik Urala. 2024;24(9):1138-46. (In Russ).
4. Ahsan M, Radicetti E, Mancinelli R, Ali HM, Younis A, Sajid M, Manan A, Ali S, Valipour M, Zulfiqar H. Alleviation of cadmium stress and improved growth performance of periwinkle (*Catharanthus roseus* L.) by foliar application of zinc oxide nanoparticles. South African Journal of Botany. South Afr J Bot. 2025;176:129-40. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.10.057>.
5. Alam MZ, Carpenter-Boggs L, Hoque MA, Ahammed GJ. Effect of soil amendments on antioxidant activity and photosynthetic pigments in pea crops grown in arsenic contaminated soil. Heliyon. 2020;6(11):e05475. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05475>.
6. Ali MF, Ali A, Bilal S, Ali U, Huma N, Adnan M. Mitigating zinc deficiency in plants and soils through agronomic techniques: A review. J Environ Agric Sci. 2021;23(1&2):1-10.
7. Baek SA, Han T, Ahn SK, Kang H, Cho MR, Lee SC, Im KH. Effects of heavy metals on plant growths and pigment contents in *Arabidopsis thaliana*. Plant Pathol J. 2012;28(4):446-452. <https://doi.org/10.5423/PPJ.NT.01.2012.0006>.
8. Bhattacharjee S, Mukherjee AK. Heavy metals alter photosynthetic pigment profiles as well as activities of chlorophyllase and 5-aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) in *Amaranthus lividus* seedlings. J Environ Biol. 2003;24(4):395-9. PMID:15248652
9. Black R, Allen L, Bhutta ZA, Caulfield LE, Onis M, Ezziati M, Mathers C, Rivera-Dommarco J. Maternal and child undernutrition: global and re-

- _____



ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ Р. ВОЛГИ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ В РАЙОНЕ ИЛЬИНСКИХ НЕФТЕЙ

Нгуен Нгок Ань, И.В. Мельник

Астраханский Государственный технический университет, Астрахань, Россия

Эл. почта: ngocanh_98@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.04.2026; принята к печати 30.07.2026

Ильинские нефтямы — комплекс из 19 открытых котлованов в 20 км юго-западнее Астрахани, созданный в начале XX века для хранения отходов нефтепереработки. За более чем столетний период площадь загрязнения земель нефтеотходами превысила 100 га; нефтесодержащие отходы сохраняются на территории объекта и рассматриваются как потенциальный источник вторичного загрязнения прилегающих вод. По данным мониторинга 2022–2025 гг. оценено содержание нефтепродуктов и тяжелых металлов в воде и донных отложениях Волги на пяти пунктах, один из которых расположен выше по течению и использован для сравнения. Наиболее устойчивый пространственно-сезонный сигнал установлен для железа: в пунктах № 3–4 его содержание достигало 0,30 мг/дм³ летом и осенью и 0,20 мг/дм³ весной при 0,10 мг/дм³ в пункте К и пунктах № 1–2. Для цинка также прослеживалось преимущественное повышение к пунктам № 3–4 в теплые сезоны. Кобальт и медь часто превышали рыбохозяйственные ПДК; для никеля и свинца отмечались отдельные превышения, для хрома — единичное, тогда как количественно определенные значения кадмия и мышьяка ПДК не превышали. Наиболее выраженный пространственный градиент выявлен для нефтепродуктов: их содержание возрастало от пункта К к пункту № 4, а сезонный максимум приходился на лето. В донных отложениях загрязняющие вещества сохранялись на измеряемых уровнях; для большинства компонентов максимум годовых значений приходился на 2023 г. Совокупность результатов характеризует исследуемый участок как зону локальной и сезонно изменчивой техногенной нагрузки. Полученные данные могут использоваться как исходная характеристика гидросистемы при подготовке и последующей оценке эффективности мероприятий по ликвидации накопленного экологического вреда.

Ключевые слова: Ильинские нефтямы, река Волга, тяжелые металлы, нефтепродукты, донные отложения.

HEAVY METAL POLLUTION OF WATER AND BOTTOM SEDIMENTS IN THE VOLGA RIVER IN THE ILYINSKY OIL RESERVOIRS AREA

Nguyen Ngok An, I.V. Melnik

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Email: ngocanh_98@mail.ru

The Ilyinsky oil pits comprise 19 open excavations about 20 km southwest of Astrakhan, created in the early twentieth century for petroleum-processing wastes. More than a century of operation has contaminated over 100 ha of land, and petroleum-containing wastes remain at the site as a potential source of secondary pollution of adjacent waters. Monitoring data for 2022–2025 were used to assess petroleum products and heavy metals in Volga River water and bottom sediments at five stations, including one upstream comparison station. The most consistent spatial and seasonal signal was observed for iron: at stations 3–4 concentrations reached 0.30 mg/L in summer and autumn and 0.20 mg/L in spring, compared with 0.10 mg/L at station K and stations 1–2. Zinc also tended to be higher at stations 3–4 during warm seasons. Cobalt and copper frequently exceeded fishery water-quality limits; nickel and lead showed occasional exceedances and chromium one exceedance, whereas quantified cadmium and arsenic values remained below their limits. Petroleum products showed the clearest spatial gradient, increasing from station K toward station 4, with a summer maximum. Contaminants remained measurable in bottom sediments, and most components showed their highest annual values in 2023. The results characterize the studied reach as an area of localized and seasonally variable technogenic pressure and may serve as a baseline for planning and subsequently evaluating measures aimed at remediation of accumulated environmental damage.

Key words: Ilyinsky oil pits, Volga River, heavy metals, petroleum products, bottom sediments.

Введение

Река Волга, являясь крупнейшей водной артерией Европы, играет ключевую роль в водоснабжении, судоходстве, рыбном хозяйстве и рекреации. Ее экологическое состояние, особенно в низовьях, является объектом при-

стального внимания из-за многочисленных источников антропогенного воздействия. Одним из наиболее серьезных вызовов является загрязнение гидросистемы нефтепродуктами, представляющее угрозу для гидробионтов и здоровья населения. В этом контексте особую акту-



Рис. 1. Один из открытых котлованов Ильинских нефтям с видимой жидкой поверхностью на момент обследования

альность приобретает оценка объектов накопленного экологического ущерба, расположенных в непосредственной близости от реки. К таким объектам относятся Ильинские нефтямы в Икрянинском районе Астраханской области – историческое хранилище нефтеотходов, которое продолжает оказывать негативное влияние на окружающую среду [1].

Ильинские нефтямы представляют собой комплекс из 19 открытых котлованов, расположенных примерно в 20 км юго-западнее Астрахани. Они были созданы в начале XX века и использовались для хранения мазута, нефтешламов, буровых растворов и других отходов нефтепереработки. По опубликованным результатам анализа отобранных на объекте нефтесодержащих проб материал включает углеводородную, водную и твердую фазы [3]; поэтому видимая на рис. 1 жидкая поверхность не интерпретируется как доказательство того, что котлован заполнен только накопившейся водой.

За более чем столетний период эксплуатации площадь загрязнения земель нефтеотходами превысила 100 гектаров. Ситуация осложняется расположением объекта в водоохранной зоне Волги, вблизи водозабора поселка Ильинка; в паводковый период сохраняется риск размыва защитного вала и переноса нефтепродуктов в речную систему. В связи с этим объект ранее рассматривался для ликвидации накопленного экологического вреда

и рекультивации территории в рамках природоохранных программ.¹ Мониторинговая характеристика воды и донных отложений до проведения таких работ необходима как исходный уровень для оценки их экологической эффективности.

Объект накопленного экологического ущерба «Ильинские нефтямы» может рассматриваться как потенциально активный источник вторичного загрязнения: накопленные нефтесодержащие отходы длительное время сохраняются в грунтовой толще, однако при изменении гидрологической обстановки способны вовлекаться в миграционные процессы и поступать в прилегающую водную систему. В отличие от типичных почвенных загрязнений, где токсиканты закреплены в верхнем гумусовом горизонте, здесь мы имеем дело с линзами чистого нефтешлама – высококонцентрированной смеси мазута, отработанных масел и буровых растворов. Тяжелые металлы в нефтешламах обладают высокой сорбционной аффинностью к органическому веществу и мелкодисперсным частицам. Однако при изменении pH, окислительно-восстановительного потенциала, температуры

¹ Ильинские нефтяные ямы в Астраханской области планируется ликвидировать в рамках нацпроекта «Экология». Астраханский листок. URL: <https://astravolga.ru/news/ilinskie-neftyanye-yamy-v-astrakhanskoy-oblasti-planiruetsya-likvidirovat-v-ramkakh-natsproekta-ekol/> (дата обращения: 10.01.2026).

и содержания органического вещества металлы могут переходить в более подвижные формы, что повышает риск их миграции из загрязненных грунтов и донных отложений в водную фазу [4, 9, 18].

Донные отложения в данном случае выступают не как индикатор, а именно как депо, где накапливаются наиболее стойкие формы загрязнений. В отличие от воды, где концентрации могут варьироваться в зависимости от сезона и гидрологического режима, донные осадки фиксируют долговременный эффект. Именно здесь создаются условия для вторичного загрязнения водной толщи, особенно в периоды паводков или при антропогенном воздействии. Кроме того, донные отложения служат средой обитания для бентосных организмов, которые включаются в трофические цепи, что делает вопрос накопления тяжелых металлов и углеводородов в этом компоненте экосистемы критически значимым для оценки долгосрочных рисков [2, 10, 11, 17].

Ситуация с Ильинскими нефтяными месторождениями не является уникальной для Нижней Волги. В водоохранной зоне р. Кизань исследованы Соколовские нефтяные месторождения – исторические нефтешламонакопители аналогичного происхождения, для которых установлены высокие содержания нефтепродуктов в грунтах, пространственная неоднородность загрязнения и риск поступления загрязняющих веществ в водоток [6]. Для Нижней Волги и ее устьевой области накоплен значительный массив данных о миграции, распределении и накоплении металлов. В. Ф. Бреховских и соавт. исследовали процессы транспорта и аккумуляции тяжелых металлов в Нижней Волге [7], а последующие исследования донных отложений Верхней и Нижней Волги показали выраженную пространственную неоднородность содержания металлов и участие железа и марганца в окислительно-восстановительных циклах [8]. Для устьевой области Волги установлена высокая пространственно-временная изменчивость миграции химических элементов, связанная с гидродинамическими условиями, расходом воды и наносов [12]. Многолетние наблюдения в зоне смешения волжских и каспийских вод позволили охарактеризовать закономерности миграции растворенных микроэлементов [15], а исследования вод дельты Волги дали оценки пространственной и межгодовой изменчивости ее макро- и микроэлементного состава [16]. Экотоксикологические исследования бассейна Волги также показали необходимость комплексной оценки химического загрязнения и его биологических последствий [13].

В связи с вышеизложенным целью исследования являлась оценка загрязнения гидросистемы реки Волга в районе расположения Ильинских нефтяных месторождений на основе многолетних данных мониторинга (2022–2025 годы).

Материалы и методы

Объектом исследования является участок реки Волги – водный объект высшей рыбохозяйственной кате-

гории, расположенный в районе Ильинских нефтяных месторождений (Астраханская область), в непосредственной близости от водозабора, обеспечивающего хозяйственно-питьевое водоснабжение поселка Ильинка [1, 3]

Для исследования выделены пять мониторинговых пунктов. Сравнительный пункт (К) расположен выше по течению относительно основной группы точек; пункты № 1–4 размещены последовательно вдоль участка реки, прилегающего к Ильинским нефтяным месторождениям (рис. 2).

Участок характеризуется развитой поймой, медленным течением и сезонными колебаниями уровня воды, определяющими интенсивные руслово-пойменные обменные процессы.

Отбор проб воды и донных отложений проводили в 2022–2025 годах на пяти мониторинговых пунктах четыре раза в год: весной, летом, осенью и зимой. Пробы воды отбирали из поверхностного слоя на глубине 0,3–0,5 м с прибрежной зоны полиэтиленовым батометром; при невозможности безопасного подхода к урезу воды отбор выполняли с маломерного судна в пределах того же створа. На каждой станции отбирали три параллельные пробы объемом 1,0 дм³, из которых для лабораторного анализа формировали среднюю объединенную пробу.

Донные отложения отбирали в те же сезонные сроки, что и воду, – четыре раза в год, из поверхностного слоя 0–5 см дночерпателем типа Экмана. На каждой станции получали три точечные пробы, объединяли их в среднюю пробу, помещали в химически инертную тару и транспортировали в охлажденном состоянии. До анализа образцы хранили при температуре 4 ± 2 °С.

Нефтешлам рассматривали как отдельный тип исследуемого материала. Для характеристики потенциального источника загрязнения анализировали усредненную пробу верхнего обводненного слоя нефтешлама, отобранную из одного репрезентативного котлована Ильинских нефтяных месторождений. Полученные результаты использовали для характеристики состава исследованной пробы и не экстраполировали на нефтешлам всех 19 котлованов.

Для определения растворенных форм металлов водные пробы фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм, после чего консервировали азотной кислотой до pH < 2. Таким образом, приведенные в работе значения по металлам в воде относятся к фракции, прошедшей через фильтр 0,45 мкм, а не к валовому содержанию металлов во взвешенном веществе.

Полевой отбор всех проб воды и донных отложений, их маркировку и формирование объединенных проб в 2022–2025 годах выполняли по единой схеме при непосредственном участии автора. Инструментальные определения содержания металлов в пробах воды, донных отложений и нефтешлама выполняли в лаборатории Астраханского филиала ФГБУ «РосАгрохимслужба» после соответствующей матрично-специфической пробоподготовки. В воде железо, цинк, кадмий, кобальт, медь,

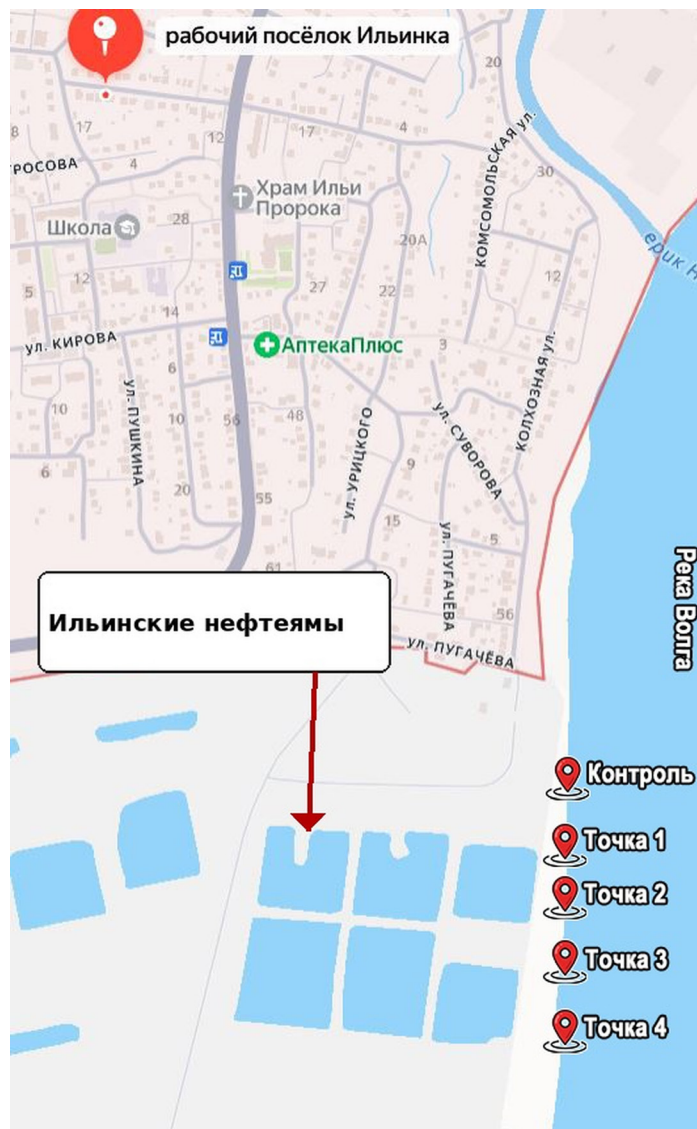


Рис. 2. Расположение мониторинговых пунктов и Ильинских нефтяных

никель, свинец и хром определяли атомно-абсорбционным методом, мышьяк – электротермической атомно-абсорбционной спектрометрией, ртуть – беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрией с техникой «холодного пара».

Нефтепродукты в воде определяли в соответствии с ГОСТ Р 70283-2022. Для донных отложений применяли те же принципы конечного инструментального определения металлов, но матрично-специфическую пробоподготовку: железо, цинк, кадмий, кобальт, медь, никель, свинец, хром и мышьяк – по РД 52.10.775-2013; ртуть – по РД 52.10.774-2013 с техникой «холодного пара». Массовую долю нефтяных компонентов в донных отложениях устанавливали по РД 52.24.505-2010.

Обработку и систематизацию результатов проводили в Microsoft Excel. Для сопоставления мониторин-

говых пунктов использовали максимальные количественно определенные концентрации за 2022–2025 гг., а сезонную динамику оценивали по значениям весеннего, летнего, осеннего и зимнего сроков отбора. Результаты ниже предела количественного определения (ПКО) сохраняли со знаком «<» и не использовали при выборе максимального количественно определенного значения. Содержание загрязняющих веществ в воде сопоставляли с рыбохозяйственными ПДК по приказу Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296.

Результаты исследований **Характеристика нефтешлама**

Содержание определяемых нефтепродуктов, фенолов и металлов в исследованной пробе нефтешлама представлено в табл. 1.

Табл. 1

Содержание нефтепродуктов, фенолов и металлов в усредненной пробе верхнего обводненного слоя нефтешлама

Показатель	Значение, мг/кг
Нефтепродукты	777000 ± 272000
Летучие фенолы	1,24 ± 0,20
Железо (Fe)	<1000
Кобальт (Co)	<5
Свинец (Pb)	<10
Кадмий (Cd)	<1
Марганец (Mn)	<200
Медь (Cu)	<10
Никель (Ni)	<50
Хром (Cr)	<5
Мышьяк (As)	<0,25
Ртуть (Hg)	0,011

Примечание. Приведены результаты определения указанных компонентов в усредненной пробе верхнего обводненного слоя нефтешлама из исследованного котлована. Обозначение «<» означает содержание ниже ПКО примененной методики; величина «±» воспроизводит погрешность результата, указанную в лабораторном протоколе.

Нефтепродукты составляют основную часть исследованной пробы верхнего обводненного слоя нефтешлама. Оставшаяся доля не является единым компонентом: для нефтешламов Ильинских нефтей ранее показано наличие водной и твердой фаз наряду с углеводородной фазой [3]. Выраженная неоднородность такого материала ожидаема для исторического объекта накопления, куда поступали различные виды нефтесодержащих отходов.

Из представленных металлов количественно определена ртуть; содержание остальных элементов находилось ниже ПКО примененных методик. Это отражает ограничение количественного определения, а не отсутствие элементов в пробе. Наличие ртути в нефтешламе требует внимания при оценке долговременного экологического риска с учетом ее способности к биоаккумуляции и токсического действия [5, 14].

Результаты мониторинга состава ВОДЫ

Для сопоставления мониторинговых пунктов в табл. 2 приведены максимальные количественно определенные концентрации девяти металлов, зарегистрированные на соответствующем пункте в одном из сезонных сроков отбора 2022–2025 годов. Сезонные особенности рассматриваются далее в тексте; рыбохозяйственные ПДК приведены в соответствии с приказом Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296.

В таком представлении отчетливо прослеживается увеличение содержания большинства металлов от верхнего сравнительного створа к пунктам № 3–4. Наиболее выражено различие для железа: в пункте К и пунктах № 1–2 максимальные значения составляли 0,10 мг/дм³, тогда как в пунктах № 3–4 достигали 0,30 мг/дм³, то есть трех рыбохозяйственных ПДК. Для цинка, кобальта и

Табл. 2

Максимальные количественно определенные концентрации металлов в воде по мониторинговым пунктам за 2022–2025 годы, мг/дм³

Элемент	ПДК	К	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Fe	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,30
Zn	0,010	0,017	0,019	0,023	0,025	0,027
Cd	0,005	0,0022	0,0024	0,0028	0,0032	0,0034
Co	0,010	0,018	0,018	0,022	0,026	0,026
Cu	0,001	0,0020	0,0024	0,0028	0,0029	0,0030
As	0,050	0,028	0,026	0,032	0,042	0,040
Ni	0,010	0,015	0,013	0,017	0,024	0,023
Pb	0,006	0,0046	0,0046	0,0054	0,0070	0,0068
Cr	0,070	0,061	0,063	0,067	0,069	0,072

Примечание. Для каждого пункта приведено максимальное значение среднего по трем аналитическим параллелям, зарегистрированное в один из сезонных сроков отбора 2022–2025 годов. Курсивом выделены значения, превышающие рыбохозяйственные ПДК по приказу Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296.

меди наиболее высокие максимумы также приходились на нижнюю часть исследуемого ряда.

Для никеля максимальные количественно определенные значения превышали ПДК на всех пунктах, причем наибольшее отмечено в пункте № 3. Для свинца превышение ПДК появлялось только в пунктах № 3–4, для хрома – только в пункте № 4. Количественно определенные значения кадмия и мышьяка нигде не превышали ПДК. Таким образом, для ряда металлов пространственная тенденция к повышению концентраций в направлении пунктов № 3–4 сохранялась независимо от наличия отдельных превышений уже в верхнем створе.

Наличие превышений ПДК в пункте К показывает, что вода, поступающая на исследуемый участок сверху по течению, уже несет определенную антропогенную нагрузку. Вместе с тем дальнейшее увеличение концентраций к пунктам № 3–4 указывает на дополнительный локальный вклад в пределах исследуемого участка. Поэтому выявленный градиент рассматривается как характеристика приращения загрязнения по ходу течения, а не как сопоставление с условно «чистым» фоном [7, 8, 12, 15].

Сезонность наиболее отчетливо проявлялась у железа, цинка и нефтепродуктов: повышенные уровни чаще приходились на теплый период. Сочетание сезонной и пространственной изменчивости согласуется с усилением поступления и перераспределения загрязняющих веществ при изменении гидрологического режима и условий взаимодействия воды с донными отложениями [10, 12].

Среднее содержание нефтепродуктов в воде на исследуемом участке р. Волги по мониторинговым пунктам и сезонам за 2022–2025 гг. представлено на рис. 3.

Для нефтепродуктов пространственный градиент выражен сильнее, чем для большинства металлов: содержание возрастает от пункта К к пункту № 4, а максимальные значения на всех пунктах приходятся на лето (рис. 3). В пункте К ПДК не превышалась; в пунктах № 1–2 превышения характерны для теплых сезонов, а в пунктах № 3–4 сохраняются во все четыре сезона.

Такая согласованная пространственно-сезонная картина указывает на дополнительную локальную нефтяную нагрузку в пределах исследуемого участка. Вместе с тем данные мониторинга не позволяют количественно разделить вклад Ильинских нефтей, судоходства, берегового стока и других возможных источников; для этого необходим анализ состава загрязнителей и путей переноса.

Результаты мониторинга донных отложений

Наиболее высокие годовые значения нефтепродуктов и большинства определяемых металлов в донных отложениях приходились на 2023 год (рис. 4). Синхронное повышение компонентов различной химической природы указывает на период усиленного поступления и/или накопления загрязняющих веществ в донном материале.

Анализ донных отложений подтверждает устойчивое присутствие нефтяных компонентов и металлов в

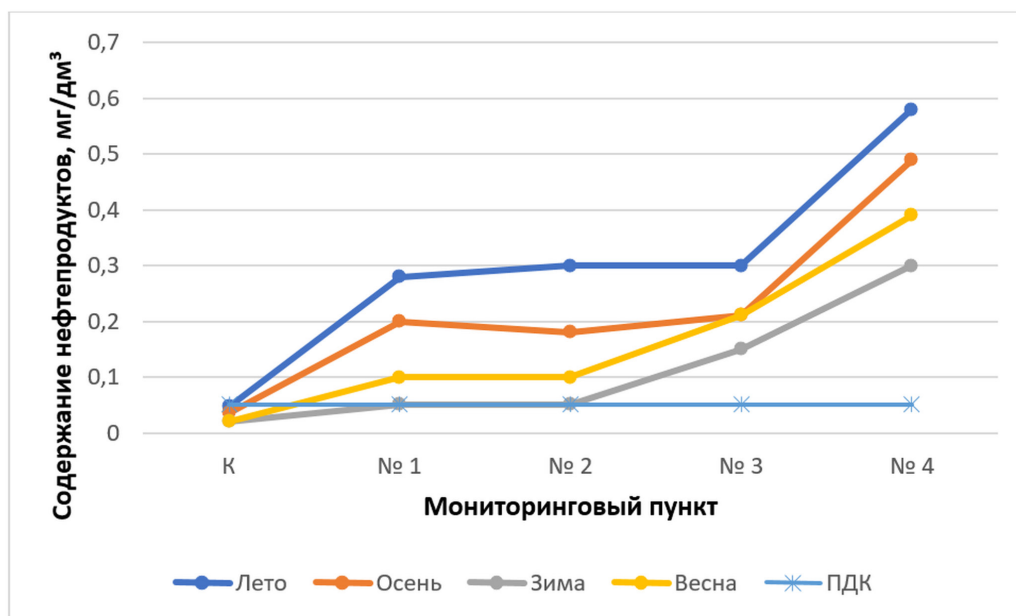


Рис. 3. Сводная сезонная динамика содержания нефтепродуктов в воде на мониторинговых пунктах по данным 2022–2025 годов. Горизонтальная линия соответствует ПДК 0,05 мг/дм³

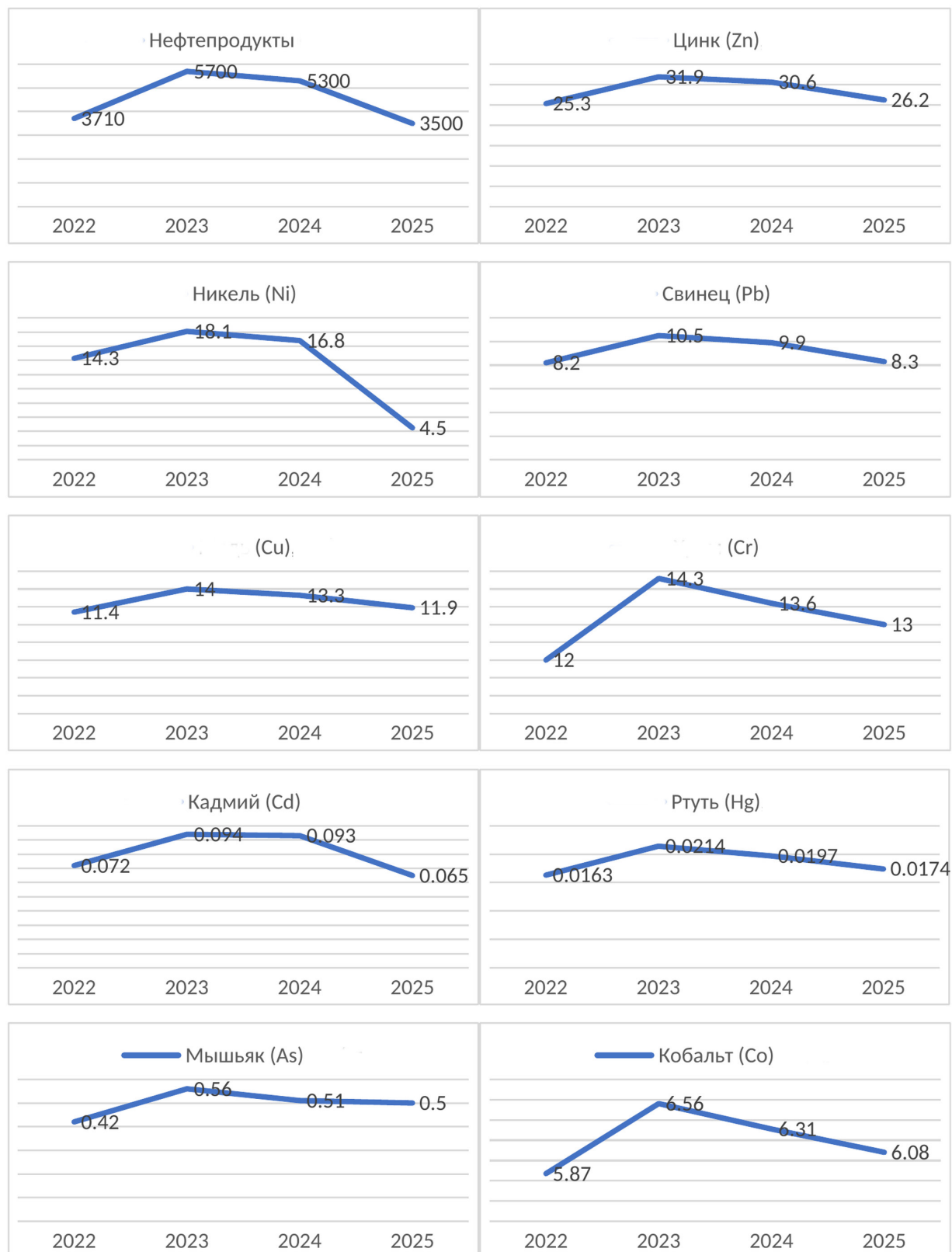


Рис. 4. Годовые агрегированные значения содержания нефтепродуктов и тяжелых металлов в донных отложениях за 2022–2025 годв. Ось X – год наблюдений; ось Y – содержание компонента, мг/кг.

донном материале и его роль как депо накопленной техногенной нагрузки. Снижение уровней после 2023 года может быть связано с изменением условий осадконакопления и гидрологического режима; при последующем нарушении донного слоя часть связанных загрязняющих веществ способна вновь вовлекаться в водную фазу [9, 10, 11, 17, 18].

Заключение

Мониторинг содержания нефтепродуктов и металлов в р. Волге на участке вблизи Ильинских нефтей в 2022–2025 годах выявил локальное усиление загрязнения воды вниз по течению. Наиболее устойчиво эта закономерность проявлялась для железа, цинка и особенно нефтепродуктов; для нефтепродуктов одновременно отмечался летний максимум. Кобальт и медь в воде часто превышали ПДК, никель и свинец – в отдельных количественно определенных пробах, хром – единично; для кадмия и мышьяка превышений не выявлено.

В донных отложениях нефтепродукты и металлы устойчиво сохранялись на измеряемых уровнях, причем для большинства компонентов годовой максимум приходился на 2023 год. Это подтверждает способность

донного материала аккумулировать загрязняющие вещества и отражать накопленную техногенную нагрузку на исследуемый участок.

Совокупность результатов характеризует исследуемый участок как зону локальной и сезонно изменчивой техногенной нагрузки. Пространственная картина указывает на дополнительное загрязнение в районе пунктов № 3–4 на фоне нагрузки, уже присутствующей в верхнем сравнительном створе, и согласуется с потенциальным влиянием объекта накопленного экологического вреда. Ситуация не является уникальной: аналогичные исторические нефтешламонакопители в водоохранной зоне р. Кизань («Соколовские ямы») также характеризовались выраженным загрязнением нефтепродуктами и риском их поступления в водоток [6]. Поэтому результаты имеют значение не только для локальной характеристики Ильинских нефтей, но и для оценки экологических рисков подобных объектов накопленного вреда в водоохраных зонах. Полученные данные могут использоваться как исходная характеристика при обосновании ликвидации накопленного экологического вреда, рекультивации территории Ильинских нефтей и последующем контроле эффективности выполненных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

Список русскоязычной литературы

1. Васильева ЕГ, Мельник ИВ. Оценка состояния водоохраных зон р. Волги в районе п. Ильинка (Астраханская область). Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2021;(4):91-7. DOI: 10.24143/2073-5529-2021-4-91-97.
2. Кудрявцева ВА, Попова ТА, Шигаева ТД. Исследование пространственно-временной динамики аккумуляции тяжелых металлов в донных отложениях Чёрной речки в пределах урбанизированной территории Санкт-Петербурга. / Биосфера. 2026;18(1):43-52. DOI: 10.24855/biosfera.v18i1.1035.
3. Нгуен Нгок Ан, Абакумова ЕН. Оценка качественного состава нефтешламов Ильинских ям (Астраханская область). В кн.: Наука и практика – 2023: материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции, Астрахань, 13–17 ноября 2023 г. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2024. С. 90–93.
4. Паршина ЕИ. Экология энергетики: учебное пособие (лабораторный практикум). Сыктывкар: СЛИ, 2022.
5. Щепеткова КМ, Батоцыренова ЕГ, Кашуро ВА, Хальчицкий СЕ. Биохимические аспекты нейротоксичности ртути в экспериментальном ис-

следовании. Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2025; 18(2):206-15.

6. Пюрбеева ЗЮ, Котельников АВ. Содержание нефтепродуктов и токсичность почвы нефтешламонакопителей «Соколовские ямы», расположенных в водоохранной зоне реки Кизань. Современные проблемы науки и образования. 2017;(2). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26309> (дата обращения: 20.08.2026).

Общий список литературы / Reference List

1. Vasilieva EG, Melnik IV. [Assessing state of water protection zones of Volga River within Ilyinka village area]. Vestnik Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya: Rybnoye Khoziaystvo. 2021;(4):91-7. doi:10.24143/2073-5529-2021-4-91-97. (In Russ.)
2. Kudryavtseva VA, Popova TA, Shigaeva TD. [Spatial-temporal dynamics of heavy metal accumulation in bottom sediments of the Chernaya River within the urbanized territory of St. Petersburg]. Biosfera. 2026;18(1):43-52. doi:10.24855/biosfera.v18i1.1035. (In Russ.)
3. Nguyen Ngok An, Abakumova EN. [Assessment of the qualitative composition of oil sludge from the Ilyinsky pits (Astrakhan Region)]. In: Nauka

- i Praktika – 2023: Materialy Vserossiyskoy Mezhdistsiplinarnoy Nauchnoy Konferentsii. Astrakhan: ASTU Publishing House; 2024. P. 90-3. (In Russ.)
4. Parshina EI. Ekologiya Energetiki: Uchebnoye Posobiye (Laboratornyi Praktikum) [Ecology of Energetics: Laboratory Manual]. 2nd ed. Syktyvkar: SLI; 2022. 222 p. (In Russ.)
5. Shchepetkova KM, Batotsyrenova EG, Kashuro VA, Khalchitskiy SE. [Biochemical aspects of mercury neurotoxicity in an experimental study]. Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta Biologiya. 2025;18(2):206-15. (In Russ.)
6. Pyurbееva ZYu, Kotelnikov AV. [Petroleum product content and soil toxicity of the Sokolovskie oil-sludge storage pits located in the water-protection zone of the Kizan River]. Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya. 2017;(2). Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26309>. (In Russ.)
7. Brekhovskikh VF, Katunin DN, Ostrovskaya EA, Perkal'skii VM, Popova OV. Heavy metal transportation and accumulation processes in the Lower Volga River. Water Resources. 1999;26(4):400-10.
8. Brekhovskikh VF, Volkova ZV, Katunin DN, Kazmiruk VD, Kazmiruk TN, Ostrovskaya EV. Heavy metals in bottom sediment in the Upper and Lower Volga. Water Resources. 2002;29:539-47. doi:10.1023/A:1020377915283.
9. Calmano W, Hong J, Förstner U. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. Water Sci Technol. 1993;28(8–9):223-35. doi:10.2166/wst.1993.0622.
10. Ciszewski D, Grygar TM. A review of flood-related storage and remobilization of heavy metal pollutants in river systems. Water Air Soil Pollut. 2016;227:239. doi:10.1007/s11270-016-2934-8.
11. Eggleton J, Thomas KV. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. Environ Int. 2004;30(7):973-80. doi:10.1016/j.envint.2004.03.001.
12. Lychagin MYu, Tkachenko AN, Kasimov NS, Kronenberg SB. Heavy metals in the water, plants, and bottom sediments of the Volga River mouth area. J Coast Res. 2015;31(4):859-68. doi:10.2112/JCOASTRES-D-12-00194.1.
13. Moiseenko TI, Gashkina NA, Sharova YuN, Pokoeva AG. Ecotoxicological assessment of after-effects of the Volga River water contamination. Water Resources. 2005;32(4):369-83. doi:10.1007/s11268-005-0048-6.
14. Moiseenko TI, Gashkina NA. Bioaccumulation of mercury in fish as indicator of water pollution. Geochem Int. 2016;54:485-93. doi:10.1134/S0016702916060045.
15. Savenko AV, Brekhovskikh VF, Pokrovskii OS. Migration of dissolved trace elements in the mixing zone between Volga River water and Caspian seawater: results of observations over many years. Geochem Int. 2014;52:533-47. doi:10.1134/S0016702914070064.
16. Savenko AV, Brekhovskikh VF, Pokrovsky OS. Macro- and microelement water composition of the Volga River Delta and its interannual variability. Arid Ecosyst. 2016;6:8-17. doi:10.1134/S2079096116010042.
17. Ye B, Zhang Z, Mao T. Petroleum hydrocarbon in surficial sediment from rivers and canals in Tianjin, China. Chemosphere. 2007;68(1):140-9. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.12.074.
18. Zhang C, Yu ZG, Zeng GM, Jiang M, Yang ZZ, Cui F, Zhu MY, Shen LQ, Hu L. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. Environ Int. 2014;73:270–281. doi:10.1016/j.envint.2014.08.010.





Подписано в печать **10.10.2026.**

Дата выхода в свет **18.10.2026.**

Отпечатано в **ООО «Типография Лесник»**

197183, г. Санкт-Петербург, ул. Сабировская, 37, Лит. Д, комната 206

Тел.: +7 (812) 649-73-14.

Тираж 30 экз.

Цена свободная

Адрес издателя и редакции:

197110, Санкт-Петербург, Большая Разночинная ул., д. 28; тел./факс: (812) 415-41-61

Учредитель: **Фонд научных исследований "XXI век"**

Главный редактор: **Розенберг Геннадий Самуилович**