

**2025**

**Т. 17, № 4**

**МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНЫЙ  
И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ**



# **БИОСФЕРА**

ISSN 2077-1371 / [www.21bs.ru](http://www.21bs.ru)

**ГРАВИТАЦИОННЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ  
НАСОС В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ  
ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ.**

**ПОДХОДЫ И РЕШЕНИЯ**

**А.А. Целентис, А.В. Федоров**

**GRAVITATIONAL CARBON PUMP IN THE  
NORTHEASTERN PART OF THE BLACK  
SEA. APPROACHES AND SOLUTIONS**

**A.A. Tselentis, A.V. Fedorov**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИВУЧАМИ  
АНТРОПОГЕННОГО ЛАНДШАФТА  
Г. ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО  
НА ЗИМОВКАХ В АВАЧИНСКОЙ  
БУХТЕ В 2020-2025 ГОДЫ**

**Е.С. Васюков, П.П. Снегур**

**THE USE OF THE ANTHROPOGENIC  
LANDSCAPE OF PETROPAVLOVSK-  
KAMCHATSKY BY STELLER SEA LIONS  
AT WINTERING GROUNDS IN AVACHA  
BAY IN 2020-2025**

**Ye.S. Vasiukov, P.P. Snegur**

**ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК НА ДИНАМИКУ  
ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ ПРИ  
ОДНОРОДНОМ РЕЖИМЕ ОСАДКОВ:  
МУЛЬТИСАЙТОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
В НИГЕРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
SOILGRIDS И ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ**

**Н.О. Нвоби**

**INVASION OF THE BARK BEETLE  
POLYGRAPHUS PROXIMUS  
AS A FACTOR OF DARK CONIFEROUS  
FORESTS DEGRADATION  
IN KRASNOYARSK TERRITORY**

**N.O. Nwobi**

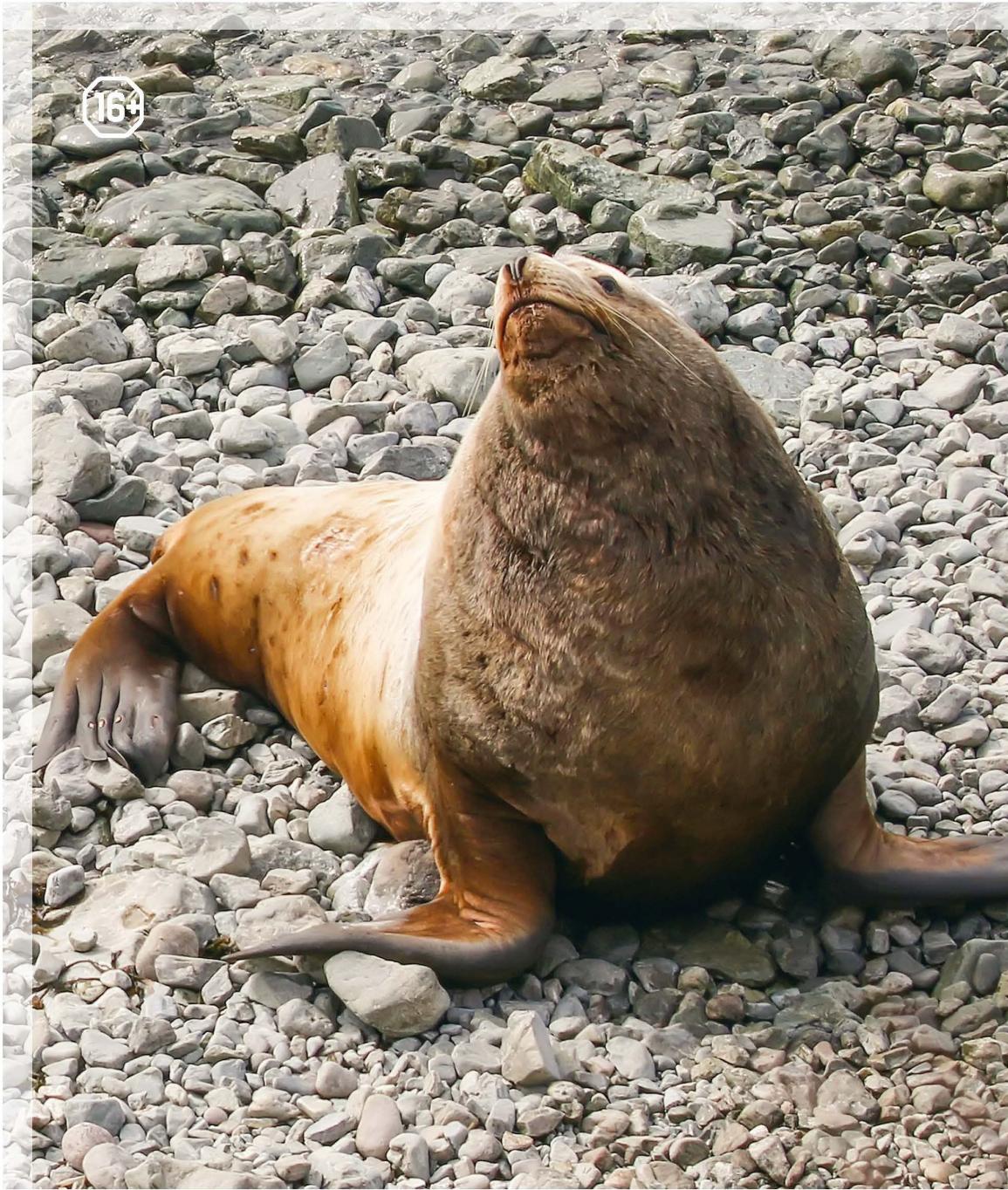


ФОТО: Е. С. ВАСЮКОВ



# БИОСФЕРА

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

**Том 17, № 4**

Санкт-Петербург

2025



# BIOSPHERE

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

**Vol. 17, No. 4**

Saint Petersburg

2025

# РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

## EDITORIAL BOARD

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР EDITOR-IN-CHIEF**

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

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF**

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

**СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ:**

**И.М. ТАТАРНИКОВА**

**EDITORIAL SECRETARY:**

**I.M. TATARNIKOVA**

**ДИЗАЙН: Е.А. КОРЧАГИНА**

**DESIGN: YE.A. KORCHAGINA**

**ВЕРСТКА: Т.А. СЛАЩЕВА**

**LAYOUT: T.A. SLASCHEVA**

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

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

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

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

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

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

**В.В. Глупов (Новосибирск) V.V. Glupov (Novosibirsk)**

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

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

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

**Т.Д. Зинченко (Тольятти) T.D. Zinchenko (Togliatti)**

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

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

**Л.М. Кавеленова (Самара) L.M. Kavelenova (Samara)**

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

**М. Клявинш (Рига, Латвия) M. Klavins (Riga, Latvia)**

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

**Г.Р. Кудоярова (Уфа) G.R. Kudoyarova (Ufa)**

**А.Ю. Кулагин (Уфа) A.Yu. Kulagin (Ufa)**

**М.Д. Магомедов (Махачкала) M.D. Magomedov (Makhachkala)**

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

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

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

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

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

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

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

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

**В. Реген (Берлин, Германия) W. Regen (Berlin, Germany)**

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

**А.Л. Рижинашвили (С.-Петербург) A.L. Rizhinashvili**

**Г.А. Софонов (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 (Birobidian)**

**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	<b>СОДЕРЖАНИЕ</b> CONTENTS		<b>GRAVITATIONAL CARBON PUMP IN THE NORTHEASTERN PART OF THE BLACK SEA. APPROACHES AND SOLUTIONS</b> A.A. Tselentis, A.V. Fedorov
<b>ПРАКТИКА / PRACTICE</b>			
240	<b>УСТАНОВКА "МЕЗОКОСМ" КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА "ГЕЛЕНДЖИК" В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ: ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ</b> С.Б. Куклев, В.А. Силкин, А.В. Федоров, В.В. Кременецкий, В.В. Очедник, В.В. Машура <i>THE EXPERIMENTAL INSTALLATION "MEZOKOSM" AT THE CARBON POLYGON "GELENDZHIK" IN KRASNODAR REGION: ITS DESIGN AND THE RESULTS OF EXPERIMENTS</i> S.B. Kuklev, V.A. Silkin, A.V. Fedorov, V.V. Kremenetskiy, V.V. Ochrednik, V.V. Mashura	287	<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИВУЧАМИ АНТРОПОГЕННОГО ЛАНДШАФТА</b> Г. ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО НА ЗИМОВКАХ В АВАЧИНСКОЙ БУХТЕ В 2020-2025 ГОДЫ Е.С. Васюков, П.П. Снегур <i>THE USE OF THE ANTHROPOGENIC LANDSCAPE OF PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY BY STELLER SEA LIONS AT WINTERING GROUNDS IN AVACHA BAY IN 2020-2025</i> Ye.S. Vasiukov, P.P. Snegur
250	<b>ОЗЕЛЕНЕННЫЕ ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА ГОРОДОВ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ УРОВНЯ КОМФОРТНОСТИ ПРОЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ Г. БИРОБИДЖАНА)</b> В.Б. Калманова, Д.В. Жучков <i>GREEN URBAN SPACES AS AN INDICATOR OF LIVABILITY IN BIROBIDZHAN</i> V.B. Kalmanova, D.V. Zhuchkov	301	<b>ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ДИНАМИКУ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ ПРИ ОДНОРОДНОМ РЕЖИМЕ ОСАДКОВ: МУЛЬТИСАЙТОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В НИГЕРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SOILGRIDS И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b> Н.О. Нвоби <i>SOIL CONTROLS OF GULLY EROSION DYNAMICS IN CONDITIONS OF UNIFORM RAINFALL REGIMES: A MULTI-SITE STUDY IN NIGERIA USING SOILGRIDS AND REMOTE SENSING</i> N.O. Nwobi
261	<b>ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОВСА ПОСЕВНОГО К АККУМУЛЯЦИИ СВИНЦА И КАДМИЯ</b> А.С. Петухов, Т.А. Кремлева, Н.А. Хритохин, Е.Д. Первухина <i>ASSESSMENT OF OAT RESISTANCE TO ACCUMULATION OF LEAD AND CADMIUM</i> A.S. Petukhov, T.A. Kremleva, N.A. Khritokhin, E.D. Pervukhina	324	<b>ИНВАЗИЯ УССУРИЙСКОГО ПОЛИГРАФА КАК ФАКТОР ДЕГРАДАЦИИ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ</b> С.М. Сультсон, П.В. Михайлов, П.А. Федонова, В.В. Попова, Н.Н. Кулакова <i>INVASION OF THE BARK BEETLE POLYGRAPHUS PROXIMUS AS A FACTOR OF DARK CONIFEROUS FORESTS DEGRADATION IN KRASNOYARSK TERRITORY</i> S.M. Sultson, P.V. Mikhaylov, P.A. Fedonova, V.V. Popova, N.N. Kulakova
<b>ПРИРОДА / NATURE</b>			
269	<b>ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС АЗОТА ПРИ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ КАК ДРАЙВЕР ЛЕТНЕГО НАКОПЛЕНИЯ БИОМАССЫ КРУПНЫХ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ: МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> Н.И. Есин, А.В. Федоров <i>VERTICAL NITROGEN TRANSFER UPON WEAK PERTURBATIONS AS A DRIVER OF SUMMER ACCUMULATION OF BIOMASS OF LARGE-CELLED DIATOMS: A SIMULATION STUDY</i> N.I. Yesin, A.V. Fedorov	330	<b>ЗДРАВООХРАНЕНИЕ / PUBLIC HEALTH</b>
279	<b>ГРАВИТАЦИОННЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ НАСОС В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ. ПОДХОДЫ И РЕШЕНИЯ</b> А.А. Целентис, А.В. Федоров		<b>НЕИНВАЗИВНЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЛЮДЕЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛОСАХ</b> Т.Г. Крупнова, О.В. Ракова, С.В. Гаврилкина <i>A NON-INVASIVE APPROACH TO ASSESSING ENVIRONMENTAL POLLUTION AND HUMAN HEALTH RISKS BASED ON THE CONTENT OF HEAVY METALS IN HAIR</i> T.G. Krupnova, O.V. Rakova, S.V. Gavrilkina

# УСТАНОВКА «МЕЗОКОСМ» КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА «ГЕЛЕНДЖИК» В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ: ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**С.Б. Куклев, В.А. Силкин, А.В. Федоров,  
В.В. Кременецкий, В.В. Очедник, В.В. Машура**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Эл. почта: [kuklev@ocean.ru](mailto:kuklev@ocean.ru)

Статья поступила в редакцию 15.10.2025; принята к печати 25.11.2025

В Южном отделении Института океанологии РАН разработана и изготовлена установка «Мезокосм», позволяющая проводить экспериментальные исследования с природной экосистемой *in situ*. Ее конструктивной особенностью является наличие трех ярусов с четырьмя закрытыми емкостями (77 л) на каждом ярусе. Глубина расположения ярусов регулируется с помощью движения по направляющим, прикрепленным к пирсу. Установка позволяет проводить многофакторные эксперименты, где освещенность является одним из факторов. В июле 2023 года был проведен эксперимент с природной водой, взятой на месте проведения опытов, с добавлением азота и фосфора во все ёмкости до концентраций 3.0 и 0,5 мкМ/л соответственно. После трех дней экспозиции концентрации этих элементов снизились до лимитирующих рост значений, биомасса доминирующих видов диатомовых водорослей достигала максимума в емкостях верхнего яруса (*Leptocylindrus danicus* – 2291 мг/м<sup>3</sup> и выше 70% биомассы диатомовых; *Pseudo-nitzschia* sp. – 246 мг/м<sup>3</sup>), существенно снижаясь с глубиной. Таким образом, освещенность является регулятором структуры и биомассы фитопланктона. Учитывая, что указанные виды обладают относительно большой длиной клетки и способны образовывать цепочки, гипотеза о селективном выедании как факторе регуляции размерной структуры имеет право на существование.

**Ключевые слова:** Черное море, карбоновый полигон “Геленджик”, установка “Мезокосм”, фитопланктон, диатомовые водоросли, кокколитофориды.

## THE EXPERIMENTAL INSTALLATION “MEZOKOSM” AT THE CARBON POLYGON “GELENDZHIK” IN KRAZNOUDAR REGION: ITS DESIGN AND THE RESULTS OF EXPERIMENTS

**S.B. Kuklev, V.A. Silkin, A.V. Fedorov, V.V. Kremenetskiy, V.V. Ochrednik, V.V. Mashura**

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, te Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Email: [kuklev@ocean.ru](mailto:kuklev@ocean.ru)

An experimental system named “Mesocosm” has been developed and manufactured at the Southern Branch of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The installation makes it possible to carry out *in situ* experiments with a natural ecosystem. Its design comprises three tiers with four closed containers (77 L) on each tier. The depth of the tiers is adjusted by moving by the rails attached to the pier. The installation allows for multifactorial experiments where one of the factors is illumination is. In July 2023, an experiment was conducted with natural water taken at the test site, with nitrogen and phosphorus added to all containers up to concentrations of 3.0 and 0.5  $\mu\text{M L}^{-1}$ , respectively. After three days of exposure, the concentrations of these nutrients decreased to growth-limiting values, and the biomass of the dominant species of diatoms reached a maximum in the upper-tier tanks (*Leptocylindrus danicus* – 2291  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  and over 70% of the biomass of diatoms; *Pseudo-nitzschia* sp. – 246  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), decreasing significantly with depth. Thus, illumination is a regulator of the structure and biomass of phytoplankton. Given that these species have a relatively long cell length and are capable of forming chains, the hypothesis the selective grazing is a factor in regulating the size structure is plausible.

**Keywords:** Black Sea, Gelendzhik carbon polygon, mesocosm, phytoplankton, diatoms, coccolithophores

## ВВЕДЕНИЕ

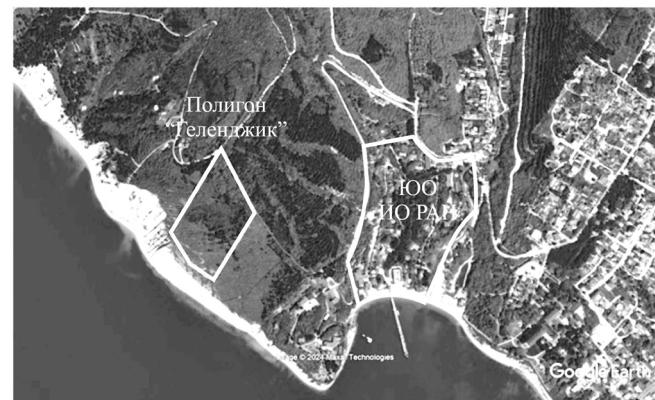
Океан поглощает примерно половину атмосферного углерода за год [6] и является важным фактором, регулирующим климат планеты. Это происходит благодаря функционированию биологического углеродного насоса (БУН) океана, который усваивает атмосферный углерод в переводит его в форму частиц, которые затем переносятся в глубокие слои океана [26]. БУН – это сложный набор физических и биологических процессов. В зависимости от механизма связывания атмосферного углерода, выделяют две помпы – органическую и карбонатную. Органическая помпа связывает атмосферный углерод в реакциях фотосинтеза с образованием органических веществ; результатом функционирования карбонатной помпы являются неорганические вещества, такие как кальциты.

Структура и функционирование БУН определяются локализацией, они изменяются с широтой, и существуют значительные сезонные вариации [4, 18]. Для выявления структуры БУН и понимания механизмов ее функционирования требуется набор методологических подходов, включающих в себя полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и математическое моделирование. Полевые наблюдения направлены на исследования естественных экосистем, в которых находят корреляции между параметрами окружающей среды и биологическими переменными. В шельфовой склоновой зоне северо-восточной части Черного моря такие исследования проводятся длительное время, и они выявили многолетнюю динамику фитопланктона [22, 15]. Однако установить причинно-следственные связи между структурой и факторами среды можно только с помощью экспериментальных методов с высокой степенью контролируемости окружающей среды. В лабораторных экспериментах исследуют реакции

отдельных видов и их сообществ на изменение абиотических факторов (bottom-up control). Они позволили выявить механизмы регуляции роста диатомовых и кокколитофорид, представляющих основу органической и карбонатной помп в Черном море [13, 21]. Однако интеграция строго контролируемых экспериментальных исследований и открытых полевых наблюдений представляет собой проблему из-за несоответствия между их пространственными и временными масштабами, и, как следствие, возникает неочевидность переноса полученных результатов на природные экосистемы. Проблему «контролируемость-реализм» можно решить с помощью экспериментов с ограниченной контролируемостью факторов среды, но более сложной по структуре экосистемой. Такой подход реализуется в так называемых мезокосмах, в которых часть природной экосистемы ограничивается физическими барьерами, обычно прозрачными стенками. Они получили широкое распространение для преодоления разрыва между простыми, но контролируемыми системами и сложными, но не контролируемыми морскими экосистемами [3, 11, 19, 20]. Основное достоинство этих систем состоит в том, что они способны учитывать влияние организмов более высоких трофических уровней (top-down control). Мезокосмы являются необходимым инструментом для реализации программы по карбоновому полигону, но до последнего времени он не применялся. Поэтому задачей стали разработка конструкции, сборка и испытания такой технически сложной системы, как мезокосм. Цель настоящей публикации – описать особенности конструкции установки «Мезокосм», разработанной и установленной в Южном отделении Института океанологии РАН (ЮО ИО РАН, г. Геленджик), представить ее возможности и результаты первых экспериментов, полученных с помощью нового инструмента карбоновых исследований.



а



б

Рис. 1. Расположение Карбонового полигона “Геленджик”: акватория морской составляющей полигона (а) и участок береговой составляющей полигона (б).

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

### Местоположение карбонового полигона

Карбоновый полигон «Геленджик» (ЮО ИО РАН, г. Геленджик) является одним из восьми полигонов, запущенных в рамках пилотного проекта Министерства науки и высшего образования РФ (Приказ №74 от 5 февраля 2021). Особенностью этого полигона является наличие как береговой, так и морской составляющих [2]. Полигон расположен в северо-восточной части побережья Черного моря Геленджикского района Краснодарского края района вблизи бухты Рыбацкая (Голубая бухта). Морская составляющая полигона, структурно входит в созданный ранее гидрофизический полигон «Геленджик» [1]. Размер полигона  $\sim 10 \times 15$  км. С северо-запада он ограничен створом Голубой (Рыбацкой) бухты, с юго-востока – мысом Идокопас (рис. 1а). Примыкающий к морю береговой участок полигона площадью 6 Га расположен северо-западнее Голубой бухты на удалении  $\sim 1$  км от основной территории ЮО ИО РАН (рис. 1б)

### Методики морских карбоновых исследований

При проведении полевых и экспериментальных исследований использовались стандартные методы отбора проб, их фиксации, осаждения и микроскопирования, принятые в ИО РАН (см. например, [14]). Идентификация видов проводилась

с помощью World Register of Marine Species (<http://www.marinespecies.org>). Клетки фитопланктона неизвестной таксономической принадлежности с размерами от 3 до 10 мкм были обозначены как «мелкие флагелляты». Биомасса клетки вычислялась по методике, представленной в работе Hillebrand [7].

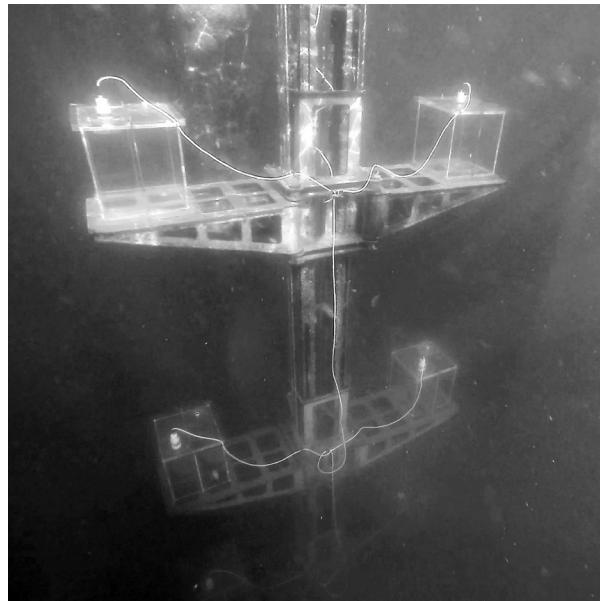
### Конструкция «Мезокосма»

Экспериментальная система «Мезокосм» является погружной и предназначена для проведения исследований *in situ*. В данной системе контролируются два фактора – температура среды и освещенность, которые соответствуют природной динамике. При ее разработке был изучен опыт создания подобных систем в мире (см. например [25]). Конструктивно система «Мезокосм» представляет собой металлическую ферму с подвижными платформами, установленной в глубоководной части пирса-стенда ЮО ИО РАН с глубиной моря 7 м (рис. 2). В отличие от наиболее распространенных плавающих конструкций [11] данная система является жесткой с регулируемой глубиной расположения платформ.

В конструкции системы предусмотрены три платформы (яруса), на каждой из которых устанавливаются до 4-х емкостей кубической формы из прозрачного оргстекла с объемом воды 77 л. (Рис. 3). Толщина стенок (10 мм) позволяет выдерживать внешнее давление. Каждый емкость оснащена регулируемой системой перемешивания воды, что позволяет изучать динамику экосистемы при



а



б

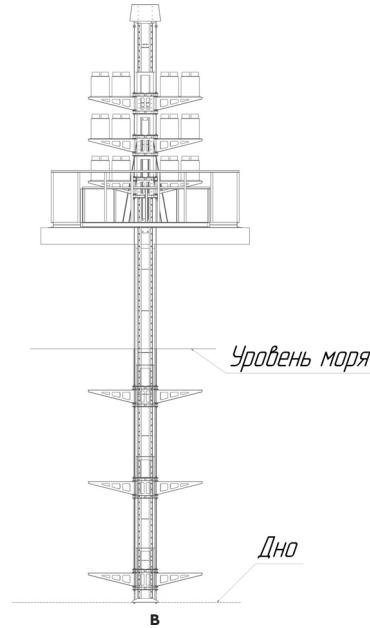


Рис. 2. «Мезокосм» на пирс-стенде ЮО ИО РАН (Черное море, бухта Рыбацкая, г. Геленджик): фото установки в надводном (а) и подводном (б) положениях, схема надводного и подводного положения платформ установки (в).

различном вертикальном обмене. В верхней стенке емкости имеется отверстие с крышкой, снабженной уплотнительными кольцами. Через это отверстие происходит заполнение водой и отбор проб.

Раздельная тросовая система позволяет размещать платформы на заданных горизонтах (Рис. 2в). Глубина погружения каждой платформы определяется длиной дистанционного троса, жестко закрепленного к верхней части мачты. Протяженность тросов рассчитана таким образом, что платформы с емкостями располагаются в приповерхностном, придонном и срединном слоях моря.

Такая система позволяет исследовать реакцию экосистемы на изменение интенсивности световых потоков. При этом для каждого уровня облученности приходится до четырех повторностей. Кроме того, на каждой платформе можно выделить два варианта с двумя повторностями в каждом. К примеру, в одном варианте повышают концентрацию азота, другой вариант используется как контрольный. Таким образом, система позволяет проводить многофакторные эксперименты с природными экосистемами.

С 24 по 27 июля 2023 года был проведен эксперимент по динамике фитопланктона в условиях различной освещенности при добавлении азота и фосфора. Для заполнения 6-ти емкостей (по 2 емкости на каждый из 3-х ярусов) исходную морскую воду, взятую на месте проведения эксперимента, фильтровали через газ с ячейй 0,5 мм для удаления крупных планктеров, частиц детрита извеси. Емкость экспериментальной системы «Мезокосм» представлена на рис. 3.

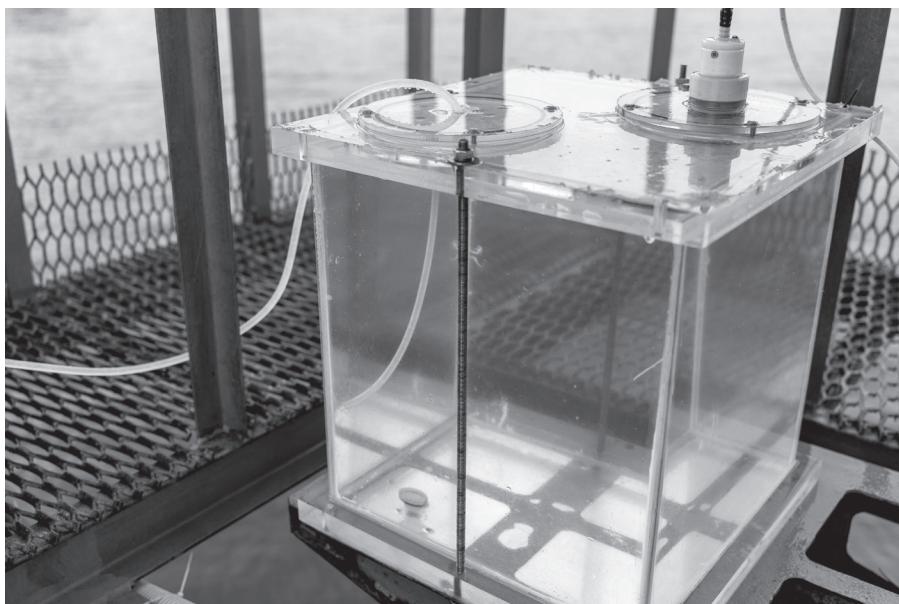


Рис. 3. Емкость установки «Мезокосм»

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Суточная динамика ФАР

Во время экспериментов проводили измерения фотосинтетически активной радиации (ФАР) датчиком, расположенным на пирс-стенде рядом с установкой. Для оценки изменения освещенности с глубиной на участке размещения установки «Мезокосм» выполнены суточные измерения ФАР погружным датчиком RBR Solo с логгером.

Падающая световая энергия изменяется с глубиной  $z$  в соответствии с экспоненциальным законом Kirk [8]:

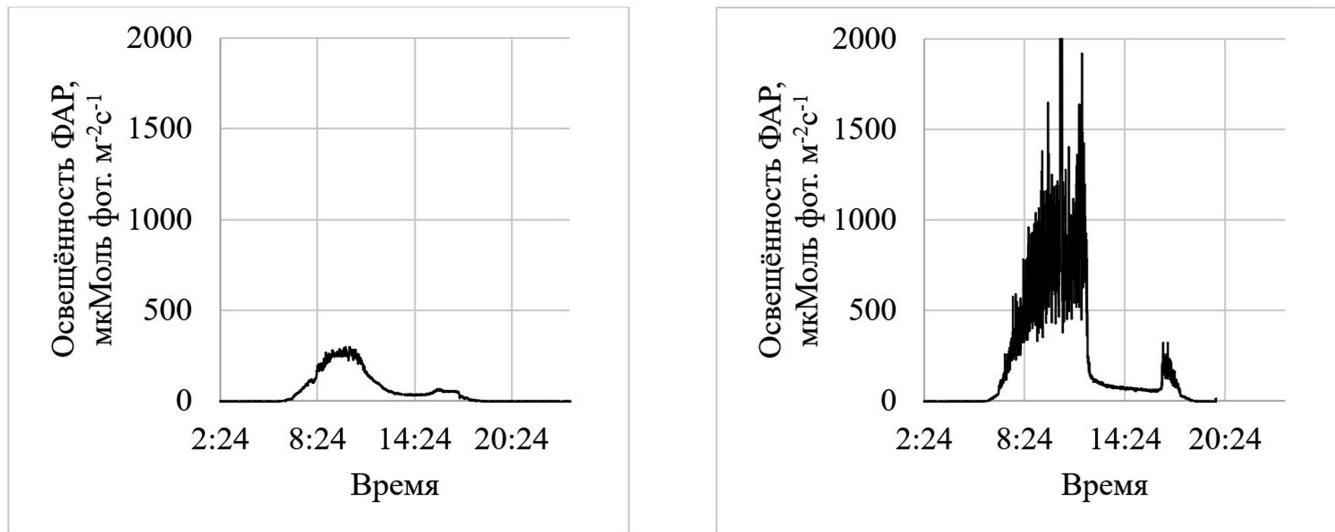
$$E_d(z) = E_d(0) \cdot e^{-K_d z} \quad (1)$$

где:  $E_d(0)$  – освещенность на поверхности моря;  $K_d$  – диффузионный коэффициент поглощения света.

На рис. 4 представлен пример динамики освещенности в нижнем и в верхнем ярусе установки «Мезокосм».

При прозрачности воды по диску Секки около 10 метров в Голубой бухте 20 и 21 сентября, суммарная суточная ФАР составляла 14,7 ммоль фотон  $m^{-2} \cdot$  сутки $^{-1}$  в верхнем приповерхностном ярусе (рис. 4б). Этот показатель в 3,4 раза больше, чем для нижнего яруса (4,36 ммоль фотон  $m^{-2} \cdot$  сутки $^{-1}$ ) (рис. 4а).

Диффузионный коэффициент поглощения света в Черном море изменяется по сезонам и зависит в первую очередь от численности кокколитофорид и свободных кокколит, которые определяют обратное рассеяние [9, 10]. Максимальная численность кокколитофорид и соответственно кокколит наблюдается в конце весны и начале лета и диффузионный коэффициент поглощения света может превышать 0,3  $m^{-1}$ , когда как в другие сезоны он меньше примерно в три раза.



**Рис. 4.** Динамика изменения освещенности ФАР для нижнего яруса «Мезокосма» (а) и верхнего яруса (б), записанная датчиком RBR Solo с логгером.

### Результаты эксперимента по динамике фитопланктона в условиях различной освещенности при добавлении азота и фосфора

#### Динамика концентраций элементов минерального питания.

Исходные концентрации в морской воде составляли 0,1 мкМ/л нитратного азота и 0,04 мкМ/л фосфатов и около 3 мкМ/л кремния. Во всех емкостях добавками довели концентрации нитратного азота до 3 мкМ/л и фосфатов до 0,5 мкМ/л. Кремний в емкости не вносился. Схема эксперимента представлена в табл. 1.

За время проведения эксперимента концентрации нитратного азота снизились практически до нуля во всех емкостях (Рис. 5) и, таким образом, азот становится лимитирующим фактором для роста фитопланктона.

Концентрация фосфатов уже к 26.07 становится ниже 0,1 мкМ/л и остается примерно на этом уровне и на следующий день (рис. 6).

Наиболее интенсивное снижение концентрации кремния наблюдалось в емкостях верхнего яруса, наименее в емкостях нижнего яруса (рис 7). Различие в кинетике снижения концентрации азота и фосфора с одной стороны и кремния с другой объясняются способность клеток накапливать азот и фосфор, что и явилось основой концепции внутриклеточной регуляции роста [5]. Кремний является конструктивным элементом для построения фрустул, в клетках он не накапливается. Его концентрация зависит от произведённой биомассы диатомовых водорослей, что и видно из результатов 26.07.2023 г.

#### Динамика фитопланктона

Природное сообщество было представлено смесью видов мелких колониальных диатомовых весеннего комплекса видов: *Leptocylindrus danicus* (0,41 млн кл/л, 187 мг/м<sup>3</sup>), *Pseudo-nitzschia spp.* (0,02 млн кл/л, 1,23 мг/м<sup>3</sup>) (табл. 2). На порядок меньший вклад вносили диатомовые водоросли рода *Chaetoceros*. Из крупных видов летнего комплекса была отмечена диатомовая

Табл. 1.

#### **Схема эксперимента по динамике фитопланктона в условиях различной освещенности при добавлении азота и фосфора (24.07–27.07 2023 года)**

Емкость №	1	2	3	4	5	6
Глубина, м	0,9	0,9	3,1	3,1	5,5	5,5
Перемешивание	есть	есть	есть	есть	есть	есть
Добавки N и P	есть	есть	есть	есть	есть	есть
Средняя температура воды (С°)	26,5	26,5	25,3	25,3	24,8	24,8

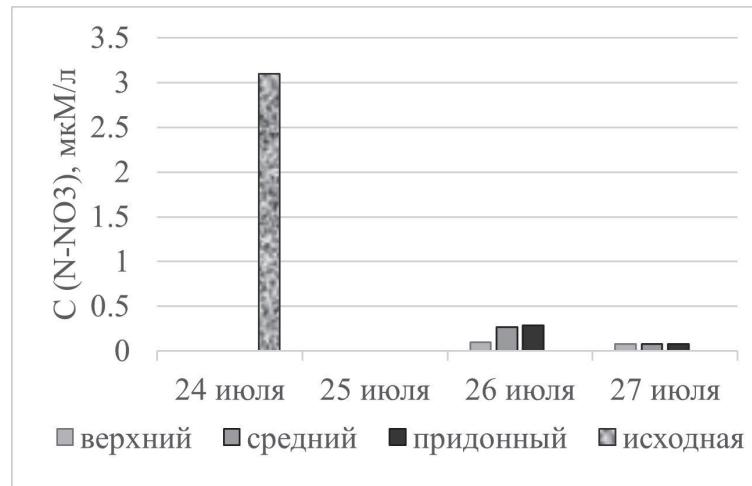


Рис 5. Динамика концентраций нитратного азота в емкостях верхнего, среднего и придонных ярусов.

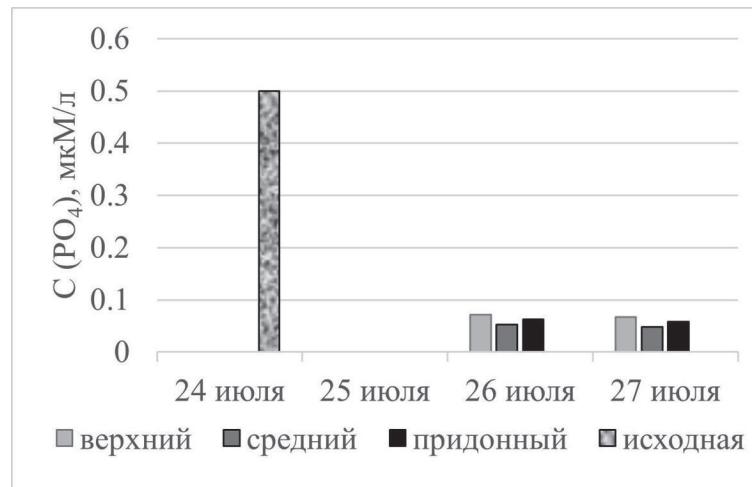


Рис 6. Динамика концентраций фосфатов в емкостях верхнего, среднего и придонных ярусов.

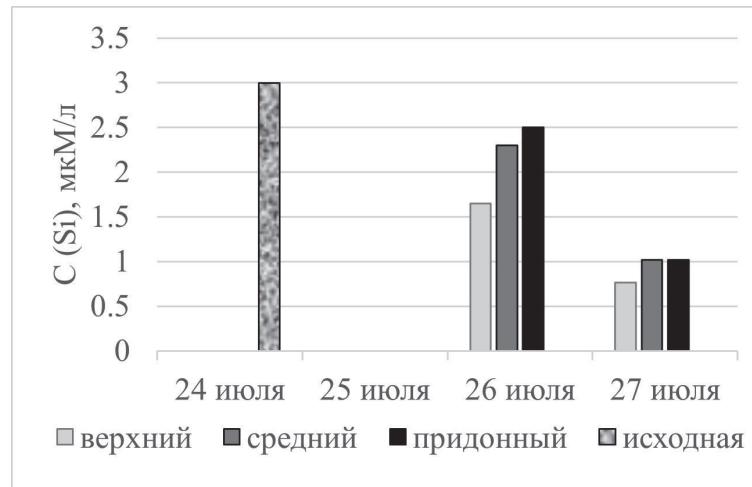


Рис 7. Динамика концентраций кремния в емкостях верхнего, среднего и придонных ярусов.

Табл. 2.

Биомасса фитопланктона в эксперименте (24.07–27.07 2023 года), мг/м<sup>3</sup>

Дата	24.07	26.07	26.07	26.07	26.07	26.07	26.07	27.07	27.07	27.07	27.07	27.07	27.07
Номер ёмкости	Конт.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<b>Диатомовые, массовые виды:</b>	245,5	993,9	2883,7	793,8	1677,6	1436,2	563,1	1658,0	2058,5	650,0	749,2	513,9	1426,0
<i>Leptocylindrus danicus</i>	187,1	706,2	2291,2	550,7	1300,3	1088,5	432,2	1328,7	1570,8	438,4	595,7	228,9	189,7
<i>Dactyliosolen fragilissimus</i>	0,0	101,2	177,9	17,1	101,1	63,6	36,3	45,9	37,8	66,6	29,6	27,5	45,7
<i>Pseudo-nitzschia caliantha</i>	22,9	17,6	11,7	45,2	50,2	15,8	23,4	193,7	246,2	31,4	5,1	12,9	26,6
<i>Cerataulina pelagica</i>	0,0	31,4	54,3	15,7	19,5	100,5	27,1	24,8	93,6	11,0	29,4	85,9	5,0
<i>Thalassionema nitzschiooides</i>	8,2	15,1	4,0	30,1	13,8	48,5	12,1	35,2	17,8	50,5	58,1	125,1	51,4
<i>Chaetoceros socialis</i>	1,5	5,0	140,7	0,0	0,0	0,0	0,0	17,0	45,1	0,0	1,0	0,3	0,0
<i>Chaetoceros trondsenii</i>	5,5	31,5	21,3	24,5	52,8	16,9	6,5	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Chaetoceros affinis</i>	0,0	16,9	26,5	62,3	0,0	35,9	0,0	0,6	3,0	0,0	11,8	0,0	0,0
<i>Chaetoceros simplex</i>	0,0	31,6	30,6	18,1	13,6	11,7	1,1	1,4	4,6	1,6	0,0	0,0	0,0
<i>Chaetoceros compressus</i>	0,0	0,0	96,2	6,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0
<i>Cylindroteca closterium</i>	0,9	11,7	12,6	1,6	25,4	8,5	0,9	2,9	14,3	2,6	9,7	0,7	1,7
<i>Chaetoceros minimus</i>	0,0	21,5	17,0	12,4	13,3	0,0	13,8	1,3	4,4	0,7	0,0	0,0	0,9
<b>Динофитовые, массовые виды:</b>	60,7	10,2	84,2	41,7	12,4	0,0	2,1	77,6	39,0	39,6	1,5	66,2	60,4
<i>Protoperidinium spp.</i>	45,3	4,1	50,9	16,6	12,4	0,0	0,0	19,0	15,5	15,2	1,1	13,9	20,8
<i>Prorocentrum cordatum</i>	45,3	4,1	20,7	16,6	12,4	0,0	0,0	9,9	10,9	3,5	1,1	11,1	9,1
<i>Prorocentrum compressum</i>	0,0	0,0	26,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	3,4
<i>Prorocentrum micans</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,3	3,0	0,0	0,0	2,6
<i>Prorocentrum minimum</i>	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3	5,3	0,0	2,8	1,6
<i>Gyrodinium spp.</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
<b>Кокколитофориды</b>	97,0	165,1	287,2	172,3	193,9	251,3	272,8	140,2	117,3	174,2	102,8	140,7	201,8
<i>Emiliania huxleyi</i>	97,0	165,1	287,2	172,3	193,9	251,3	272,8	140,2	117,3	174,2	102,8	140,7	201,8
<b>Прочие, массовые формы:</b>	15,2	121,4	175,2	271,8	205,3	124,3	128,1	61,0	49,6	34,2	41,8	70,4	66,6
Жгутиковые 3 мкм	2,1	16,3	21,7	32,0	21,5	17,0	17,0	4,5	9,2	7,9	8,7	7,8	21,0
Жгутиковые 5 мкм	5,4	69,8	69,8	148,3	57,6	47,1	55,0	8,0	15,3	9,8	18,0	28,2	14,2
Жгутиковые 7 мкм	5,9	14,4	83,8	28,7	21,5	43,1	14,4	8,8	25,1	6,7	12,3	8,8	9,8
Жгутиковые 10 мкм	0,0	20,9	0,0	62,8	104,7	0,0	41,9	38,3	0,0	9,8	2,7	25,6	19,0

водоросль *Pseudosolenia calcar-avis* (0,001 млн кл/л, 19 мг/м<sup>3</sup>). Численность и биомасса кокколитофориды *Emiliania huxleyi* была относительно низка (0,54 млн кл/л, 41 мг/м<sup>3</sup>). Из динофлагеллят заметную роль в формировании биомассы играла *Prorocentrum cordatum* (45,3 мг/м<sup>3</sup>).

Наибольший прирост показали диатомовые водоросли. Более половины от численности и биомассы всего фитопланктона пришлось на диатомовую водоросль *Leptocylindrus danicus* (70-80% от биомассы диатомовых), которая достигла максимальных значений в верхнем ярусе уже 26.07, т.е. на третьи сутки. При этом её биомасса возросла более чем в 10 раз на вернем ярусе, данная водоросль показывает самые высокие скорости роста среди конкурентов (0,835 сут<sup>-1</sup>). К 27.07 наблюдалась существенная разница по биомассе этого вида между ярусами (ANOVA,  $p = 0,004$ ).

Вторым видом диатомовых водорослей, внесшим существенный вклад в формирование биомассы фитопланктона, была *Pseudo-nitzschia spp*, которая росла только в емкостях только верхнего яруса (ANOVA,  $p=0.006$ ) (см. табл. 2).

Кокколитофорида *Emiliania huxleyi* повышала биомассу к 26.07 примерно в два раза, затем биомасса снизилась (табл. 2). Достоверных различий биомассы по ярусам не наблюдалось (ANOVA,  $p = 0,42$  для 26.07 и  $p = 0,58$  для 27.07).

К 26.07 наблюдался интенсивный рост биомассы мелких жгутиковых (более, чем в 10 раз), 27.07 их биомасса снижалась (см. табл. 2). Однако, существенные различия биомассы мелких жгутиковых между ярусами не было зафиксировано (ANOVA,  $p = 0,09$ ).

Для остальных видов значимых различий как по времени, так и по пространству не было обнаружено. Эти данные можно соотнести с результатами полевых и экспериментальных исследований, полученными ранее. Так многолетние наблюдения показали, что весной наблюдаются цветения мелкоклеточных диатомовых водорослей рода *Pseudo-nitzschia*, в прибрежных водах дополнительные цветут виды таких родов диатомового фитопланктона *Skeletonema* и *Chaetoceros* [22, 23]. Лабораторные эксперименты с природной популяцией фитопланктона показали, что добавление азота и фосфора приводит к доминированию мелкоклеточных диатомовых водорослей родов *Pseudo-nitzschia*, *Skeletonema* и *Chaetoceros*, а добавление только фосфора стимулирует рост кокколитофориды *Emiliania huxleyi* [21]. При том, что в лабораторных экспериментах хищники были искусственно удалены, наблюдался чистый эффект добавления азота и фосфора на структуру и динамику фитопланктона. Согласно схеме Маргалефа [12] при усилении вертикального обмена доминирующими формами становятся диатомеи.

В нашем эксперименте во всех емкостях представлена часть природной экосистемы, в которой присутствуют виды более высоких трофических уровней, оказывающие влияние на структуру фитопланктона. Поэтому была выдвинута гипотеза 1: селективное давление миксопланктона и зоопланктона определяло видовую и размерную структуру фитопланктона.

С учетом того, что в зависимости от положения яруса значительно изменялась подводная освещенность, имеет право на существование гипотеза 2: освещённость является важным регулятором количественных показателей фитопланктона.

Действительно, в наших экспериментах при добавлении азота и фосфора интенсивно росли два вида с небольшим объемом клетки. Но особенностью этих видов является высокая длина клеток при малом диаметре. Для *Pseudo-nitzschia* – 70 мкм, для *Leptocylindrus danicus* – 45 мкм. Вторая особенность заключается в способности образовывать цепочки, количество клеток в которых может достигать несколько десятков. Согласно концепции соразмерности хищника и жертвы в морских экосистемах [27] эти виды освобождены от давления мелкоразмерных хищников. Мелкоклеточные виды рода *Chaetoceros* и мелкие жгутиковые интенсивно выедаются мелкоразмерными хищниками. Важную роль в этом процессе играет миксопланктон, представленный главным образом фаготрофными динофлагеллятами [16, 17]. Таким образом, селективное выедание фитопланктона объясняет доминирование *Pseudo-nitzschia* и *Leptocylindrus danicus*. Этот результат не противоречит гипотезе 1. В отличие от лабораторных экспериментов опыты в установке «Мезокосм» позволили выявить эффект селективного выедания. Следует отметить, что селективное выедание как регулятор размерной структуры фитопланктона во время весеннего цветения был выявлен ранее также в мезокосмах [24].

Виды рода *Pseudo-nitzschia* интенсивно росли только в емкостях первого яруса, а биомасса *Leptocylindrus danicus* существенно снижалась с глубиной, что указывает на то, что освещенность является основным регулятором роста при отсутствии лимитирования азотом и фосфором. Интенсивность светового потока определяет, как биомассу фитопланктона, так и его структуру. Отсюда следует, что гипотеза 2 имеет право на существование.

**Благодарности** Работа выполнена в рамках темы государственного задания № FMWE-2024-0027 при поддержке в рамках темы государственного задания № FMWE-2023-0001. Авторы также выражают благодарность Благотворительному фонду Андрея Мельниченко за финансовую поддержку в приобретении научного оборудования, которое использовалось при выполнении работы.

## Литература

### Список русскоязычной литературы:

1. Зацепин АГ, Островский АГ, Кременецкий ВВ и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря. Известия РАН, ФАО. 2014;50(1): 16-29 doi:10.7726/izvran.geo.2014.01.02.
2. Куклев СБ, Кременецкий ВВ, Крыленко ВВ, Руднев ВИ Цифровая модель «Карбонового полигона в Краснодарском крае» на базе ЮО ИО РАН (г. Геленджик). Экология гидросферы. 2022;1(7):18-8. doi:10.33624/2587-9367-2022-1(7)-18-28.

### Общий список литературы / Reference List

1. Zatsepin AG, Ostrovskiy AG, Kremenetskiy VV et al. [Under-satellite polygon for studies of hydrophysical processes in the shelf slope zone of the Black Sea]. Izvestiya RAN FAO. 2014;50(1):16-29. (In Russ.) doi:10.7726/izvran.geo.2014.01.02.
2. Kuklev SB, Kremenetskiy VV, Krylenko VV, Rudnev VI [A digital model of the Carbon Polygon in Krasnoyarsk Region of the Southern Branch of Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences]. Ekologiya Gidrosfery. 2022; (7): 8-8. (In Russ.) doi:10.33624/2587-9367-2022-1(7)-18-28.
3. Bach LT, Taucher J, Boxhammer T et al. Influence of ocean acidification on a natural winter-to-summer plankton succession: first insights from a long-term mesocosm study draw attention to periods of low nutrient concentrations. PLoS One. 2016; 1(8): e0159068. doi:**10.1371/journal.pone.0159068**.
4. Boyd PW, Claustre H, Levy M et al. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. Nature. 2019;568(7752):327-5. doi:0000-0003-1674-3055.
5. Droop MR The nutrient status of algal cells in continuous culture. J Mar Biol Assoc UK. 1974;54(4): 825-55. doi:**10.1017/S002531540005760X**.
6. Falkowski PG. Ocean science: The power of plankton. Nature. 2012;483(7387):17-20. doi:10.1038/483S17a.
7. Hillebrand H, Durselen C, Kirschtel D et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. J Phycol. 1999;35:403-24. doi:10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.
8. Kirk JTO Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems (3rd ed.). Cambridge University Press. 2011; doi:10.1017/CBO9781139168212.
9. Kopelevich O, Burenkov V, Sheberstov S, Vazyulya S, Kravchishina M, Pautova L, Silkin V, Artemiev V, Grigoriev A. Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the Black Sea from Ocean Color Data. Remote Sens Environ. 2013;46:113-23. doi:10.1016/j.rse.2013.09.009.
10. Kopelevich OV, Sheberstov SV, Vazyulya SV. Effect of a Coccolithophore bloom on the underwater light field and the albedo of the water column. J Mar Sci Eng. 2020;8,456. doi:10.3390/jmse8060456.
11. Macaulay GM, Jeppesen E, Riebesell U et al. Addressing grand ecological challenges in aquatic ecosystems: how can mesocosms be used to advance solutions? Oikos. 2025; e11020. doi:10.1111/oik.11020.
12. Margalef R Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. Oceanologica Acta. 1978;1(4):493-509.
13. Mikaelyan AS, Silkin VA, Pautova LA Coccolithophorids in the Black Sea: their interannual and long-term changes. Oceanology. 2011;51:39-48. doi:10.21753/OOECH-12-3-280.
14. Mikaelyan AS, Pautova LA, Chasovnikov VK et al. Alternation of diatoms and coccolithophores in the northeastern Black Sea: a response to nutrient changes. Hydrobiologia. 2015;755:89-105. doi:10.1007/s10750-015-2219-z.
15. Mikaelyan AS, Sergeeva AV, Pautova LA et al. 75-Year dynamics of the black sea phytoplankton in association with eutrophication and climate change. Sci Total Environ. 2024;176448. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.176448.
16. Mitra A, Flynn KJ, Stoecker DK, Raven JA Trait trade-offs in phagotrophic microalgae: the mixoplankton conundrum. Eur J Phycol. 2023. doi:10.1080/09670262.2023.2216259.
17. Mitra A, Caron DA, Faure E et al. The Mixoplankton Database (MDB): diversity of photo-phago-trophic plankton in form, function, and distribution across the global ocean. J Eukaryot Microbiol 2023;70:e12972. doi:10.1111/jeu.12972.
18. Nowicki M, DeVries T, Siegel DA Quantifying the carbon export and sequestration pathways of the ocean's biological carbon pump. Global Biogeochem Cycles. 2022; 36(3): e2021GB007083. doi:10.1029/2021GB007083.
19. Pansch C, Hiebenthal C A new mesocosm system to study the effects of environmental variability on marine species and communities. Limnol Oceanogr Methods. 2019;17:145-62. doi:10.1002/lom3.10306.
20. Sagarin RD, Adams J, Blanchette CA et al. Between control and complexity: opportunities and challenges for marine mesocosms. Front Ecol Environ. 2016;14(7):389-96. doi:10.1002/FEE.1313.

21. Silkin, VA, Pautova, LA, Pakhomova, SV, Lifan-chuk, AV, Yakushev, EV, Chasovnikov, VK Environmental control on phytoplankton community structure in the NE Black Sea. *J Exp Mar Biol Ecol* 2014;61:267-74. doi:10.1016/j.jembe.2014.08.009.
22. Silkin VA, Pautova LA, Giordano M et al. Drivers of phytoplankton blooms in the northeastern Black Sea *Mar Pollut Bull.* 2019;38:274-84. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.11.042.
23. Silkin V, Mikaelyan AS, Pautova L, Fedorov A. Annual dynamics of phytoplankton in the Black Sea in relation to wind exposure. *J Mar Sci Eng.* 2021;9:1435. doi:10.3390/jmse9121435.
24. Sommer U, Lewandowska A. Climate change and the phytoplankton spring bloom: warming and overwintering zooplankton have similar effects on phytoplankton. *Glob Change Biol.* 2011;17:154-62. doi:[10.1111/j.1365-2486.2010.02182.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02182.x).
25. Stewart RIA, Dossena M, Bohan DA et al. Mesocosm experiments as a tool for ecological climate-change research. *Adv Ecol Res.* 2013;48:171-81. doi:10.1016/B978-0-12-398328-6.00008-2
26. Volk T, Hoffert MI Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO<sub>2</sub> changes. In: *The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub> Natural Variations Archean to Present.* Washington, D.C.: AGU: 1985. P. 99-110.
27. Wirtz KW. Who is eating whom? Morphology and feeding type determine the size relation between planktonic predators and their ideal prey. *Mar Ecol Prog Ser.* 2012;445:1-12. doi:10.3354/meps09445.



УДК 581.5:911.37(571.6)

CC BY-NC 4.0

© В.Б. Калманова, Д.В. Жучков; ФНИ «XXI век»

# ОЗЕЛЕНЁННЫЕ ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА ГОРОДОВ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ УРОВНЯ КОМФОРТНОСТИ ПРОЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ г. БИРОБИДЖАНА)

**В.Б. Калманова, Д.В. Жучков\***

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН

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

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; принята к печати 07.11.2025

Представлены результаты комплексного анализа состояния общественных пространств города Биробиджана Еврейской автономной области. В официальный перечень включено 108 таких объектов. Открытые общественные пространства в Биробиджане представлены детскими (37 объектов) и спортивными (24) площадками свободного доступа, благоустроенным и неблагоустроенным озеленёнными территориями общего пользования. По площади доминируют неблагоустроенные озеленённые территории (50% от общей площади открытых общественных пространств): пустыри, захламленные и иные бесхозные территории, отведённые под потенциальное благоустройство. Выявлены особенности планировочной организации общественных пространств и их современного использования. По территории города они распределены неравномерно – 72% сосредоточено в густонаселенном центральном планировочном районе. В условиях сложившейся планировочной структуры, в городе нет единой системы взаимосвязанных общественных пространств, которая могла бы обеспечить комфортную среду для жизнедеятельности населения. Уровень озеленения рассматриваемых объектов не соответствует установленному нормативу площади озеленения (более 50% от общего количества). Кроме того, более 40% жителей Биробиджана лишены возможности посещать благоустроенные озеленённые общественные пространства в радиусе 5-, 10-, и 15-ти минут пешей доступности, за исключением горожан, проживающих в районе исторического центра. Результаты исследования и предложенные рекомендации по улучшению уровня комфортного проживания населения могут быть использованы органами государственной власти и местного самоуправления для разработки документов стратегического городского планирования и их актуализации.

**Ключевые слова:** общественное пространство, общественное озеленённое пространство, озеленённые территории общего пользования, зелёные насаждения, функции зелёных насаждений, экологическое состояние дендрофлоры, пешая доступность, г. Биробиджан.

## GREEN URBAN SPACES AS AN INDICATOR OF LIVABILITY IN BIROBIDZHAN

**V.B. Kalmanova, D.V. Zhuchkov\***

Institute of Comprehensive Analysis of Regional Problems, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences

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

Presented are the results of a comprehensive analysis of the state of public spaces in the city of Birobidzhan, Jewish Autonomous Region of the Russian Federation. The list of public spaces in the city includes 108 objects. Open public spaces in Birobidzhan are represented by freely accessed playgrounds (37 items) and sports areas (24) and landscaped and unsettled green areas. In terms of areas, the unsettled landscaped areas dominate (50% of the total area of open public spaces). They include wastelands and cluttered and other abandoned territories designated for potential landscaping. The study revealed the features of the planning organization of public spaces, with an emphasis on green public spaces and their modern use. Public spaces are unevenly distributed throughout the city, with 72% concentrated in a densely populated central planning area. Under the current planning structure, there is no unified system of interconnected public spaces in the city that could provide a comfortable environment for life. The level of landscaping of the objects under consideration does not correspond to the established standard of landscaping areas (more than 50% of the total). In addition, more than 40% of Birobidzhan residents are deprived of the opportunity to visit landscaped public spaces within a 5-, 10-, or 15-minute walking distance, except for citizens living in the historical center. The results of the study and the recommendations proposed for improving the level of comfortable living can be used by state authorities and local governments to develop strategic urban planning documents and update them.

**Keywords:** public space, public green space, green areas of common use, green space, functions of green space, ecological conditions, dendroflora, walking distance, Birobidzhan

## Введение

Урбанизация как одна из ключевых тенденций развития современного общества проявляется в расширении городских ландшафтов и росте численности городского населения [4, 16, 18, 20, 35]. Этот процесс сопровождается значительными экологическими последствиями, в том числе трансформацией природных экосистем, сокращением биоразнообразия, разрушением среды обитания живых организмов, увеличением содержания поллютантов в природных компонентах, изменением энергетических потоков. Одним из эффективных способов снижения негативного воздействия урбанизации и повышения уровня комфорtnого проживания горожан является развитие сети общественных озеленённых пространств [3, 9, 16, 19, 27, 28, 31, 33].

Термин «общественные пространства» включает городские территории, доступные для всех категорий населения и предназначенные для рекреации, досуга и общения [29, 35]. В градостроительной практике их разделяют на открытые (парки, скверы, бульвары, аллеи, детские и спортивные площадки) и закрытые общественные пространства (территории, находящиеся в ведении административных, социальных или коммерческих структур, что ограничивает их свободное использование) [2, 19, 29, 31, 33, 35]. В городской застройке особое значение имеют общественные пространства с преобладанием зелёных насаждений, выполняющих средоформирующие и средостабилизирующие функции [10, 13, 15, 27, 28, 35].

Зарубежный опыт свидетельствует об актуальности вопросов, связанных с оптимизацией городского пространства, включая организацию рекреационных зон. В таких городах, как Лондон, Бостон, Париж, Пекин, городские зоны отдыха рассматриваются в качестве стратегических объектов территориального планирования и зелёной инфраструктуры [8, 34].

В Указе Президента Российской Федерации «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»<sup>1</sup> утверждены направления устойчивого развития страны [6, 7]. Одним из векторов государственной политики РФ является ускоренное развитие Дальнего Востока России, повышение качества жизни и закрепление населения в регионах [10]. Ввиду того, что 75% населения страны (такой же показатель и на Дальнем Востоке России) проживает в городах, особую важность приобретают меры по реконструкции и созданию новых общественных пространств [30]. В настоящее время в больших и крупных городах страны фиксируется дефицит зелёных зон [18, 23], а в малых

и средних – недостаток или отсутствие благоустроенных пространств для отдыха [21]. Среди ключевых проблем экосистем городов – исторически сложившаяся планировочная структура, модернизация которой зачастую оказывается невозможной, преобладание и продолжающееся развитие точечной застройки, а также неравномерное распределение рекреационных зон, которые обычно сосредоточены в центрах городов, оставляя периферийные районы без доступа для полноценного отдыха населения [1, 5, 20].

В концепциях современного урбанизма основной задачей является не только организация новых общественных пространств, но и обеспечение их доступности. В этом аспекте широкую известность получила идея «15-минутного города» Карлоса Морено [34], основанная на том, что основные общественные объекты для комфортной жизни должны размещаться в пределах 15-минутной ходьбы от дома. В России разработаны аналогичные подходы, реализуемые в рамках таких инициатив, как программа мэра Москвы «Мой район», концепция «Зелёный Новосибирск», стандарты комплексного развития общественных озеленённых пространств в Екатеринбурге, индекс качества городской среды<sup>2</sup> и другие [12, 18, 26, 31, 32]. В своде правил (СП) 82.13330.2016 приводятся нормы 20-минутной доступности для городских парков и 15-минутной для парков в пределах планировочных районов. Дополнительно консалтинговая компания «Стрелка»<sup>3</sup> предлагает учитывать уникальные особенности городов страны и демографическую структуру, рекомендуя 5-, 10- и 15-минутные интервалы доступности для пешеходов и 20-минутные – для транспорта.

Помимо доступности, важным аспектом является благоустройство общественных пространств. Согласно СП 82.13330.2016, термин «благоустройство» включает комплекс работ по озеленению, прокладке тротуаров и велосипедных дорожек, установке малых архитектурных форм, освещению и улучшению функциональных, санитарных, экологических и эстетических характеристик территории. Однако исследования выявляют проблемы в этой сфере: например, в Хабаровске отмечаются противоречия между идеями ландшафтных дизайнеров и нормами благоустройства, приведённых в различных градостроительных сводах правил [9], а в Севастополе около 33% общественных пространств города находятся в неудовлетворительном состоянии [23]. В малых и средних городах ситуация усугубляется недостаточным финансированием соответствующих работ.

<sup>2</sup> Индекс качества городской среды. URL: <https://индекс-городов.рф/#/cities/10033> (дата обращения 09.06.2025)

<sup>3</sup> Стандарт комплексного развития территорий URL: <https://дом.рф/urban/standards/printsiipy-kompleksnogo-razvitiya-territoriy/> (дата обращения 20.05.2025)

<sup>1</sup> Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015?ysclid=mbr77lhw1w901706921>

Большинство городов Дальнего Востока России (ДВР), особенно малые и средние, исторически формировались как административные и промышленные центры, часто без учёта природных особенностей, что в дальнейшем сказалось на экологическом состоянии окружающей среды [14, 17]. Например, в Биробиджане интенсивная застройка в 1950–1980-х годов привела к отсутствию буферных зон между промышленными и жилыми территориями, ухудшив экологическую обстановку и распределение зелёных насаждений.

В настоящей работе был проведён детальный анализ размещения и доступности ключевых общественных озелененных пространств города, с акцентом на озеленённые территории. Цель работы – оценка состояния общественных пространств г. Биробиджана, с учётом их доступности, благоустройства и роли в формировании комфортной городской среды.

### **Объект, материалы и методы исследования.**

Среди городов ДВР Биробиджан был выбран в качестве объекта исследования как типичный средний город с ярко выраженной полифункциональной структурой. Планировочная организация города имеет ряд недостатков: хаотичное расположение промышленных и жилых зон, отсутствие санитарно-защитных зон и преобладание точечной застройки, что привело к осложнению экологической обстановки в городе, снизив уровень комфорта проживания, а также негативно повлияло на состояние зелёных насаждений [14, 15]. Активное строительство жилых зданий, торгово-развлекательных центров, расширение и ремонт автомобильных дорог, благоустройство общественных пространств часто за счет искусственных объектов (малые архитектурные формы, искусственные покрытия: футбольные поля, асфальтовые и бетонные дорожки и др.) привели к сокращению озеленённых территорий общего пользования, многие из которых сейчас находятся в запущенном состоянии.

Для оценки общественных пространств Биробиджана было исследовано 108 объектов, расположенных в различных функциональных зонах города. Основой для анализа послужил официальный реестр территорий общего пользования, предоставленный администрацией города. Дополнительно использовались открытые интернет-источники, научные публикации и данные натурных исследований, включающих инвентаризацию зеленых насаждений и визуальное обследование территорий. Наряду с традиционными методами применялись геоинформационные технологии (картосхемы подготовлены в QGIS 3.36).

Инвентаризация древесных насаждений озеленённых общественных пространств осуществлялась с использованием специального паспорта объекта, разработанного в соответствии с действующими

«Правилами создания, охраны и содержания зелёных насаждений в городах Российской Федерации».

Пересчетная ведомость включала следующие характеристики: дата исследования, расположение участка, их площадь, наименование породы, возраст, диаметр и высота ствола, экологическое состояние. Высота деревьев и кустарников измерялась с помощью ручного клинометра SUUNTO PM-5/360.

Возраст деревьев определили комплексно: визуальной оценкой и на основании данных о диаметре ствола [25].

В ходе маршрутного обследования озеленённых общественных пространств города было оценено более 15000 деревьев и кустарников с диаметром более 4 см на высоте 1,3 м. Для каждого была дана визуальная оценка их экологического состояния по модифицированной шкале Е.Г. Мозолевской [22]. Адаптированная для г. Биробиджана 5-балльная шкала (вместо исходной 6-балльной) показала возможность использования ее для оценки не только лиственных, но и хвойных пород.

Критерии оценки экологического состояния [16]:

1 – здоровое дерево: отсутствие видимых повреждений; густая корона с зеленой и блестящей листвой/хвоей; нормальный текущий прирост; естественное отмирание ветвей происходит только в нижнем ярусе; механические повреждения допускаются, но не превышают 1% поверхности.

2 – ослабленное дерево: до 25% сухих ветвей в верхней части короны; снижение плотности короны до 25%; слабоажурная корона с нормальным приростом; локальные повреждения ветвей и ствола; единичные водяные побеги;

3 – сильно ослабленное дерево: от 25 до 53% сухих ветвей; мельчание и посветление листвы/хвои; преждевременное опадение листвы/хвои; корона изрежена со сниженным темпом прироста; признаки деятельности стволовых вредителей; хлорозы и некрозы на 40% площади листвы;

4 – Усыхающее сухокронное дерево: свыше 54% сухих ветвей; снижение плотности короны (более чем на 54%); увяджающая листва; заселение стволовыми вредителями; обильные водяные побеги; поражение листвы хлорозами возрастает до 77%;

5 – Сухостой: полное усыхание листвы; разрушение короны; поражение короны грибами; наличие вылетных отверстий насекомых; дальнейшая потеря ветвей и короны.

По итогам визуальной оценки состояния зелёных насаждений определялся интегральный показатель:

– «хорошее» (менее 2 баллов): здоровые древесные растения с правильной короной;

– «удовлетворительное» (от 2,1 до 3): жизнеспособные растения с нарушениями в развитии, кустарник без сорняков, но с наличием поросли;

– «неудовлетворительное» (от 3,1 до 4,1): древостой с неправильно и слабо развитой кроной, со значительными повреждениями и ранениями;

– «весьма неудовлетворительное» (более 4,2): древостой со слабо развитой кроной, со значительными повреждениями (более 70%), заселенностью энтомовредителями, болезнями; кустарники с наличием поросли и отмерших частей (более 70%), с сорняками.

Определение видового состава деревьев и кустарников осуществлялось с помощью справочника «Дендрофлора Еврейской автономной области», в котором приведены сведения о 128 видах древесных растений и интродуцентах, применяемых в озеленении города [24].

Применялись геоинформационные технологии. Анализ зелёных насаждений г. Биробиджана осуществлялся посредством обработки мультиспектральных космических данных продукта Sentinel-2A, полученных с портала геокосмической информации [11]. Особое внимание уделялось озеленённым общественным пространствам.

Критерии отбора космических снимков включали минимальную облачность и период максимального развития вегетационной массы. В настоящем исследовании временном интервалом выбран июль 2025 г. (месяц пика вегетации) с долей облаков <10%, не попадающих на территорию города. Применение данных Sentinel-2A обусловлено высоким пространственным разрешением: каждый пиксель содержит необходимую информацию в размере 10×10 метров. Такая детализация позволяет чётко и точно дифференцировать различные типы поверхностей, что является важным при анализе озеленения среднего города.

Обработка данных в геоинформационной системе QGIS 3.36 включала расчет нормализованного вегетационного индекса (NDVI): отношение разницы между ближней инфракрасной и красной спектральными зонами к их сумме. Данный показатель является эффективным инструментом оценки степени развития и жизнеспособности растительного покрова [11]. Общая формула для расчета индекса имеет следующий вид (1).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}, \quad (1)$$

где: NIR – отражение солнечного света в ближнем инфракрасном диапазоне, Red – отражение солнечного света в красном диапазоне спектра [10, 11]. Диапазон значений индекса NDVI изменяется от -1 до +1. Наличие растительности фиксируется положительными значениями NDVI. Высокие значения соответствуют области с густой растительностью.

На основании расчета NDVI и автоматического распознавания через модуль Dzetsaka (с использованием метода ключей) установлено, что на территории г. Биробиджана растительный покров выделяется значе-

ниями  $NDVI \geq 0,3$  [11]. Перевод растровых изображений в векторный формат позволил оценить площадь зеленых насаждений на озелененных территориях общего пользования. В результате был рассчитан показатель «площадь озеленения» (или «уровень озеленения»), который упоминается в приведенных в работе нормативных документах. Он рассчитывался как отношение площади зеленых насаждений к общей площади исследуемого участка.

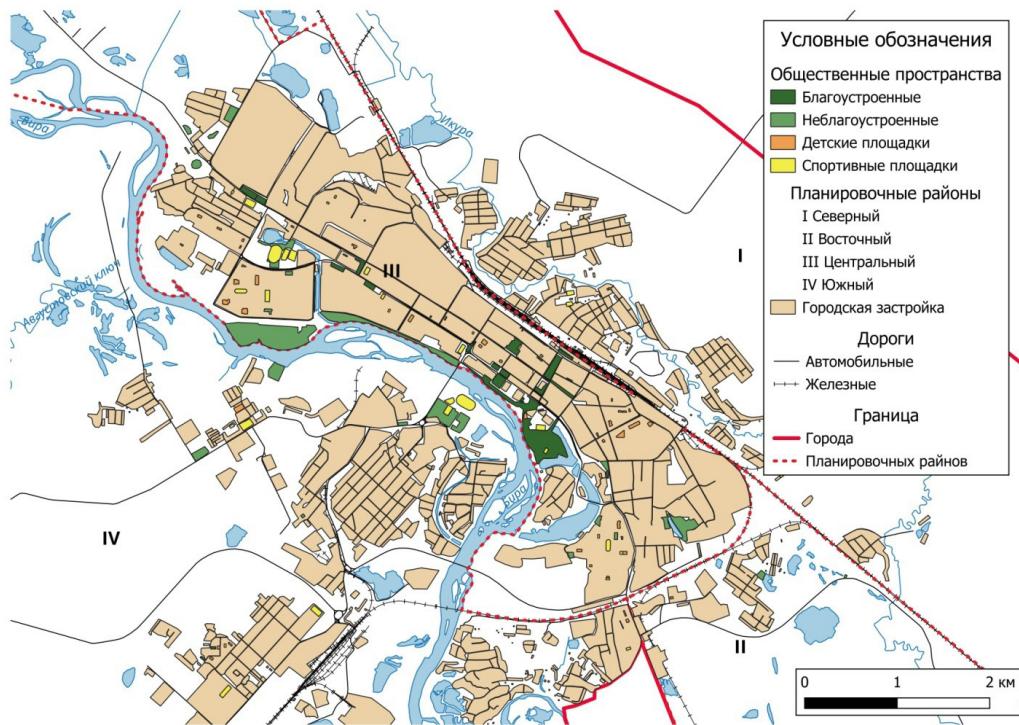
В ходе полевых исследований проводилась оценка благоустроенностю общественных озеленённых пространств. Для этого применялись положения различных нормативных документов, в которых приведены характеристики благоустроенных пространств: наличие тротуарных и/или велосипедных дорожек, освещение, скамейки, малые архитектурные формы и озеленение, а также методики оценки степени благоустроенностии территорий. На основании нормативных рекомендаций и данных научных работ отечественных специалистов [4, 15, 23, 31] был разработан паспорт анализа озеленённых общественных пространств города, в который вошла информация о наличии/отсутствии объектов благоустройства, их технического состояния, количественные и качественные показатели озеленения и др.

Отдельно рассчитывалась пешая доступность в пределах 5, 10, 15 минут ходьбы от дома до благоустроенных озеленённых пространств. Такие временные интервалы выбраны на основании рекомендаций урбанистики и принципов устойчивого развития городских территорий, согласно которым жители города должны быть обеспечены беспрепятственным доступом к местам отдыха и досуга [34]. С помощью модуля «Буферизация» в QGIS были выстроены радиусы заданных временных интервалов вокруг каждого жилого здания города. Алгоритм расчёта расстояния основан на среднем значении скорости пешеходного движения в городе, составляющем 4 км/ч. Таким образом расстояние до мест назначения определялось следующим образом: до 5 минут – 350 метров, до 10 минут – 700, до 15 минут – 1000. На основании полученных результатов определялись территории, доступные населению без значительных физических затрат и потери времени.

Статистический анализ, включающий расчет численности населения, проживающего в планировочных районах, производился на основе данных о жилищном фонде и количестве зарегистрированных жильцов.

## Результаты и обсуждение

В ходе обработки статистических материалов было определено, что по состоянию на 2024 год в г. Биробиджане насчитывается 108 общественных пространств с общей площадью 103,5 га (с учетом ле-



**Рис. 1. Распределение общественных пространств в пределах городской застройки в различных планировочных районах г. Биробиджана**

сопарковой зоны – 1492 га), что составляет 0,65% от площади города, и на одного жителя приходится 0,002 м<sup>2</sup>. Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют планировочные нормативы для оценки общей обеспеченности общественными территориями. Как отмечено в национальном проекте «Формирование комфортной городской среды», существует зависимость между количеством общественных пространств и комфортностью проживания<sup>4</sup>. Однако в действующем отечественном градостроительном нормативе СП 42.13330.2016 регламентируется лишь необходимая площадь озеленённых территорий общего пользования (парки, скверы, бульвары и др.) на одного жителя города. По данным исследований, в пределах границ застройки г. Биробиджана (без учета окрестностей), на одного жителя приходится всего 4 м<sup>2</sup> таких территорий. Это в пять раз ниже установленного норматива [16], что свидетельствует о существенном дефиците качественных рекреационных зон.

Открытые общественные пространства в Биробиджане представлены тремя типами: детские (37 объектов) и спортивные (24), также благоустроенные и неблагоустроенные озеленённые территории общего пользования (47). Примечательно, что по площа-

ди преобладают неблагоустроенные участки (51,7 га), включающие пустыри, заброшенные и захламлённые территории, формально отведенные под будущее благоустройство, тогда как благоустроенные занимают всего 30 га, остальная территория занята детскими (6,4 га) и спортивными (15,4 га) площадками.

Анализ пространственного распределения общественных территорий был проведен на основе планировочной схемы города (рис. 1), включающей четыре района: северный, восточный, центральный и южный. Каждый из них отличается степенью освоенности, уровнем благоустройства, социального обеспечения и плотностью населения [13]. Основная часть жителей проживает в центральном планировочном районе (54,4 тыс. человек или 79% населения), который занимает всего 15% площади города и отличается наиболее развитой инфраструктурой. Напротив, южный район, расположенный на правом берегу р. Бира, занимает около 50% площади города, где проживает только 12,5% населения города. Доля населения восточного и северного планировочных районов города – 5 и 3,5% соответственно.

Распределение различных категорий общественных территорий в первую очередь зависит от социально-демографической структуры населения (численности, половозрастной структуры, статуса занятости, возрастных характеристик), которая формирует предпочтения жителей. По территории города общественные

<sup>4</sup> Методика формирования индекса качества городской среды: распоряжение Правительства РФ от 23 марта 2019 № 510-р. URL: [http://static.government.ru/media/files/wbRiqrDYKeK\\_bPh9FzCHUwWoturf2Ud0G.pdf](http://static.government.ru/media/files/wbRiqrDYKeK_bPh9FzCHUwWoturf2Ud0G.pdf) (дата обращения: 10.05.2025).

Табл. 1

**Информация о размещении общественных пространств  
в различных планировочных районах г. Биробиджана**

Планировочный район (см. рис. 1)	Благоустроенные озелененные пространства, число/га	Неблагоустроенные озелененные пространства, число/га	Спортивные площадки, число/га	Детские площадки, число/га
I	-	1/0,4	3/0,7	-
II	-	2/0,8	1/0,1	4/0,3
III	18/29,7	19/39,3	12/8,4	27/5,1
IV	2/0,3	5/11,2	8/6,2	6/1
Итого	20/30	27/51,7	24/15,4	37/6,4

пространства распределены неравномерно: 72% сосредоточено в густонаселённом центральном планировочном районе. Такая концентрация обусловлена исторически сложившейся планировочной структурой города, где сосредоточены основные жилые, социальные и коммерческие объекты (табл. 1).

В северном и восточном районах города полностью отсутствуют благоустроенные озеленённые территории, причем в первом нет даже детских площадок. В связи с этим местные жители вынуждены пользоваться инфраструктурой соседнего центрального планировочного района.

Особое внимание в исследовании было уделено озелёенным территориям общего пользования, выполняющих ключевые экологические и рекреационные функции. Для их выполнения такие участки должны быть благоустроеными и соответствовать нормативным площадям, а зелёные насаждения – находиться в хорошем состоянии, чтобы обеспечивать комфортные условия для отдыха населения, и полноценно поддерживать экологический баланс в городской среде. Из 47 зарегистрированных озеленённых территорий только 20 соответствуют критериям благоустроенностии. Остальные участки, формально обозначенные в градостроительной документации как «скверы», «парки», «зеленые зоны отдыха», ожидают благоустройства в рамках программы комплексного развития Биробиджана до 2030 г.<sup>5</sup> и национальных проектов, например, «Жилье и городская среда», «Инфраструктура для жизни» и др.

Детальное изучение зелёных насаждений анализируемых территорий выявило преобладание следующих видов: ясень маньчжурский (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), берёза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukacz.), ильм (вяз) мелколистный (*Ulmus pumila* L.), тополь Максимовича (*Populus maximowiczii* A.Henry) и дущистый (*P. suaveolens* Fisch.), рябинник рябинолистный (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br.), сирень широколистная (*Syringa oblata* Lindl. ex Carrière) и др. Травянистый покров в основном представлен луго-

выми сообществами, состоящими из аборигенных (гравилат алеппский (*Geum aleppicum* Jacq.), репяшок мелкобороздчатый (*Agrimony striata* Michx.), подорожник большой (*Plantago major* L.)), и adventивных (одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), горец птичий (*Polygonum aviculare* L.), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.)) видов.

В 2024 году на территории городского парка культуры и отдыха проводилась оценка экологического состояния дендрофлоры [16]. В результате было выявлено, что 61% анализируемых экземпляров находятся в ослабленном состоянии, что связано с антропогенными и природными факторами, старым возрастом и другими обстоятельствами. К аварийным были отнесены 27% деревьев и кустарников, требующих удаления, и только 12% оценены как «хорошее состояние» (их возраст не превышает 20 лет). Для территории парка были отмечены и другие проблемы: замусоренность и аварийное состояние объектов для отдыха. В связи с этим рекомендована санитарная очистка территории, корчевание пней, удаление сухих ветвей, разрежение посадок и высадка новых кустарников и деревьев. Приведенные отклонения от нормы отмечались и на других озеленённых территориях общего пользования, но наиболее распространенным является удовлетворительное и неудовлетворительное экологическое состояние дендрофлоры (табл. 2).

Другим важным аспектом является уровень озеленения, рассчитываемый как отношение площади растительного покрова к общей площади анализируемого объекта. Согласно СП 82.13330.20168 и СП 475.1325800.20209, для парков и скверов этот показатель должен составлять не менее 70%. Для озеленённых территорий общего пользования г. Биробиджана, имеющих официальный статус «парк» или «сквер», проведен анализ уровня озеленения с помощью данных дистанционного зондирования Земли (табл. 2).

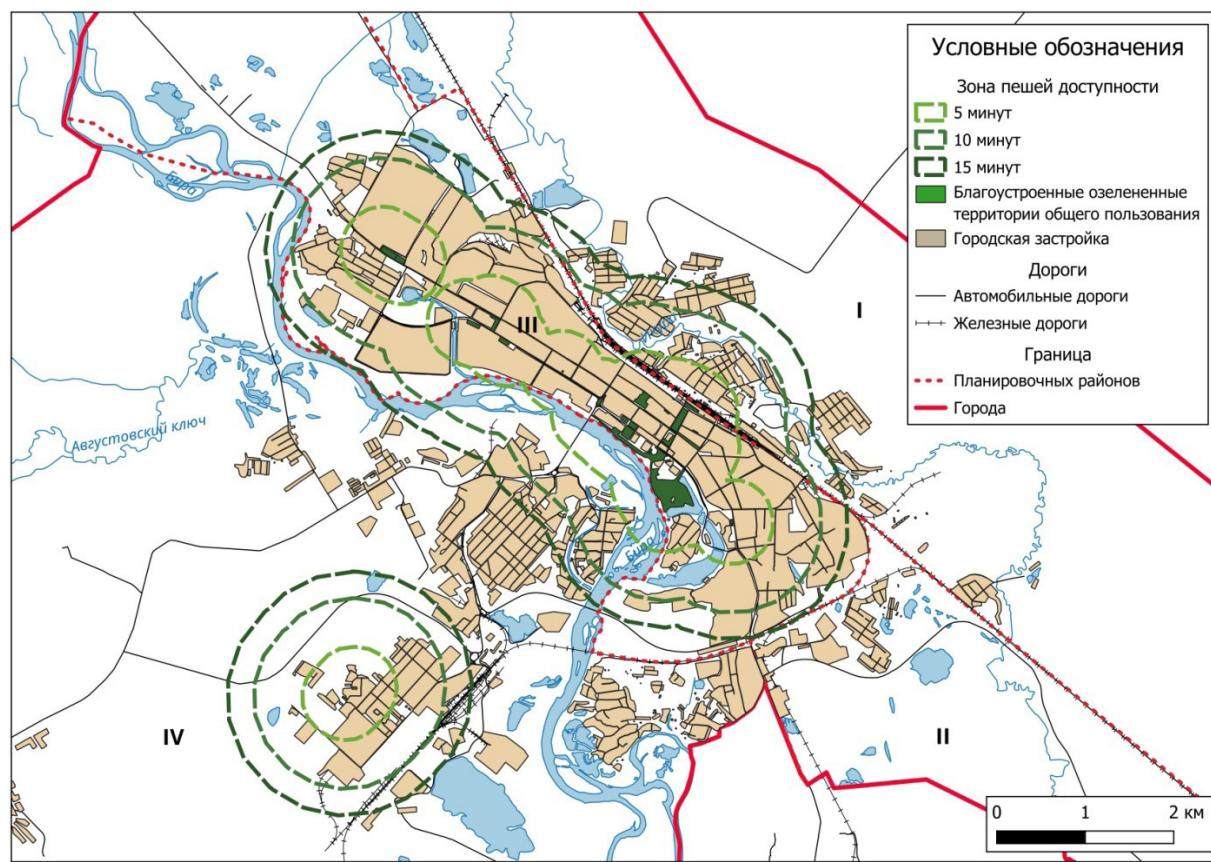
Анализ озелененных территорий общего пользования выявил, что 8 из исследуемых объектов не соответствуют установленным нормативам по площади озеленения.

<sup>5</sup> Мастер-план города Биробиджана 2030. URL: <https://landing.vostokgosplan.ru/mp-birobidjan/>

Табл. 2

**Характеристика уровня озеленения основных благоустроенных общественных озеленённых пространств**

Название территории	Уровень озеленения, %	Соответствие СП 82.13330.2016 и СП 475.1325800.2020	Экологическое состояние дендрофлоры
Сквер «Время»	59	нет	+
Сквер Победы	64	нет	+
Сквер Дружбы	74	да	-
Парк культуры и отдыха	68	нет	-
Сквер на Привокзальной площади	33	нет	-
Сквер на площади им. Ленина	61	нет	-
Сквер Первостроителей	82	да	+
Сквер на Театральной площади	47	нет	+
Сквер Детства у ЦДТ	77	да	-
Сквер Защитникам Амурских рубежей	79	да	+
Сквер Землякам-ветеранам локальных войн	67	нет	+
Сквер Поколений	65	нет	+
Сквер Ветеранам войны	75	да	+
Сквер им. Бумагина	70	да	-



**Рис. 2.** Схема пешей доступности до благоустроенных озелененных территорий г. Биробиджана

Оценка экологического состояния зелёных насаждений, произрастающих на территории общественных озеленённых пространств, показала, что 8 обследованных объектов характеризуются удовлетворительным состоянием, в то время как 6 объектов имеют неудовлетворительные показатели. Следовательно, для улучшения ситуации необходимы мероприятия по реконструкции и восстановлению зеленых насаждений, включая высаживание новых растений. Подбор растений должен осуществляться с учётом местонахождения территории, её функционального назначения, рекреационной нагрузки, экологических условий и других факторов.

Пешеходная доступность до общественных озеленённых территорий позволяет оценить, насколько жители города обеспечены парками и скверами в радиусе анализируемых интервалов. Расчеты, проведённые для 5-, 10- и 15-минутных интервалов (рис. 2), показали, что 43% жителей Биробиджана не имеют доступа к благоустроенным зелёным зонам в радиусе 5-минутной пешей доступности.

Жители центрального планировочного района находятся в более выгодном положении, имея возможность посещать до 5 различных территорий, соединенных сетью тротуаров и велодорожек.

В то же время, как видно на рис. 2, жители периферии города вынуждены преодолевать значительные расстояния или пользоваться общественным транспортом с интервалами движения 20–70 минут. С другой стороны, жители городских окраин могут использовать ближайшие лесные массивы в качестве мест для несанкционированного отдыха и рекреации. Однако они не имеют отношения к благоустроенным рекреационным территориям. В табл. 3 приведены результаты расчета пешей доступности к благоустроенным озеленённым пространствам по каждому планировочному району г. Биробиджана.

В соответствии с нормативными актами, все категории населения должны быть обеспечены соответствующими, разнообразными озеленёнными территориями общего назначения. Этот показатель отражает благоприятную картину для поддержания экологической стабильности в городе.

Разработка рекомендаций по улучшению уровня комфортности проживания населения в городах за счёт озеленённых общественных пространств должна основываться на системном анализе такого сложного объекта как город (особенности планировочной структуры, природно-антропогенной специфики) и результатах проведения мониторинга состояния зелёных насаждений. Теоретический анализ рассматриваемой проблемы и оценка практической реализации позволили обобщить полученные данные и сформулировать общие направления рациональной организации системы общественных территорий и принципы их озеленения.

Количественное и качественное насыщение урбанизированной среды благоустроенными озеленёнными общественными пространствами посредством создания новых и модернизации существующих открытых общественных территорий с учетом планировочной структуры города и нормативно-правовых актов. Приоритетность создания новых парков в районах города с высокой плотностью населения и нестабильной экологической ситуацией.

Разработка долгосрочной целевой программы озеленения, включающая разделы:

- подбор зелёных насаждений экологически адаптированных к местным климатическим условиям и антропогенным факторам;
- формирование единого непрерывного зелёного каркаса (озеленённые общественные пространства как основные ядра);
- создание крупных озеленённых территорий (не менее 15 га), являющихся центрами сосредоточения высокого биоразнообразия;
- реконструкция зелёных насаждений с учетом их функциональной значимости;
- воспроизведение зелёных насаждений (площадей) взамен уничтоженных или поврежденных в конкретном фрагменте городской застройки в соответствующих объемах.

Разработка и использование постоянно действующей системы оперативного наблюдения (мониторинга) за состоянием растительного покрова для сво-

Табл. 3

Пешая доступность к благоустроенным озеленённым пространствам по планировочным районам города

Планировочные районы	Доля численности населения планировочного района с указанной пешей доступностью, %		
	5 минут	10 минут	15 минут
Северный	6	22	41
Восточный	0	0	5
Центральный	41	77	95
Южный	5	27	49

евременного выявления изменений под влиянием природных и техногенных факторов, их оценки, предупреждения и устранения негативных процессов.

Для улучшения комфортности проживания населения в г. Биробиджане необходимо увеличить количество и площади благоустроенных озеленённых пространств с учетом концентрации населения в различных планировочных районах: в северном планировочном районе необходимо формирование 3 скверов и 1 парка, южном – 3 скверов и 1 парка, восточном – 2 скверов, центральном – модернизация уже имеющихся пространств, а также благоустройство и озеленение 19 неблагоустроенных озеленённых территорий общего пользования.

Таким образом, работа раскрывает возможности интеграции предложенных разработок в общий блок перспективных направлений экологического планирования г. Биробиджана. Результаты работы представляют интерес для санитарно-эпидемиологической службы, природоохраных служб, администрации города и могут служить обоснованием для разработки и последующей реализации мониторинга, принятия соответствующих мер по улучшению и сохранению качества городской среды, комфорта проживания горожан.

## Заключение

Проведен анализ современного состояния и структуры 108 открытых общественных пространств г. Биробиджана, включающих детские и спортивные площадки, а также озеленённые территории общего пользования различной степени благоустройства (благоустроенные и неблагоустроенные). Полученные результаты свидетельствуют о пространственной диспропорции – 72% анализируемых территорий сосредоточено в центральном планировочном районе, что создает выраженное неравенство в доступности рекреационных ресурсов жителей разных районов.

Преобладают неблагоустроенные участки, составляющие 82% от общей площади открытых общественных пространств. Эти территории, отведенные под будущее благоустройство, в настоящее время представляют собой заброшенные зоны, не способные выполнять свои экологические и социальные функции.

С учетом экологической направленности работы, детально были изучены 47 озелененных территорий общего пользования, из которых только 20 (общей площадью 140 га или 8,8% от площади общественных пространств) соответствуют критериям благоустройства. Проведённая оценка экологического состояния дендрофлоры выявила, что в насаждениях в основном доминируют старовозрастные экземпляры, утратившие экологическую и эстетическую ценность. На примере городского парка культуры и отдыха установлено, что 61% обследованных деревьев являются ослабленными, 27% – аварийными, и лишь 12% – в находятся хорошем состоянии (посадки до 20 лет).

Одним из важных аспектов исследования стала оценка уровня озеленения, которая показала, что более 50% территорий не соответствуют установленным нормативам. Это существенно снижает их рекреационный потенциал и способность выполнять средостабилизирующие функции в условиях городской среды.

Анализ пешеходной доступности выявил значительное социальное неравенство: 43% жителей города, преимущественно из периферийных районов, не имеют доступа к благоустроенным озеленённым территориям в радиусе 5-минутной пешей доступности. В то же время у жителей центрального планировочного района имеется возможность пользоваться одновременно пятью объектами.

*Работа выполнена при поддержке гранта губернатора ЕАО молодым учёным в соответствии с приказом №338 и в рамках государственного задания ИКАРП ДВО РАН.*

## Литература

1. Анисимова Л.В. Социально-экологические аспекты формирования архитектурной среды открытых общественных пространств города. Вестник Вологодского государственного университета. Сер. Технические науки. 2019;3(1):61-4.
2. Ан А.Л. Роль общественного пространства в муниципальных образованиях. Вопросы государственного и муниципального управления. 2012;1:174-84.
3. Артемова ОВ, Савченко АН. Качество городской среды: вопросы организации и социализации об- щественного пространства. Векторы благополучия: экономика и социум. 2021;41(2):73-86. DOI: 10.18799/26584956/2021/2(41)/1076
4. Банникова ЛА, Хриченков АВ, Бурцев АГ, Тиганова ИА, Третьякова АС, Груданов НЮ, Владыкина ВД. Принципы формирования подхода к благоустройству озелененных пространств Екатеринбурга. Лесной вестник. 2022;26(4):106-13. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-106-113
5. Борисов МВ, Бакаева НВ, Черняева ИВ. Нормативно-техническое регулирование в об-

- ласти озеленения городской среды. Вестник МГСУ. 2020;15(2):212-22. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.212-222
6. Герцберг ЛЯ. Устойчивые города. Формирование градостроительных предпосылок. Academia. Архитектура и строительство. 2022;3:69-76. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-3-69-76.
  7. Герцберг ЛЯ. Устойчивые города. Формирование градостроительных предпосылок. Часть II. Academia. Архитектура и строительство. 2022; 4:123-9. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-4-123-129
  8. Гимранова ГА. Изменение городского пространства: российский и зарубежный опыт. Социальные и гуманитарные науки: теория и практика. 2020;4(1):289-90.
  9. Дебелая ИД, Морозова ГЮ. Проблемы создания общественных пространств в городах. Региональные проблемы. 2024;27(3):65-70. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-3-65-70
  10. Жучков ДВ, Фетисов ДМ. Оценка индикаторов устойчивого развития города Биробиджана: озелененные пространства. Региональные проблемы. 2023;26(2):23-36. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-26-2-23-36
  11. Фетисов ДМ, Жучков ДВ, Горюхин МВ. Оценка уровня озеленения города Биробиджана с применением мультиспектральных данных. Биосфера. 2021;13(4):170-9. DOI: 10.24855/biosfera.v13i4.648
  12. Захарчук ЕА, Трифонова ПС, Упоров ВЕ. Концепция «Медленный город» как перспективное направление развития малых и средних городов России. Цифровая экономика и инновации. 2024;1:5-17.
  13. Калманова ВБ. Открытые пространства в структуре урбанизированных территорий (на примере г. Биробиджана). Региональные проблемы. 2016;19(2):54-9.
  14. Калманова ВБ. Экологические особенности функционально-планировочной структуры средних и малых городов юга Дальнего Востока (на примере г. Биробиджана). ИнтерКарто. Интер-ГИС. 2016;22(2):273-86. Аналогично
  15. Калманова ВБ. Экологические показатели устойчивого развития урбанизированных территорий. Региональные проблемы. 2024;27(2):67-71. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-2-67-71
  16. Калманова ВБ, Жучков ДВ. Экологическая оценка современного состояния дендрофлоры парка культуры и отдыха г. Биробиджана. Региональные проблемы. 2024;27(4):57-71. DOI: 10.31433/2618-9593-2024-27-4-57-71
  17. Калманова ВБ. Экологическое состояние дендрофлоры как показатель качества городской среды (на примере г. Биробиджана). Региональные проблемы. 2013;16(1):79-86.
  18. Климанова ОА, Колбовский ЕЮ, Илларионова ОА. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018;63(2):127-46. DOI: 10.21638/11701/spu07.2018.201
  19. Ложкин АЮ, Смирнова МС, Голодяев КА, Гижинская СА, Карпов АЕ, Скурихина ТГ, Архипова АМ, Юрченко ЛВ, Лебедев ДА, Дубынин АВ. Зелёный Новосибирск. Концепция развития озеленённых общественных пространств общегородского значения. Новосибирск: Вояж; 2017.
  20. Майорова ЛП, Архипов ЕА, Кошельков АМ. Комплексная оценка экологического состояния урбанизированной территории. Экология и промышленность России. 2025;29(5):76-81. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-5-44-50
  21. Мингалева ТА, Горячев АА, Мингалева ЕИ, Мингалев АИ. Социальные и экологические функции общественных парков малого города в условиях Севера (на примере г. Апатиты Мурманской области). Труды Кольского научного центра РАН. 2020;11(8):179-95. DOI: 10.37614/2307-5252.2020.2.8.019
  22. Мозолевская ЕГ. Методы оценки и прогноза динамики состояния насаждений. Лесное хозяйство. 1998; 3:43-45.
  23. Парфенова И.А., Молчанова А.Д. Общественные озелененные пространства города Севастополя. Вопросы устойчивого развития общества. 2021;7:358-74.
  24. Рубцова ТА. Деревья, кустарники, лианы Еврейской автономной области и их использование в озеленении. Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН; 2021.
  25. Румянцев ДЕ, Черкашев АВ. Методологические подходы для определения возраста деревьев. Принципы экологии. 2020;38(4):104-17.
  26. Секущина ИА, Кожевников СА. Проблемы повышения комфорта проживания населения крупного города (на материалах г. Вологды и г. Череповца). Проблемы развития территории. 2018;98(6):42-63. DOI: 10.15838/ptd.2018.6.98.3
  27. Сизов АП, Илюшина ТВ, Джикирба Л. Динамика средоформирующего потенциала рекреационных зон города Самары. Мониторинг. Наука и технологии. 2024;59(1):71-77.
  28. Тяглов СГ, Родионова НД, Федорова ЯВ, Сергиенко ВЮ. Алгоритм развития общественных пространств крупных городов в условиях их урбанизации. Регионология. 2020;28(4):778-800. DOI: 10.15507/2413-1407.113.028.202004.778-800
  29. Унагаева НА, Федченко ИГ, Липоковка АЮ, Блянкинштейн ОН, Попкова НА, Савельев МВ.

- Потенциалы развития открытых общественных пространств Красноярска. Проект Байкал. 2021;18:100-11. DOI: 10.51461/projectbaikal.70.1898
30. Фавстрицкая ОС. Урбанизация Российского и зарубежного Севера: сравнительный анализ количественных характеристик. Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2023;1:117-24. DOI: 10.34078/1814-0998-2023-1-117-124
  31. Хриченков АВ, Банникова ЛА, Бурцев АГ, Тиганова ИА, Третьякова АС, Садыкова Н. Стандарт комплексного благоустройства набережных, парков, скверов, бульваров Екатеринбурга. Екатеринбург: Уральский Федеральный университет; 2022.
  32. Янкина ИА, Рачипа АВ. Проблемы повышения качества городской среды (на примере г. Таганрога). Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2024;43(3):38-45.
  33. Guettiche G, Amel B, Guermond Y. Public green spaces: an alternative for sustainable development in cities with sensitive area. Revista de Gestão Social e Ambiental, 2025;19(3): 1-17. DOI: 10.24857/rgsa.v19n3-030
  34. Moreno C, Allam Z, Chabaud, D, Gall C, Pratlong F. Introducing the “15-Minute City”: Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities. Smart Cities. 2021;4:93-111. DOI: 10.3390/smartcities4010006
  35. Forman RTT. Urban Ecology: Science of Cities. Cambridge University Press; 2014.



# ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОВСА ПОСЕВНОГО К АККУМУЛЯЦИИ СВИНЦА И КАДМИЯ

## А.С. Петухов\*, Т.А. Кремлева, Н.А. Хритохин, Е.Д. Первухина

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

\*Эл. почта: [a.s.petukhov@utmn.ru](mailto:a.s.petukhov@utmn.ru)

Статья поступила в редакцию 19.09.2025; принята к печати 05.11.2025

**Цель исследования:** установить влияние модельного загрязнения органогенного и минерального субстрата различными концентрациями Pb и Cd на фотосинтетические пигменты, продукты перекисного окисления липидов, флавоноиды, пролин, активность катализы и пероксидазы овса посевного. Семена овса в течение 14 суток прорашивали в органогенном (торфосодержащая грунтовая смесь) и минеральном (речной песок) субстрате с различными уровнями Pb (0, 50, 100, 200, 500 мг/кг) и Cd (0, 2, 5, 10, 20 мг/кг) при раздельном внесении. Аккумуляция Pb и Cd более выражена в условиях минерального субстрата: до 20 и 430 раз соответственно относительно контроля в надземной части и до 110 и 470 раз в подземной части. Наиболее чувствительным показателем, реагирующим на накопление Pb, является пролин, в случае Cd – флавоноиды. Степени воздействия Pb и Cd на биохимические показатели в минеральном субстрате примерно одинаковые, в органогенном субстрате – выше у Cd. В целом, овес может адаптироваться к аккумуляции Pb и Cd до некоторой степени, что проявляется в снижении содержания продуктов перекисного окисления и активации антиоксидантных механизмов, отсутствии снижения всхожести. Это позволяет рекомендовать его для фиторемедиации песчаных и гумусовых почв с загрязнением свинцом и кадмием до 500 мг/кг и 20 мг/кг соответственно.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, растения, перекисное окисление липидов, фотосинтез, антиоксиданты

## ASSESSMENT OF OAT RESISTANCE TO ACCUMULATION OF LEAD AND CADMIUM

A.S. Petukhov\*, T.A. Kremleva, N.A. Khritokhin, E.D. Pervukhina

University of Tyumen, Tyumen, Russia

\*Email: [a.s.petukhov@utmn.ru](mailto:a.s.petukhov@utmn.ru)

The objective of the present study was to determine the effect of modeled contamination of organogenic and mineral substrates with different concentrations of Pb and Cd on photosynthetic pigments, lipid peroxidation products, flavonoids, proline, and catalase and peroxidase activities in oat. Oat seeds were germinated for 14 days in organogenic (peat-containing soil mixture) and mineral (river sand) substrates with different levels of contamination with Pb (0; 50; 100; 200; and 500 mg/kg) and Cd (0; 2; 5; 10; and 20 mg/kg) applied separately. Accumulation of Pb and Cd is more pronounced under mineral substrate conditions, relative accumulation being up to 20 and 430 times, respectively, in the above-ground part and up to 110 and 470 times in the underground part. The most sensitive indicators of Pb and Cd are proline and flavonoids respectively. The degrees of Pb and Cd impact on biochemical parameters in the mineral substrate are comparable. In the organogenic substrate, the impact of Cd is higher. In general, oat can adapt to Pb and Cd accumulation to a certain extent, as follows from a decrease in the content of lipid peroxidation products and activation of antioxidant mechanisms, whereas germination does not decrease. This allows recommending oat for phytoremediation of sandy and humus soils contaminated with up to 500 mg/kg and 20 mg/kg Pb and Cd, respectively.

**Keywords:** heavy metals, plants, lipid peroxidation, photosynthesis, antioxidants

### Введение

Загрязнение среды тяжелыми металлами (ТМ) остается одной из наиболее острых и распространенных экологических проблем. Выбросы предприятий горнодобывающей, металлургической, химической промышленности, теплоэлектростанций, автотранспорта, применение удобрений и пестицидов приводят к увеличению содержания ТМ в почвах [30]. В результате растения из районов, подверженных антропогенно-

му загрязнению, способны многократно накапливать ТМ относительно фоновых значений [12, 22].

Наиболее токсичными среди ТМ являются Pb и Cd. В отличие от других металлов (Cu, Zn, Fe, Mn), они не обладают установленными жизненно-важными функциями [12]. Соединения Pb и Cd широко используются в производстве химических источников тока, пигментов, пластмасс, полупроводниковых материалов, а также сопутствуют внесению удобрений [30].

Одним из основных механизмов токсичности ТМ является способность инициировать и поддерживать свободнорадикальное, в частности перекисное окисление липидов (ПОЛ) [20]. Накопление ТМ сопровождается увеличением концентрации активных форм кислорода (АФК), что приводит к повреждению биомолекул. Поэтому в условиях накопления ТМ в клетках растений может наблюдаться активация антиоксидантных систем неферментной (каротиноиды, флавоноиды, аскорбиновая кислота, глутатион, пролин) и ферментной природы (катализаза, пероксидаза, супероксиддисмутаза) [25].

Овес посевной (*Avena sativa* L.) является важной сельскохозяйственной культурой, незаменимым кормом для животных, широко применяется в медицине, что определяет значимость изучения устойчивости овса посевного к загрязнению почвы ТМ, включая выявление показателей, наиболее чувствительных к загрязнению. Влиянию ТМ на физиологические и биохимические показатели растений посвящено большое количество исследований, однако в полевых условиях выделить вклад загрязнения ТМ затруднительно [21], а в лабораторных условиях исследования часто проводятся в условиях гидропоники [1, 8-10], при этом используют ограниченный набор показателей [1, 8] и не учитывают влияние типа загрязняемого субстрата на поведение токсиканта [2].

Целью проведенного исследования стало установление влияния модельного загрязнения органогенного и минерального субстрата различными концентрациями Pb и Cd на биохимические показатели овса посевного.

## Материал и методы исследования

Исследование проводили с использованием семян овса посевного как часто используемого объекта в биотестировании. Семена овса проращивали в органогенном (торфосодержащая грунтовая смесь) и минеральном субстрате (речной песок) с различными уровнями загрязнения Pb и Cd при раздельном внесении. Свинец вносили в виде ацетата  $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$  в количествах (в расчете на металл) 0, 100, 200, 500, 1000 мг/кг субстрата. Кадмий вносили в виде сульфата  $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$  в количествах (в расчете на металл) 0, 2, 5, 10, 20 мг/кг. Выбор аниона соли обусловлен растворимостью солей, их доступностью и инертностью по отношению к росту растений.

Каждый вариант эксперимента состоял из 10 параллелей (вегетационных сосудов) по 30 семян. Эксперимент проводили в течение 14 суток, растения находились в условиях одинаковых и постоянных температуры ( $23 \pm 1^\circ C$ ), увлажненности (влажность почвы  $70 \pm 5\%$ ) и инсоляции ( $5000 \pm 100$  лк). Срок эксперимента обусловлен

ГОСТ Р ИСО 22030-2009<sup>1</sup>, согласно которому первый сбор растений осуществляют на 14 сутки.

Воздушно-сухую массу растений озоляли при  $500^\circ C$  в течение 3 часов. Извлечение Pb и Cd из золы подземной и надземной части овса проводили в 5 М  $HNO_3$ . Пробоподготовку проводили в двух параллелях. Содержание металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в центре коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» ТюмГУ. Концентрацию Pb и Cd рассчитывали в мг/кг сухой биомассы растений.

Биохимические показатели овса посевного изучали фотометрическим методом. Содержание пигментов фотосинтеза определяли в спиртовом экстракте [16]. Содержание продуктов ПОЛ (оснований Шиффа и диеновых коньюгатов) анализировали в гептановом экстракте [15]. Содержание флавоноидов оценивали проведением цветной реакцией с хлоридом алюминия [13]. Активность каталазы анализировали с помощью образования комплекса молибдата аммония с перекисью [6]. Активность пероксидазы изучали по продуктам окисления гваяколя перекисью водорода [4]. Содержание пролина определяли с помощью нингидриновой реакции [19]. Результаты анализа биохимических показателей приводили в расчете на сухую биомассу растений.

Полученные результаты были подвергнуты стандартной статистической обработке с расчетом доверительного интервала при  $P = 0,95$ , который откладывали в виде планок погрешности на гистограммах. Проводили корреляционный анализ с расчетом коэффициента корреляции Пирсона (R) и дисперсионный анализ в программе Statistica 12.

## Результаты и их обсуждение

По истечении срока вегетационного эксперимента (14 суток) всхожесть семян овса посевного в условиях загрязнения органогенного субстрата Pb и Cd не отличалась от контроля, а в условиях минерального субстрата всхожесть была снижена на 13% только при внесении максимальной концентрации Cd (20 мг/кг). Полученный результат указывает на успешный рост овса посевного в почвах, загрязненных до 500 мг/кг Pb и до 20 мг/кг Cd, что является необходимым условием для проведения фиторемедиации.

Проращивание овса посевного в загрязненном органогенном субстрате привело к аккумуляции Pb в надземной части 1,6–4,8 раза при сравнении с контролем (рис. 3). При сравнении с органогенным субстратом миграция Pb из минерального субстрата более выражена – до 5 раз, аккумуляция в надземной была выше

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений. М.: Стандартинформ, 2010.

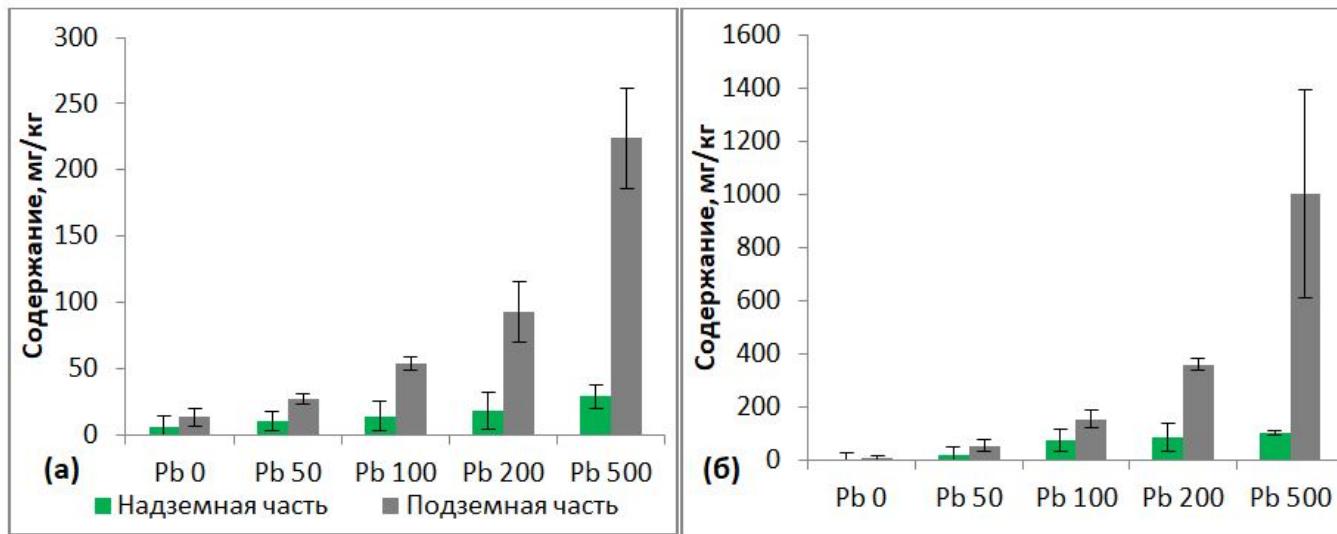


Рис. 1. Содержание Pb в овсе, выращенном в загрязненном органогенном (а) и минеральном (б) субстрате

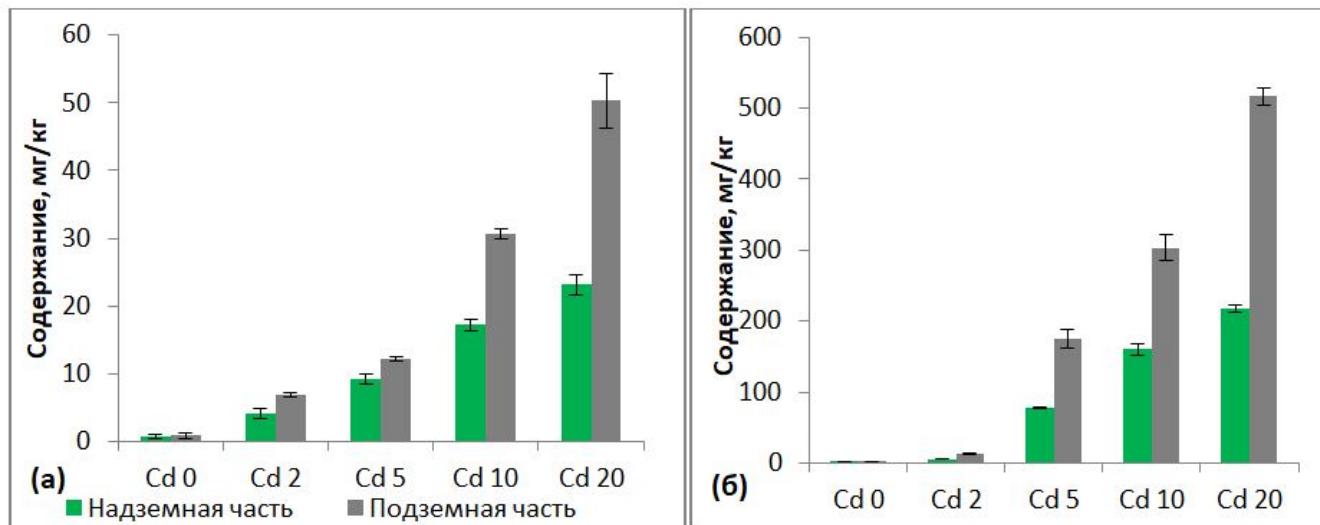


Рис. 2. Содержание Cd в овсе, выращенном в загрязненном органогенном (а) и минеральном (б) субстрате

в 3,8–20 раз. Аккумуляция Cd более выражена при сравнении с Pb: в 5–29 раз с органогенным субстратом и до 430 раз с минеральным субстратом по сравнению с контролем (рис. 4). Высокая степень аккумуляции позволяет считать возможным использование овса для фитоэкстракции металлов (особенно Cd из песчаных почв). Содержание Pb и Cd в овсе, выращенном в минеральном субстрате, оказалось выше при сравнении с органогенным субстратом. Это можно объяснить тем, что в органогенном субстрате ТМ связываются гумусом, что приводит к снижению их подвижности и меньшей транслокации в растения.

Ранее накопление Pb и Cd до 10-кратного раз было отмечено в хвое и листьях деревьев в г. Усть-Каменогорске (Казахстан) [5]. Содержание Pb в овсе соответствовало содержанию этого металла в овощах в районе Алавердского горно-металлургического комбината в Узбекистане [11], а также в травах вблизи полигона твердых бытовых отходов в ХМАО [27] и Среднеуральского медеплавильного завода [14].

В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют общепринятые значения ПДК для ТМ в растениях, однако содержание Pb и Cd превышало максимально-допустимый уровень в кормах для

сельскохозяйственных животных в 2–20 и 14–720 раз соответственно<sup>2</sup>. Допустимое содержание в растительном сырье и лекарственных препаратах было превышено в 1,7–17 раз для Pb и в 4–217 раз для Cd<sup>3</sup>. Превышение данных нормативов наблюдалось уже при внесении минимальных доз металлов (Pb – 50 мг/кг, Cd – 2 мг/кг).

Подземная часть овса посевного, выполняющая защитную функцию, задерживала в себе большую часть Pb и Cd. Накопление Pb подземной частью достигало 112-кратного относительно контроля, а Cd – 470-кратного. На основании полученных данных можно предположить, что у овса включаются адаптационные механизмы, ограничивающие миграцию Pb: по мере роста вносимой концентрации металла барьерная функция корней усиливается. Это проявлялось в увеличении отношения уровней Pb в подземной и надземной частях растения. Аналогичная картина наблюдалась и в эксперименте с загрязнением Cd органогенного субстрата. Однако в условиях большей аккумуляции Cd из минерального субстрата барьерная функция корней ослабевает: отношение уровней Cd в подземной и надземной части снижалось. Способность к миграции в зеленую часть растения у Cd оказалась до 4 раз выше, чем у Pb. В другом исследовании при внесении в почву 20 мг/кг Cd и 200 мг/кг Pb корни золотобородника накапливали Cd до 130-кратного уровня относительно контроля, Pb – до 8-кратного [26]. Однако значительные различия по распределению между надземной и подземной части растения между Pb и Cd не наблюдались [26], что свидетельствует о различном функционировании защитных систем в растениях разных видов.

Накопление Pb и Cd в овсе привело к статистически значимым отличиям от контроля во всех проведенных экспериментах практически по всем изученным показателям (Табл. 1, 2).

В эксперименте с загрязнением органогенного субстрата свинцом степень изменений исследованных показателей изменялась в ряду: пролин > хлорофилл *a* ≈ пероксидаза > хлорофилл *b* ≈ каротиноиды > основания Шиффа ≈ флавоноиды > каталаза > диеновые коньюгаты. Изменение содержания пролина достигало 2,6-кратного относительно контроля, в то время как статически значимое воздействие Pb на содержание диеновых коньюгатов не было выявлено. При за-

<sup>2</sup> Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и гossипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках 123-4/281-8-87. М.: Государственный агропромышленный комитет СССР, Главное управление ветеринарии; 1987.

<sup>3</sup> Общая фармакопейная статья 1.5.3.0008.15. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. М., 2015.

грязнении минерального субстрата свинцом чувствительность показателей изменялась в ряду: пролин > каталаза > флавоноиды > пероксидаза > диеновые коньюгаты > основания Шиффа > хлорофилл *b* ≈ хлорофилл *a* ≈ каротиноиды. Таким образом, наиболее чувствительным к накоплению Pb показателем оказался пролин, независимо от типа загрязняемого субстрата.

Загрязнение органогенного субстрата кадмием привело к такому ряду степени изменчивости показателей: флавоноиды > пролин > хлорофилл *b* ≈ основания Шиффа > хлорофилл *a* ≈ пероксидаза > каротиноиды ≈ диеновые коньюгаты > каталаза. С минеральным субстратом ряд был такой: диеновые коньюгаты > флавоноиды > каталаза > хлорофилл *b* ≈ пероксидаза ≈ хлорофилл *a* > каротиноиды > пролин > основания Шиффа. Наиболее чувствительным биохимическим показателем к накоплению Cd оказались флавоноиды, изменение содержания которых относительно контроля достигало 5,4-кратного.

Изменения активности каталазы и содержания диеновых коньюгатов оказалась выше в эксперименте с минеральным субстратом при сравнении с органогенным. Вероятно, это связано с большей аккумуляцией Pb и Cd и большим смещением окислительно-восстановительного баланса в клетках.

Воздействие Cd на биохимические показатели овса более выражено по сравнению с Pb в условиях органогенного субстрата. Вероятно, это свидетельствует о большей токсичности Cd, чему соответствуют меньшие значения ПДК в почвах. Однако в условиях облегченной транслокации металлов в минеральном субстрате степени влияния Pb и Cd на биохимические показатели оказались сопоставимыми. В целом, чувствительность изменения исследованных показателей в эксперименте с минеральным субстратом оказалась выше, что соответствует большей транслокации металлов.

Дисперсионный анализ (ANOVA) проводили с использованием всего массива полученных данных. В качестве независимых переменных использовали исследованные показатели и содержание Pb и Cd в овсе, а независимыми факторами являлись тип субстрата (органогенный и минеральный) и загрязнение субстрата металлом (Pb и Cd). Выявлено, что природа металла и тип субстрата значимо влияют на содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов (рис. 3а), оснований Шиффа и активность пероксидазы. На содержание пролина и диеновых коньюгатов влияет тип субстрата, но значимые различия между воздействиями разных металлов (Pb или Cd) не установлены. Изменения содержание флавоноидов зависели от природы металла, но не от типа субстрата (рис. 3б). Изменения активности каталазы не зависели от типа субстрата или природы металла. В целом, влияние

Табл. 1

**Биохимические показатели овса посевного в условиях загрязнения субстрата свинцом**

	Pb <sub>0</sub>	Pb <sub>50</sub>	Pb <sub>100</sub>	Pb <sub>200</sub>	Pb <sub>500</sub>
<i>Органогенный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	126±7	80±11*	86±4*	137±7	128±3
Хлорофилл b, мг/100 г	72±3	62±6	52±2*	82±2*	88±4*
Каротиноиды, мг/100 г	108±6	85±1*	78±5*	114±4	114±6
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	1,3±0,1	1,3±0,1	1,64±0,07*	1,60±0,03*	1,37±0,03
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг	4,0±0,3	3,7±0,3	3,6±0,3	3,8±0,3	3,6±0,3
Флавоноиды, %	0,22±0,02	0,26±0,01	0,25±0,01	0,20±0,01	0,27±0,01*
Пролин, мг/кг	1032±2	2395±20*	2699±20*	1526±20*	678±20*
Каталаза, нкат/г	116±50	75±14	157±35	82±18	199±59
Пероксидаза, отн. ед./г	1108±19	1144±10	708±20*	1030±10*	1022±15*
<i>Минеральный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	463±5	530±20*	479±17	463±15	425±10*
Хлорофилл b, мг/100 г	215±2	252±16*	231±20	212±4	202±3*
Каротиноиды, мг/100 г	414±3	470±18*	429±19	407±12	377±11*
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	0,54±0,02	0,60±0,01*	0,44±0,01*	0,50±0,02	0,60±0,02
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг	1,21±0,05	1,18±0,02	0,89±0,02*	1,00±0,04	1,16±0,04
Флавоноиды, %	0,08±0,02	0,27±0,02*	0,25±0,01*	0,13±0,01*	0,30±0,02*
Пролин, мг/кг	26±10	372±24*	45±2	24±3	59±2*
Каталаза, нкат/г	178±8	75±34*	116±6*	43±16*	109±20*
Пероксидаза, отн. ед./г	316±6	336±10	462±10*	317±8	294±8*

Примечание: \*P &lt; 0,05

Табл. 2

**Биохимические показатели овса в условиях загрязнения субстрата кадмием**

	Cd <sub>0</sub>	Cd <sub>5</sub>	Cd <sub>5</sub>	Cd <sub>10</sub>	Cd <sub>20</sub>
<i>Органогенный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	196±2	220±13	215±8*	196±2	159±6*
Хлорофилл b, мг/100 г	149±8	205±2*	137±10	120±5*	108±8*
Каротиноиды, мг/100 г	197±8	203±13	218±16	188±3	167±4*
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	1,04±0,01	0,82±0,08*	1,2±0,1	1,1±0,2	0,77±0,02*
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг липидов	4,0±0,2	4,4±0,3	3,4±0,1*	3,7±0,1	3,4±0,2*
Флавоноиды, %	0,03±0,01	0,13±0,01*	0,10±0,01*	0,10±0,01	0,03±0,01
Пролин, мг/кг	1354±30	1532±70*	3080±120*	1478±21*	1307±30
Каталаза, нкат/г	150±52	155±70	60±26	127±56	158±21
Пероксидаза, отн. ед./г	458±7	491±25	559±13*	431±33	444±12
<i>Минеральный субстрат</i>					
Хлорофилл а, мг/100 г	392±35	325±30	226±4*	248±14*	173±10*
Хлорофилл b, мг/100 г	204±21	160±20	117±2*	118±5*	88±8*
Каротиноиды, мг/100 г	345±29	297±29	206±4*	229±12*	158±2*
Основания Шиффа, усл. ед/мг липидов	0,37±0,01	0,30±0,08	0,31±0,03	0,24±0,03	0,25±0,01*
Диеновые коньюгаты, усл. ед/мг липидов	0,89±0,06	0,8±0,2	0,86±0,05	0,6±0,1	6,2±0,1*
Флавоноиды, %	0,27±0,01	0,29±0,01	0,28±0,01	0,05±0,01*	0,11±0,01*
Пролин, мг/кг	104±2	87±2*	67±2*	96±2*	142±5*
Каталаза, нкат/г	112±43	116±28	56±9	77±33	324±38*
Пероксидаза, отн. ед./г	192±7	437±20*	378±20*	240±15*	378±18*

Примечание: \*P &lt; 0,05

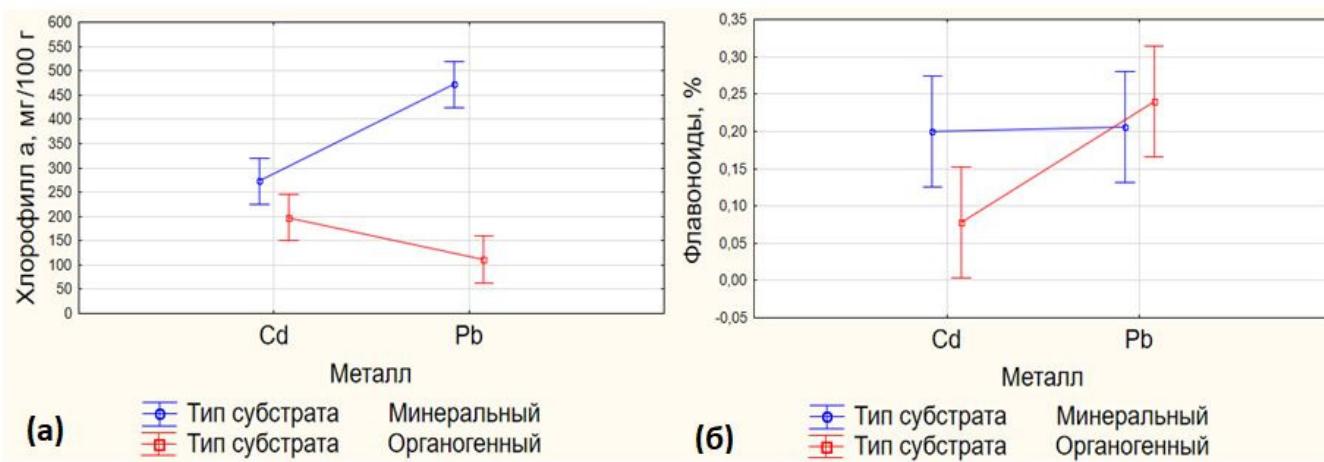


Рис. 3. Влияние металла и типа субстрата на содержание хлорофилла *a* (а) и флавоноидов (б) в овсе посевном

типа субстрата на биохимические показатели было сильнее в случае Pb, чем Cd. Различия в воздействиях Pb и Cd на исследованные показатели более выражены в условиях минерального субстрата.

Корреляционный анализ позволил выявить отрицательные корреляции между содержанием Pb в минеральном субстрате и содержанием фотосинтетических пигментов:  $R = -(0,64-0,75)$ . Аналогичная корреляция была отмечена для Cd (в органогенном и минеральном субстрате):  $R = -(0,72-0,87)$ . Отмечено увеличение содержания фотосинтетических пигментов на 6–38% при внесении небольших доз Pb (50 мг/кг) и Cd (2-5 мг/кг). Однако при внесении больших концентраций Pb и Cd наблюдалось снижение уровней хлорофилла *a* и каротиноидов до 2,3 раз. В другом исследовании показано, что внесение в почву 400 мг/кг Pb приводило к увеличению содержания хлорофилла *a* и *b* в растениях давидии покрывальной [29]. В литературе сообщалось об отрицательном воздействии Pb и Cd на фотосинтез [3, 7].

По данным литературы, накопление ТМ приводит к развитию процессов ПОЛ [18, 28]. Однако в нашем исследовании аккумуляция Cd вызывала снижение содержания оснований Шиффа и диеновых конъюгатов до полутора раз относительно контроля ( $R = -0,85$  и  $-0,70$  соответственно). Вероятно, это свидетельствует об устойчивости овса посевного к действию Cd в концентрации до 20 мг/кг в органогенном субстрате до 10 мг/кг в минеральном субстрате. Внесение 20 мг/кг Cd в минеральный субстрат преодолевает антиоксидантную защиту растений и приводит к накоплению диеновых конъюгатов до 6 раз ( $R = 0,71$ ). Накопление Pb также приводит к снижению содержания диеновых конъюгатов до 18% ( $R = -0,64$ ), однако содержание оснований Шиффа повышается до 26%. Вероятно,

это обусловлено тем, что для Pb, в отличие от Cd, характерны окислительно-восстановительные превращения  $\text{Pb}^{4+}/\text{Pb}^{2+}$ , приводящие к генерации свободных радикалов и активных форм кислорода.

Ответная антиоксидантная реакция овса посевного на накопление Pb и Cd заключалась в увеличении содержания флавоноидов до 4 раз относительно контроля. Это свидетельствует о том, что концентрации Pb и Cd до 100 и 80 мг/кг овса не подавляют синтез флавоноидов. В литературе сообщалось об увеличении содержания фенольных антиоксидантов в горчице при действии Cd [24], а также в пшенице при действии Pb [23]. Накопление Cd выше 160 мг/кг овса (при внесении 10-20 мг/кг Cd в субстрат) приводило к снижению содержания флавоноидов до 5 раз относительно контроля ( $R = -0,86$ ).

В литературе сообщалось о накоплении пролина как о неспецифической ответной реакции растений на стресс [1, 10]. В проведенном исследовании выявлено накопление пролина до 14 раз относительно контроля в условиях аккумуляции Pb. Аналогичный эффект (до 2,3 раз) наблюдался при аккумуляции Cd ( $R = 0,72$ ). Токсический эффект аккумуляции Pb и Cd может проявляться в уменьшении относительного объема воды в клетках [12, 22], поэтому накопление пролина, как осмопротектора может быть защитной реакцией растений. Однако при внесении 500 мг/кг Pb в органогенный субстрат и 2-10 мг/кг Cd в минеральный субстрат наблюдалось снижение содержания пролина до 1,5 раз. Вероятно, в этих условиях наблюдается подавление синтеза пролина.

Аккумуляция Cd приводила к увеличению активности пероксидазы до 1,2 раза в условиях органогенного субстрата и до 2,3 раз в минеральном субстрате. Активность другого антиоксидантного фермента, ка-

талазы, также увеличивалась до 2,9 раз при транслокации Cd из минерального субстрата ( $R = 0,78$ ). Вероятно, усиление активности каталазы и пероксидазы обусловлено накоплением перекиси водорода из-за процессов свободнорадикального окисления, вызываемого аккумуляцией Cd. Содержание первичных продуктов ПОЛ, диеновых коньюгатов, положительно коррелировало с активностью каталазы в овсе при загрязнении минерального субстрата кадмием Cd ( $R = 0,97$ ). Увеличение активности каталазы и пероксидазы в условиях воздействия Cd ранее наблюдалось у кукурузы и горчицы [17, 24]. Воздействие Pb на активность каталазы оказалось отрицательным: активность фермента в эксперименте с минеральным субстратом снижалась до 4 раз. Действие Pb на активность пероксидазы также оказалось скорее отрицательным: снижение до 1,6 раз в условиях органогенного и минерального субстрата (за исключением внесения 100 мг/кг в минеральный субстрат). Снижение активности каталазы и пероксидазы при действии нитрата свинца было отмечено в проростках пшеницы в условиях гидропоники [9].

## Заключение

Проведенное исследование показало, что наиболее чувствительным показателем овса посевного к накоплению Pb является пролин, а к накоплению Cd – флавоноиды. Установлено влияние типа субстрата на большинство биохимических показателей: в минеральном субстрате влияние загрязнения Pb и Cd более выражено, особенно для Pb. В условиях органогенного субстрата воздействие Cd на все биохимические показатели сильнее, чем Pb, в минеральном субстрате воздействие металлов сопоставимо. Аккумуляция Pb и Cd до 20 и 400 раз соответственно относительно контроля привела к снижению содержания продуктов ПОЛ и активации антиоксидантных механизмов, что свидетельствует о способности овса посевного адаптироваться к загрязнению. Это позволяет рекомендовать его для фиторемедиации загрязненных песчаных и гумусовых почв при содержании Pb до 500 мг/кг и Cd до 20 мг/кг соответственно.

*Исследование поддержано грантом Российской научного фонда № 25-77-00010*

## Литература

1. Абилова ГА. Влияние ионов кадмия и свинца на рост и содержание пролина в растениях тритикале (*Triticosecale Wittm.*). Труды Карельского научного центра РАН. 2016;11:27-32. DOI: 10.17076/eb424
2. Анисимов ВС, Санжарова НИ, Анисимова ЛН, Фригидова ЛМ, Круглов СВ, Дикарев ДВ и др. Использование морфометрических и биохимических показателей растений кормовых бобов для оценки фитотоксических концентраций Zn в различных почвах. Агрохимия. 2011;5:65-75.
3. Батова ЮВ, Казнина НМ, Лайдинен ГФ, Титов АФ. Влияние кадмия на некоторые физиологические процессы у растений тимофеевки луговой (*Phleum pratense L.*). Труды Карельского научного центра РАН. 2013;3:52-8
4. Ермаков АИ, Арасимович ВВ, Ярош НП, Перуанский ЮВ, Луковникова ГА, Иконникова МИ. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат; 1987.
5. Зайцев ВФ, Галямова ГК. Содержание и особенности распределения тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) в системе «почва – хвоя и листья древесных пород» на различных участках г. Усть-Каменогорска. Юг России: экология, развитие. 2012;4:66-71
6. Королюк МА, Иванова ЛИ, Майорова НО, Токарев ВЕ. Метод определения активности каталазы. Лабораторное дело. 1988;1:16.
7. Лисицын ЕМ, Шихова ЛН. Модификация структуры пигментного комплекса ячменя ионами свинца и кадмия. Аграрный вестник верхневолжья. 2016;3:30-6.
8. Михайлова ИД, Лукаткин АС. Перекисное окисление липидов в растениях огурца и редиса при действии тяжелых металлов. Изв Саратовского ун-та нов сер Хим Биол Эколя. 2016;2:206-10. DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-2-206-210
9. Решетник ГВ, Задиранова НС, Серов АВ. Активность антиоксидантных ферментов прорастающих семян пшеницы (*Triticum aestivum L.*) в условиях воздействия нитрата свинца. Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология Химия. 2017;69(2):37-46.
10. Сторчак ТВ, Крюкова ВА. Изменение некоторых физиологических показателей ряски малой (*Lemna minor L.*) при действии солей никеля и цинка. Бюллетень науки и практики. 2017;3:99-105. DOI: 10.5281/zenodo.399120
11. Сукиасян АР, Джангириян ТА, Унанян СА, и др. Транслокация тяжёлых металлов в растения из

- почв вблизи Алавердского горно-металлургического комбината. Теоретическая и прикладная экология. 2023;3:120-8. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-3-120-128
12. Титов АФ, Казнина НМ, Таланова ВВ. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2014.
  13. Третьяков НН. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. М.: Колос; 1998.
  14. Трубина МР, Воробейчик ЕЛ. Содержание тяжелых металлов в лекарственных растениях в зоне аэротехногенного воздействия Среднеуральского медеплавильного завода. Растительные ресурсы. 2013;49(2):203-22.
  15. Шведова АА, Полянский НБ. Метод определения конечных продуктов перекисного окисления липидов в тканях – флуоресцирующих шиффовых оснований. В кн.: Бурлакова ЕБ, ред. Исследование синтетических и природных антиоксидантов *in vitro* и *in vivo*. М.: Наука, 1992. С. 72-3.
  16. Шульгин ИА, Ничипорович АА. Расчет содержания пигментов с помощью номограмм. Хлорофилл. Минск: Наука и техника, 1974.
  17. Anjum SA, Tanveer M, Hussain S, Bao M, Wang L, Khan I. Cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.): consequences on antioxidant systems, reactive oxygen species and cadmium accumulation. Environmental Science and Pollution Research. 2015;21:17022-30. DOI: 10.1007/s11356-015-4882-z
  18. Aydin SS, Buyuk I, Gunduzer EG, Buyuk BP, Kandemir I, Cansaran-Duman D. et al. Effects of Lead (Pb) and Cadmium (Cd) Elements on Lipid Peroxidation, Catalase Enzyme Activity and Catalase Gene Expression Profile in Tomato Plants. Journal of agricultural sciences. 2016;22:539-47. DOI: 10.1501/Tarimbil\_0000001412
  19. Bates, LS, Waldren RP, Teare, ID. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil. 1973; 39:205-7. DOI: 10.1007/BF00018060
  20. Bharti KR, Sharma R. Effect of heavy metals: an overview. Materials Today: Proceedings. 2022;51:880-5 DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.278
  21. Boda RK, Majeti NVR, Suthari S. *Ricinus communis* L. (castor bean) as a potential candidate for revegetating industrial waste contaminated sites in peri-urban Greater Hyderabad: remarks on seed oil. Environ. Sci. Pollut. Res. 2017;24:19955-64. DOI: 10.1007/s11356-017-9654-5
  22. Elnabi MK, Elkaliny NE, Elyazied MM, Azab SH, Elkhalfia SA, Elmasry S. et al. Toxicity of Heavy Metals and Recent Advances in Their Removal: A Review. Toxics. 2023; 11(7):580-608. DOI: 10.3390/toxics11070580.
  23. Jańczak-Pieniążek M, Cichoński J, Michalik P, Chrzanowski G. Effect of Heavy Metal Stress on Phenolic Compounds Accumulation in Winter Wheat Plants. Molecules. 2023;28:241-55. DOI: 10.3390/molecules28010241
  24. Kapoor D, Rattan A, Bhardwaj R, Kaur S, Manoj AG. Antioxidative defense responses and activation of phenolic compounds in *Brassica juncea* plants exposed to cadmium stress. International journal of green pharmacy. 2016;10(4):228-34. DOI: 10.22377/ijgp.v10i04.760
  25. Maleki M, Ghorbanpour M, Kariman K. Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metals stress. Plant Gene. 2017;11:247-54. DOI: 10.1016/j.plgene.2017.04.006
  26. Ng CC, Boyce AN, Abas MR, et al. Evaluation of vetiver grass uptake efficiency in single and mixed heavy metal contaminated soil. Environmental Processes. 2020; 7:207-26. DOI: 10.1007/s40710-019-00418-2
  27. Popova E. Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019;1145:58. DOI: 10.1088/1742-6596/1145/1/012021
  28. Xie P, Deng J, Zhang H, Ma Y, Cao D, Ma R. et al. Effects of cadmium on bioaccumulation and biochemical stress response in rice (*Oryza sativa* L.). Ecotoxicology and Environmental Safety. 2015;122:392-98. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.09.007
  29. Yang Y, Zhang L, Huang X, Zhou Y, Quan Q, Li Y. et al. Response of photosynthesis to different concentrations of heavy metals in *Davallia solida*. PLoS One. 2020;15(3). DOI: 10.1371/journal.pone.0228563
  30. Zwolak A, Sarzynska M, Szpyrka E, Stawarczyk K. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review. Water Air Soil Pollut. 2019;230:164-75. DOI: 10.1007/s11270-019-4221-y

# ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС АЗОТА ПРИ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ КАК ДРАЙВЕР ЛЕТНЕГО НАКОПЛЕНИЯ БИОМАССЫ КРУПНЫХ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ: МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Н.И. Есин, А.В. Федоров**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Эл. почта: esinnik@rambler.ru; aleksey\_fedorov\_199001@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.08.2025; принята к печати 10.10.2025

В летний период в Черном море регистрируется ежегодное цветение крупноклеточных диатомей с высокой концентрацией биомассы. Для объяснения этого явления была проверена следующая гипотеза: периодические небольшие возмущения (вихри в толще воды), повышающие вертикальный перенос элементов питания, способствуют увеличению накопленной биомассы крупных диатомей в летний период. Вычислительные эксперименты на предложенной математической модели показали, что слабые захватывающие слои до 50 м периодические возмущения приводят к накоплению высоких (свыше 2 г/м<sup>3</sup>) концентраций биомассы крупноклеточных диатомовых водорослей в верхнем перемешанном слое.

**Ключевые слова:** фитопланктон, вихри, биогеохимия, математическая модель, диатомовые водоросли

## VERTICAL NITROGEN TRANSFER UPON WEAK PERTURBATIONS AS A DRIVER OF SUMMER ACCUMULATION OF BIOMASS OF LARGE-CELLED DIATOMS: A SIMULATION STUDY

**N.I. Yesin, A.V. Fedorov**

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Rusias

Email: esinnik@rambler.ru; aleksey\_fedorov\_199001@mail.ru

In summer, the annual blooms of large-celled diatoms resulting in high biomass concentration are recorded in the Black Sea. To explain this phenomenon, the following hypothesis was tested by modeling: periodic weak disturbances (eddies in water column), which increase the vertical transfer of nutrients, contribute to increasing the accumulated biomass of large-celled diatoms in summer. Computer-assisted experiments have shown that periodic weak disturbances (simulated eddies/entrapping layers up to 50 m) lead to the accumulation of high (over 2 g/m<sup>3</sup>) concentrations of biomass of large-celled diatoms in the upper mixed layer. These results support the storage hypothesis implying that large-celled diatoms capitalize on periodic nutrient pulses.

**Keywords:** phytoplankton, eddies, biogeochemistry, mathematical model, diatoms

## Введение

Океанический фитопланктон отвечает за половину ассимилируемого из атмосферы углерода [10], оказывая существенное регулирующее влияние на климат планеты. Биологический углеродный насос, представляющий собой сложную систему взаимосвязанных биогеохимических процессов по захвату атмосферного неорганического углерода, его трансформации и транспортировке на глубину, играет фундаментальную роль в регулировании климата [22, 29]. По своей структуре биологический углеродный насос состоит из трех важных помп. За растворение атмосферного углерода отвечает помпа растворимости. Поглощение неорганического углерода в реакциях фотосинтеза с образованием органического вещества представляет органическую помпу. Углерод

также может участвовать в реакциях образования кальциита, что является карбонатным насосом. Соотношение карбонатных и органических насосов зависит от структуры фитопланктона и, прежде всего, соотношения диатомового фитопланктона и кокколитофорид [15]. Диатомовые водоросли отвечают за работу органического насоса, кокколитофориды определяют работу карбонатного насоса. Следовательно, изменение соотношения в составе фитопланктона имеет фундаментальное значение для функционирования биологического углеродного насоса.

Одним из основных регуляторов структуры и продуктивности фитопланктонного сообщества являются концентрации питательных веществ в водной среде [8, 16]. Анализ большого массива данных, собранных за

20 лет (с 2002 по 2021 год.) в северо-восточной части Черного моря, показал, что весной (с конца февраля) преимущественно преобладают мелкие диатомеи; в конце весны и начале лета доминирует кокколитофорид *Emiliania huxleyi*; летом и осенью доминируют крупные диатомеи [4, 19, 23,]. К мелким диатомовым водорослям, чаще всего из рода *Pseudo-nitzschia*, относятся виды с объемом клеток до 1000 мкм<sup>3</sup>. Крупные диатомеи – это виды с объемом клеток более 10000 мкм<sup>3</sup>. В северо-восточной части Черного моря они представлены двумя видами *Pseudosolenia calcar-avis* и *Proboscia alata*. Смена доминирования от одного вида к другому контролируется доступностью питательных веществ и их стехиометрией, которая в основном зависит от стабильности водной толщи [4, 23]. Это подтверждено результатами моделирования [5]. Показано, что мелкие диатомовые водоросли доминируют при высоких концентрациях азота и фосфора и при их соотношении, близком к соотношению Редфилда [21] (атомное соотношение азота N и фосфора P в морской воде, составляющее N:P = 16:1). Кокколитофориды доминируют при низких концентрациях азота и при соотношении ниже соотношения Редфилда. Крупные диатомовые водоросли являются доминантами при низких концентрациях фосфора и при соотношении азота к фосфору существенно выше соотношения Редфилда. Однако эти выводы получены для стабильных состояний без возмущений водной толщи. Представляется интересным проследить эффекты периодических возмущений водной толщи, изменяющих вертикальный перенос элементов питания. Эти возмущения могут быть различной природы: повышенная ветровая накачка, кратковременные вихревые образования и т.п. [1, 18]. Во время летних непродолжительных возмущений происходит подъем водных масс с повышенной концентрацией азота с небольших глубин. За счет этого возмущения происходит изменение концентрации азота в среде и увеличение скорости перемешивания поверхностных слоев воды с глубинными слоями, что должно оказывать влияние структуру фитопланктона и продуктивность. В данной работе с помощью оригинальных модельных расчетов оценена возможная степень влияния возмущений на видовую структуру и биомассу фитопланктона.

Основная гипотеза, которая проверяется в этом исследования, следующая: небольшие возмущения, повышающие вертикальный перенос элементов питания, способны приводить к увеличению накапленной биомассы крупных диатомей в летний период.

### Математическая модель

В данной работе используется математическая модель сезонной динамики фитопланктона, которая применима для изучения сукцессионных процессов, вызванных изменениями гидрофизических и гидро-

химических условий. В основе модели лежит концепция внутриклеточной регуляции роста фитопланктона, которая подразумевает, что рост определяется содержанием лимитирующего рост элемента питания в клетке согласно уравнению Друпа [9]:

$$\mu_{ij} = \mu_{ij}^m \left( 1 - \frac{q_{ij}}{Q_{ij}} \right) \quad (1)$$

где:  $m$  где:  $\mu_{ij}$  и  $\mu_{ij}^m$  – текущая и максимальная удельная скорость роста  $i$ -го вида при лимитировании  $j$ -м питательным веществом, соответственно;  $Q_{ij}$  и  $q_{ij}$  – текущее содержание элемента в биомассе и минимальная квота, для  $j$ -го элемента у  $i$ -го вида.

Процесс поглощения элементов питания описывается уравнением Михаэлиса-Ментен:

$$v_{ij}(C_{ij}) = \frac{v_{ij}^m(C_j)C_j}{K_{ij} + C_j} \quad (2)$$

где:  $v_{ij}$  и  $v_{ij}^m$  – текущая и максимальная удельная скорость поглощения, соответственно,  $j$ -го элемента  $i$ -ым видом;  $K_{ij}$  – константа полусыщения для поглощения, соответственно,  $j$ -го элемента  $i$ -ым видом.

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dW_i}{dt} &= [\min_j \mu_{ij}(Q_{ij}, I_z) - D]W_i \\ \frac{dC_j}{dt} &= D(C_{oj} - C_j) - \sum_{i=1}^n v_{ij}(C_j)W_i \quad (3) \\ \frac{dQ_{ij}}{dt} &= v_{ij}(C_j) - Q_{ij} \min_j \mu_{ij}(Q_{ij}, I_z) \end{aligned}$$

где:  $W_i$  и  $C_j$  представляют собой соответственно концентрацию биомассы  $i$ -го вида и концентрацию  $j$ -го элемента минерального питания в среде;  $C_{oj}$  – концентрация  $j$ -го элемента минерального питания в термоклине;  $Q_{ij}$  – текущая клеточная квота для  $j$ -го вещества в биомассе  $i$ -го вида (содержание элемента в биомассе);  $D$  – скорость обмена воды в верхнем перемешанном слое;  $I_z$  – освещённость ФАР (фотосинтетически активная радиация) на глубине  $z$ ;  $v_{ij}$  – скорость потребления  $j$ -го вещества  $i$ -ым видом;  $\mu_{ij}$  – удельная скорость роста  $i$ -го вида в зависимости от  $j$ -го питательного вещества. Здесь применяется принцип минимума, который обычно используется для описания динамики фитопланктона [25, 26].

Система уравнений (3) описывает динамику биомассы фитопланктона, концентрацию азота и фосфора в воде, а также содержание азота и фосфора в биомассе изучаемых видов. Модель используется для исследования динамики сообщества трех видов: *Emiliania huxleyi* (*Eh*), мелкоклеточного вида диатомей *Pseudo-nitzschia delicatissima* (*Pn*) и крупноклеточного вида диатомей *Proboscia alata* (*Pa*).

Компьютерные эксперименты с моделью выполненные в среде программного пакета Maple имитируют реакцию фитопланктонного сообщества на изменения внешних условий. Эти условия описываются значениями параметров из общей табл. 1 с учетом сезонных особенностей.

Максимальная удельная скорость роста биомассы рассматриваемых видов оценивалась на основании многочисленных экспериментальных данных по культивированию природных популяций фитопланктона в лабораторных условиях. Константы полунасыщения оценивались с учетом значений остаточной концентрации соответствующего элемента питания [5]. Исходные условия содержания азота и фосфора в биомассе были равны их минимальным нормам, то есть клетки были ограничены в этих питательных веществах. Минимальные квоты рассчитывали, исходя из минимального содержания белка в биомассе фитопланктона [11]. У фотоавтотрофов структурный азот связан прежде всего с содержанием хлоропластов. Рассчитывали удельный объем хлоропластов (отношение объема хлоропластов к объему клетки). Морфологические измерения показывают, что у *Emiliania huxleyi* этот показатель самый низкий – один хлоропласт на клетку. Вторым источником информации стали лабораторные эксперименты по выращиванию природных популяций при различных концентрациях азота и фосфора [2], в результате которых было определено оптимальное соотношение N:P для доминирования изучаемых видов. Эти оценки использовались для оценки коэффициентов минимальных квот.

## Результаты вычислительных экспериментов

На рис. 1, 3, 5 и 7 представлены результаты расчетов для стационарного состояния среды, свойственного летнему периоду, и вариации расчетов с моделируемым процессом возмущения, который имитируется увеличением скорости обмена воды  $D$ , и изменения концентрации лимитирующих питательных элементов в среде в период такого возмущения. Остальные параметры во всех вариантах расчетов остаются неизменными для того, чтобы можно было сравнить, как влияет та или иная конфигурация возмущений на динамику биомассы фитопланктона. Каждый расчет представлен в двух вариантах при разных начальных концентрациях биомасс видов.

### Летний период без возмущений

Лето характеризуется высокой инсоляцией и температурой поверхности воды, загубленным термо-клином и высоким соотношением азота к фосфору [4]. Представленный на рис. 1 результат расчетов демонстрирует типичную для летнего периода времени картину. При высоком содержании азота и низком содержании фосфора доминирующим видом становится *Pa*.

Концентрации азота и фосфора на входе определены как средние многолетние (2002–2023 годы) данные [5]:  $C_{\text{NO}_3} = 0,75 \text{ моль/м}^3$ ;  $C_{\text{PO}_4} = 0,01 \text{ моль/м}^3$ . Предполагалось, что скорость водообмена верхнего смешанного слоя составляет 10%, что является наиболее реалистичным показателем для начала лета. Во второй половине лета этот параметр может быть немного выше, но расчеты не показывают существенных изменений в динамике при водообмене 10 – 20%.

В качестве начальных концентраций биомассы рассматривались две ситуации:

1. Равные биомассы исследуемых видов  $100 \text{ мг/м}^3$  (этую величину выбрали, исходя из многолетних полевых наблюдений, при этой биомассе вид становится доминирующим);

2. Изначальное доминирование *P. alata*.

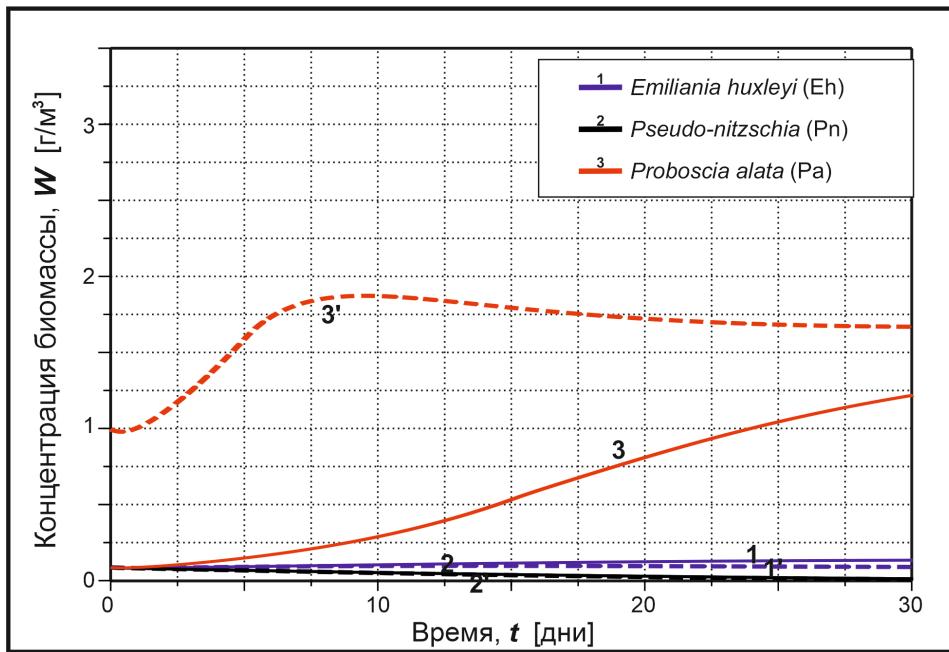
В условиях высокого содержания азота и низкого содержания фосфора доминирующим видом становится *P. alata*. При одинаковых и низких концентрациях биомассы всех видов наблюдается медленный процесс накопления биомассы доминирующего вида, концентрация биомассы, равная  $1 \text{ г/м}^3$ , достигается только к 25-му дню.

Изменение начальной биомассы *P. alata* до  $1 \text{ г/м}^3$  приводит к существенному повышению скорости накопления и уровня биомассы, которая ниже  $2 \text{ г/м}^3$ .

Табл. 1.

Параметры расчетов для летнего периода времени

Коэффициент	Размерность	Вид		
		<i>Emiliania huxleyi</i>	<i>Pseudo-nitzschia pseudo-delicatissima</i>	<i>Proboscia alata</i>
$\mu_{\text{NO}_3}^m$	1/день	1,5	3,5	1,5
$\mu_{\text{PO}_4}^m$	1/день	1,55	3,5	1,22
$v_{\text{NO}_3}^m$	г/(день·г сырого веса)	0,00225	0,0105	0,006
$v_{\text{PO}_4}^m$	г/(день·г сырого веса)	0,00031	0,00035	0,0000244
$K_{\text{NO}_3}$	г/м <sup>3</sup>	0,0042	0,0112	0,028
$K_{\text{PO}_4}$	г/м <sup>3</sup>	0,0031	0,016	0,0001
$q_N$	г/(день·г сырого веса)	0,0015	0,003	0,004
$q_P$	г/(день·г сырого веса)	0,0002	0,0001	0,00002



**Рис. 1.** Сплошные линии – расчёт для равных начальных концентраций биомассы всех видов  $W_i(0) = 0,1 \text{ г/м}^3$ ; пунктирные линии – расчёт при начальных условиях  $W_{\text{Eh}}(0) = 0,1 \text{ г/м}^3$ ,  $W_{\text{Pn}}(0) = 0,1 \text{ г/м}^3$ ,  $W_{\text{Pa}}(0) = 0,1 \text{ г/м}^3$

### Летний период, возмущение с 10-го расчетного дня

В этом случае рассматриваемое возмущение начинается с 10-го расчетного дня и продолжается в течение трех дней. Концентрация азота в морской воде на глубине более 50 метров может вдвое превышать это же значение для поверхностных слоев. Принимаем, что  $D$  в период апвеллинга увеличивается в 2,5 раза, а  $C_{\text{on}}$  возрастает с 0,75 до 1,3 ммоль/м<sup>3</sup> (рис. 2).

Представленный на рис. 3 результат расчетов демонстрирует схожую с рис. 1 картину, за исключением временного спада скорости роста доминирующего вида в период возмущения и разницы между пиковыми значениями биомассы *P. alata*, которая превышает 2 г/м<sup>3</sup>.

### Летний период, два периодических возмущения

Считаем, что первое возмущение начинается с 1-го расчетного дня и продолжается три дня, затем условия среды возвращаются к обычным. Второе возмущение начинается с 8-го расчетного дня и длится также три дня. Принимаем, что  $D$  в период апвеллинга (возмущения) увеличивается в 2,5 раза, а  $C_{\text{on}}$  возрастает с 0,75 до 1,3 ммоль/м<sup>3</sup> (рис. 4).

Представленный на рис. 5 результат расчетов демонстрирует схожую с предыдущими результатами картину, за исключением периодов спада скорости роста доминирующего вида (связанных с периодами апвеллингов) и разницы в пиковых значениях биомассы *P. alata*, которая превышает 2,5 г/м<sup>3</sup>.

### Летний период, три периодических возмущения

Представленные на рис. 6 и 7 данные демонстрируют, что каждое последующее возмущение усиливает накопление биомассы *Proboscia alata*, несмотря на кратковременное снижение скорости роста во время активного перемешивания. Это согласуется с гипотезой накопления: крупные диатомеи эффективно используют периодические импульсы азота благодаря высокой скорости поглощения и способности запасать питательные вещества в вакуолях. Максимальная биомасса (свыше 2 г/м<sup>3</sup>) достигается после третьего возмущения, что подтверждает важную роль слабых, но частых возмущений в поддержании летнего цветения. Такая динамика объясняет наблюдаемые в Черном море высокие концентрации диатомей даже в условиях стабильного дефицита фосфора.

### Обсуждение

Лето характеризуется слабыми ветрами, которые периодически меняют направление с юго-востока на северо-восток [6]. В июле наблюдаются лишь редкие штормы с низким волнением, в конце лета и начале осени штормы становятся более частыми и интенсивными, с более высоким волнением. Кроме того, для лета свойственно наличие сезонного термоклина, который имеет тенденцию заглубляться [23]. Он изолирует верхний перемешанный слой от более глубоких вод, богатых элементами питания. Летом концентрации N и P относительно низкие, а соотно-

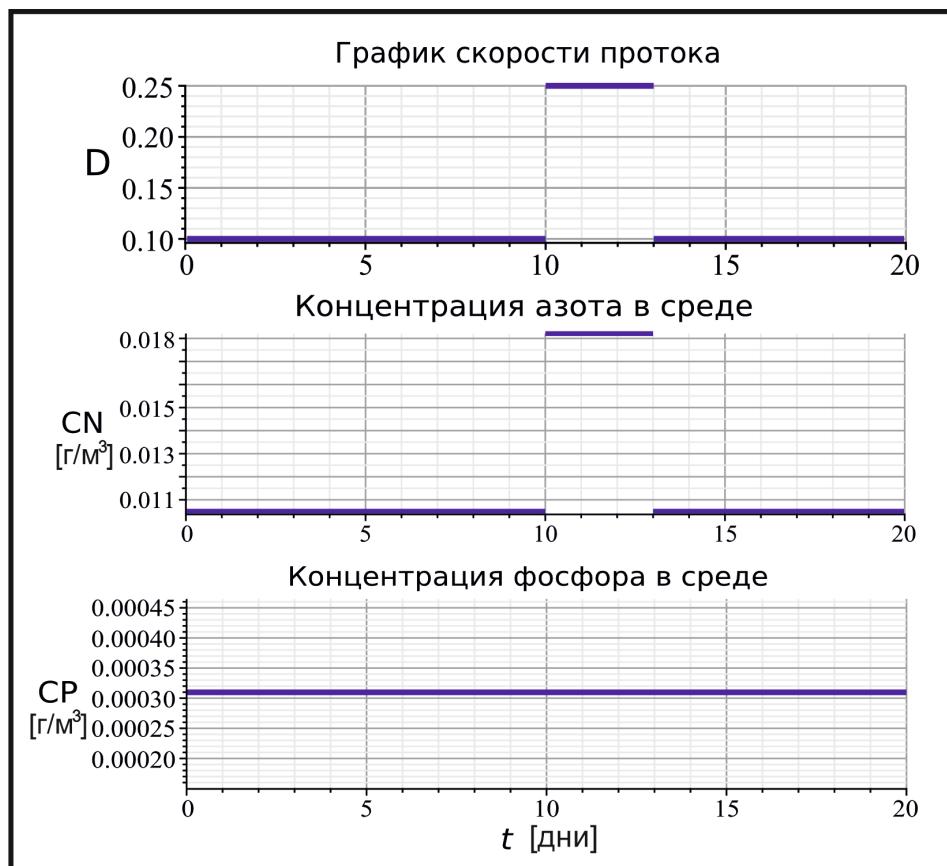


Рис. 2. Графики изменения скорости протока  $D(t)$ , концентрации азота в среде  $C_{0N}(t)$ , концентрации фосфора в среде  $C_{0P}(t)$

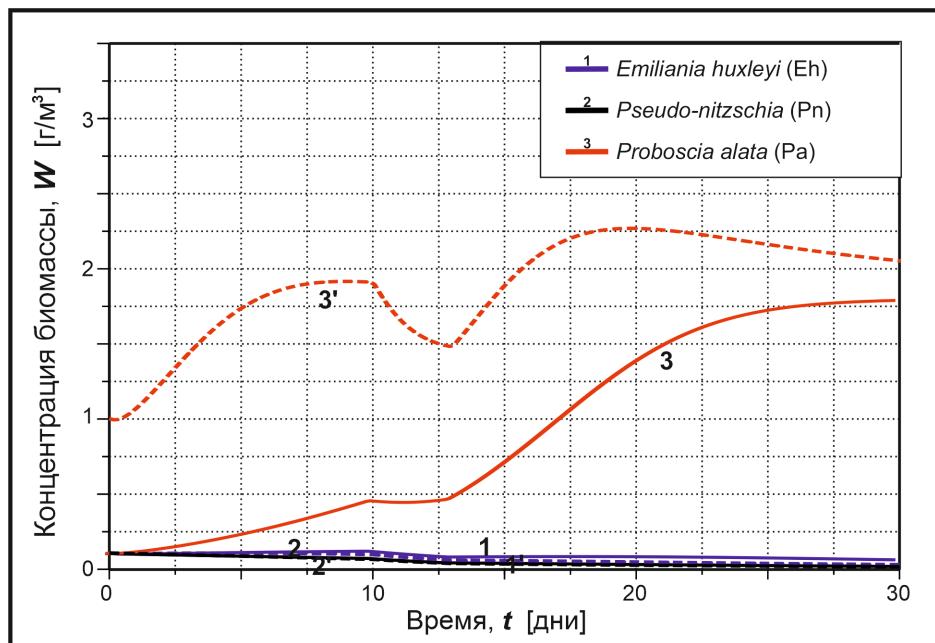


Рис. 3. Сплошные линии – расчет для равных начальных концентраций биомассы всех видов  $W_i(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ; пунктирные линии – расчёт при начальных условиях  $W_{Eh}(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $W_{Pn}(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $W_{Pa}(0) = 1 \text{ г}/\text{м}^3$

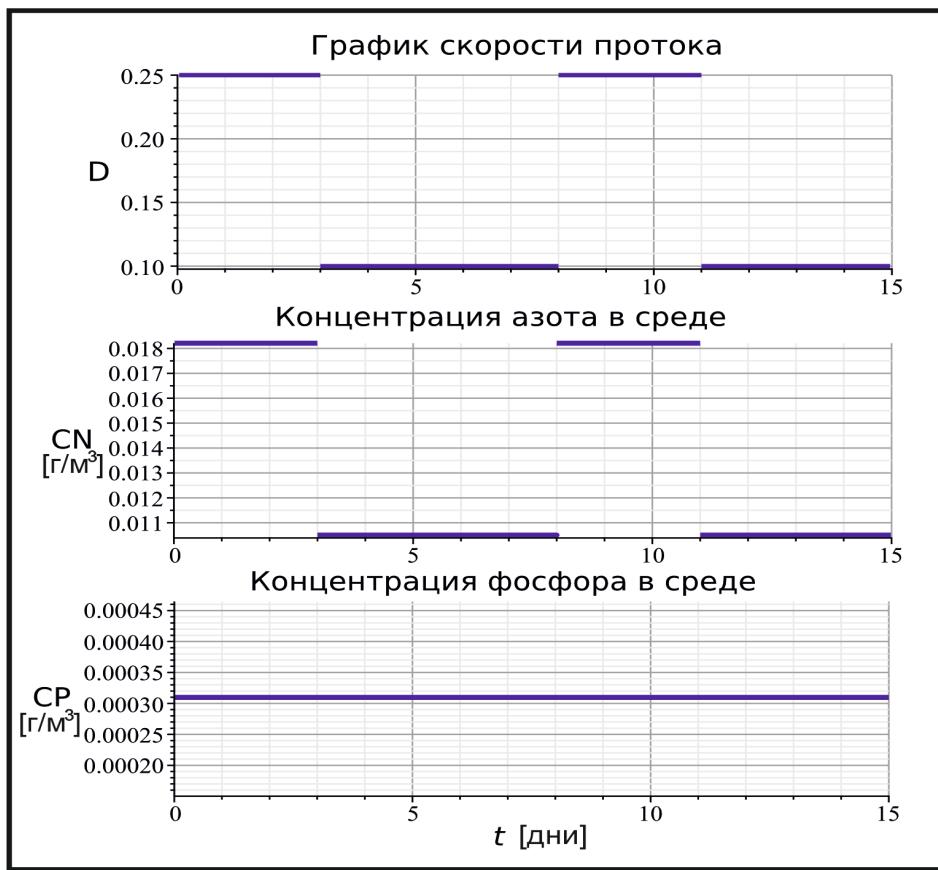


Рис. 4. График изменения скорости протока  $D(t)$ , концентрации азота в среде  $C_{\text{ON}}(t)$ , концентрации фосфора в среде  $C_{\text{OP}}(t)$

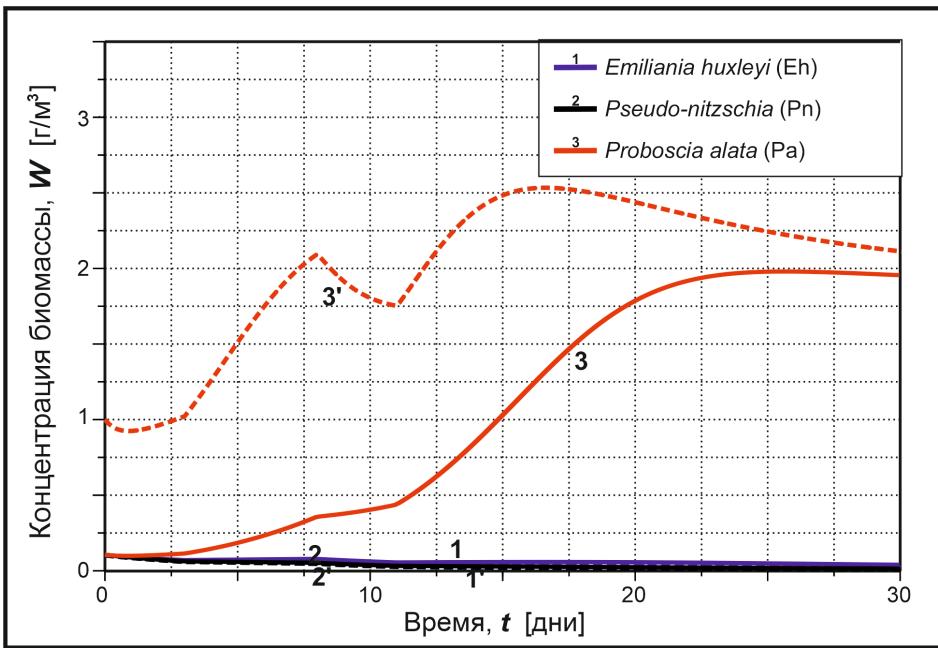


Рис. 5. Сплошные линии – расчёт для равных начальных концентраций биомассы  $W_i(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ; пунктирные линии – расчёт при начальных условиях  $W_{\text{Eh}}(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $W_{\text{Pn}}(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $W_{\text{Pa}}(0) = 1 \text{ г}/\text{м}^3$

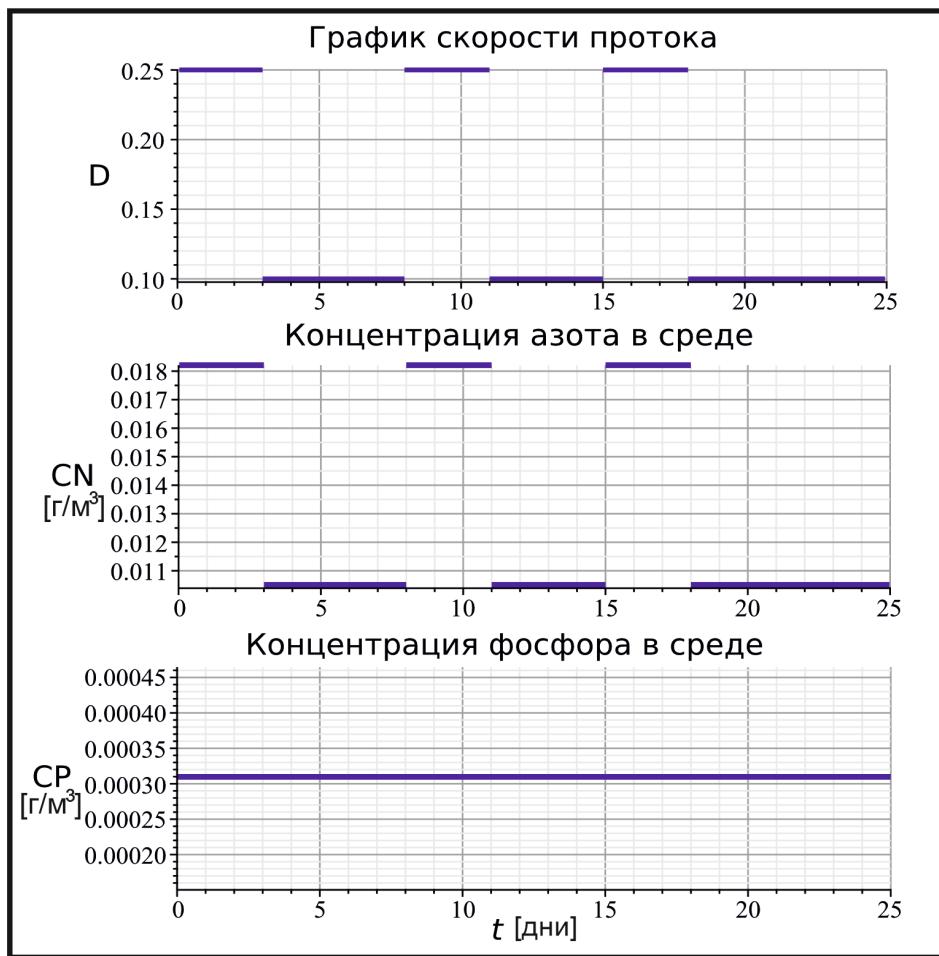


Рис. 6. График изменения скорости протока  $D(t)$ , концентрации азота в среде  $C_{\text{ON}}(t)$ , концентрации фосфора в среде  $C_{\text{OP}}(t)$

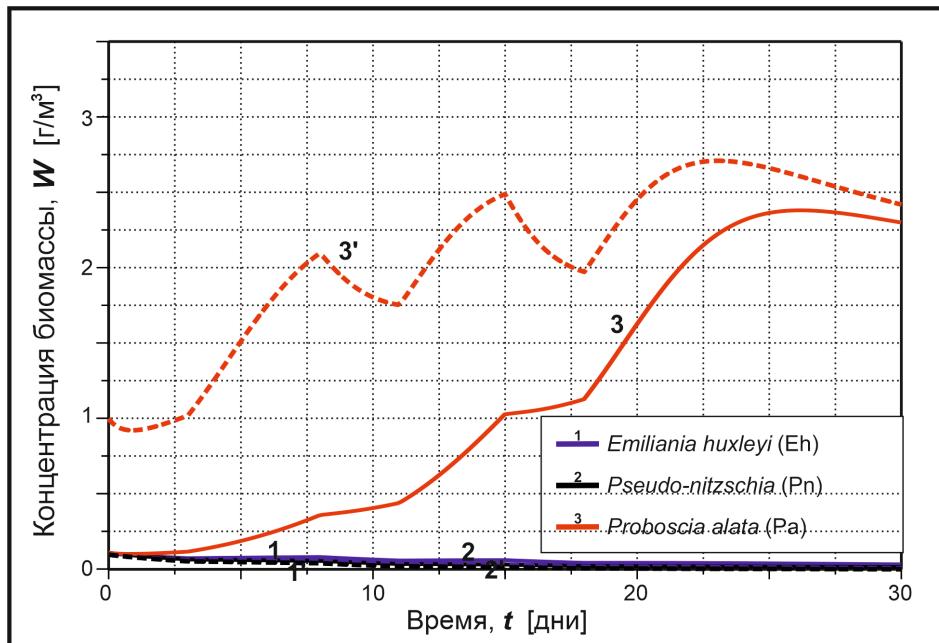


Рис. 7. Сплошные линии – расчет для равных начальных концентраций биомассы  $W_i(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ; пунктирные линии – расчет при начальных условиях  $W_{\text{Eh}}(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $W_{\text{Pn}}(0) = 0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $W_{\text{Pa}}(0) = 1 \text{ г}/\text{м}^3$

шение N:P намного выше соотношения Редфилда. В таких условиях основными доминирующими видами являются крупные диатомовые водоросли *Proboscia alata* и *Pseudosolenia calcar-avis*. Летом достигается самая высокая биомасса крупных диатомовых водорослей, превышающая 3 г/м<sup>3</sup> [23]. Вклад этих диатомовых водорослей в общую биомассу фитопланктона (исключая пикопланктон) был всегда выше 90%, при максимальном вкладе 99%. Причины доминирования крупных диатомовых водорослей остается предметом дискуссий. Существуют несколько основных гипотез, объясняющих конкурентные преимущества крупных диатомовых летом. Их можно разделить на два класса - биотические и абиотические. Согласно первому типу гипотез, доминирование обусловлено сужением спектра потенциальных хищников из-за размера крупноклеточных диатомовых водорослей по сравнению с мелкоклеточными видами фитопланктона [13, 14]. Принцип соответствия размеров хищника и жертвы применяется в моделировании морских экосистем [30]. К этому типу гипотез можно отнести гипотезу защиты от вирусов [12], согласно которой кремниевая оболочка клетки обеспечивает надежную защиту от проникновения вирусов. Однако этой гипотезой нельзя объяснить полное отсутствие мелких диатомовых водорослей и то, почему в сообществе остается только один вид.

К абиотическим гипотезам относятся те, которые связывают конкурентные преимущества с организацией материальных и энергетических потоков в клетке. Первая, так называемая гипотеза накопления (storage), связывает способность крупноклеточных видов выиграть конкуренцию у других видов с большими возможностями накапливать лимитирующие рост вещества. Крупные диатомовые водоросли характеризуются большим вакуолярным объемом, в котором могут храниться питательные вещества [20]. Это обеспечивает им высокие скорости поглощения питательных веществ, и в период периодического повышенного вертикального переноса питательных веществ водоросли их накапливают и используют в условиях ограничения [27, 28].. Математическое моделирование показало, что эта гипотеза не противоречит результатам вычислений и имеет право на существование в случае, когда подъем питательных веществ в основном касается глубин, богатых азотом,

которые располагаются обычно выше, чем слои, богатые фосфором [17, 24].

Энергетическая гипотеза объясняет конкурентное преимущество крупных диатомовых водорослей летом в условиях высокой инсоляции их способностью регулировать количество поглощенной энергии света с помощью движения хлоропластов, что позволяет им избежать фотоингибиции [3].

## Заключение

Фундаментальная роль в регуляции фитопланктонных сообществ принадлежит сильным физическим возмущениям, которые определяют смену видов в сезонной динамике фитопланктона [7]. Мы рассмотрели влияние слабых возмущений в период доминирования одного вида. Слабые возмущения, повышающие вертикальный перенос азота, способствуют более быстрому накоплению биомассы доминирующего вида. Пиковая биомасса превысила 2.5 г/м<sup>3</sup> по сравнению с 1.8 г/м<sup>3</sup> без возмущений. Это объясняет высокие биомассы крупных диатомовых водорослей при относительно низких концентрациях азота и фосфора в верхнем перемешанном слое. Очевидно, что гипотеза накопления адекватно отражает ситуацию доминирования крупных диатомовых водорослей летом. Она позволяет также объяснить конкурентные преимущества в условиях небольших возмущений. Вычислительные эксперименты показали, что такой режим обеспечивает не только вытеснение других видов фитопланктона, но с каждым возмущением происходит накопление биомассы. Таким образом, режим периодических слабых возмущений является важным регулятором органической помпы, основанной на крупноклеточном диатомовом фитопланктоне.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН №FMWE-2024-0027 «Комплексные исследования морских природных систем Черного и Азовского морей» и поддержана грантом РНФ № 23-17-00056, «Роль вертикального обмена в формировании структуры фитопланктона и первичной продуктивности в морских экосистемах на примере Черного моря».*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Микаэлян АС, Зацепин АГ, Кубряков АА. Влияние мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем. Морской гидрофизический журнал. 2020;27(6):590-619.
2. Силкин ВА, Паутова ЛА, Пахомова СВ, Лифанчук АВ, Якушев ЕВ, Часовников ВК. Экологический контроль структуры фитопланктона в северо-восточной части Черного моря. Журнал экспериментальной морской биологии и экологии. 2014;461:267-74.

3. Силкин ВА, Паутова ЛА, Федоров АВ. Годовая динамика фитопланктона Черного моря в зависимости от ветрового воздействия. Инженерные морские науки. 2021;9. DOI:10.3390/jmse9121435.
4. Силкин ВА, Паутова ЛА, Подымов ОИ, Часовников ВК, Лифанчук АВ, Федоров АВ. Фитопланктонная динамика и биогеохимия Черного моря. Инженерные морские науки. 2023;11: DOI:10.3390/jmse11061196.
5. Силкин ВА, Абакумов АА, Есин НИ, Паутова ЛА, Лифанчук АВ, Федоров АВ. Динамика фитопланктона и биогеохимия: модельные исследования. Инженерные морские науки. 2024;12. DOI:10.3390/jmse12010178.
10. Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*. 1998;281(5374):237-40.
11. Finkel ZV, Follows MJ, Liefer JD, Brown CM, Benner I, Irwin AJ. Phylogenetic diversity in the macromolecular composition of microalgae. *PLoS ONE*. 2016;11(5): DOI:10.1371/journal.pone.0155977.
12. Flynn KJ, Kimmance SA, Clark DR, Mitra A, Polimene L, Wilson WH. Modelling the effects of traits and abiotic factors on viral lysis in phytoplankton. *Front Mar Sci*. 2021;8: DOI:10.3389/fmars.2021.667184.
13. Kiørboe T. A Mechanistic Approach to Plankton Ecology. Princeton: Princeton University Press; 2008.
14. Kiørboe T. How zooplankton feed: Mechanisms, traits and trade-offs. *Biol Rev Camb Philos Soc*. 2011;86(2):311-39.
15. Legendre L, Rivkin RB, Weinbauer MG, Guidi L, Uitz J. The microbial carbon pump concept: Potential biogeochemical significance in the globally changing ocean. *Prog Oceanogr*. 2015;134:432-50.
16. Litchman E, de Tezanos Pinto P, Edwards KF, Klausmeier CA, Kremer CT, Thomas MK. Global biogeochemical impacts of phytoplankton: A trait-based perspective. *J Ecol*. 2015;103(6):1384-96.
17. Litchman E, Klausmeier CA, Yoshiyama K. Contrasting size evolution in marine and freshwater diatoms. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2009;106(8):2665-70.
18. Mikaelyan AS, Mosharov SA, Pautova LA, Fedorov A, Chasovnikov VK, Kubryakov AA. The impact of physical processes on taxonomic composition, distribution and growth of phytoplankton in the open Black Sea. *J Mar Syst*. 2020;208: DOI:10.1016/j.jmarsys.2020.103368.
19. Mikaelyan AS, Pautova LA, Chasovnikov VK, Mosharov SA, Silkin VA. Alternation of diatoms and coccolithophores in the north-eastern Black Sea: a response to nutrient changes. *Hydrobiologia*. 2015;755(1):89-105.
20. Raven JA. The role of vacuoles. *New Phytol*. 1987;106(3):357-422.
21. Redfield AC. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. In: James Johnstone Memorial Volume. Liverpool: Liverpool University Press; 1934. p. 176-92.
22. Sarmiento JL, Gruber N. Ocean biogeochemical dynamics. Princeton: Princeton University Press; 2006.
23. Silkin VA, Pautova LA, Giordano M, Chasovnikov VK, Vostokov SV, Podymov OI, Pakhomova SV, Moskalenko LV. Drivers of phytoplankton blooms in the northeastern Black Sea. *Mar Pollut Bull*. 2019;138:274-84.

### Общий список литературы / Reference List

1. Mikaelyan AS, Zatsepin AG, Kubriakov AA. [Effect of mesoscale vortex dynamics on marine ecosystem productivity]. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2020;27(6):590-619. (In Russ.)
2. Silkin VA, Pautova LA, Pakhomova SV, Lifanchuk AV, Yakushev EV, Chasovnikov VK. [Environmental control on phytoplankton community structure in the northeastern Black Sea]. *Zhurnal Eksperimentalnoy Morskoy Biologii i Ekologii*. 2014;46:1:267-74. (In Russ.)
3. Silkin V, Mikaelyan AS, Pautova L, Fedorov A. [Annual dynamics of phytoplankton in the Black Sea in relation to wind exposure]. *Inzhenernye Morskiye Nauki*. 2021;9. DOI:10.3390/jmse9121435. (In Russ.)
4. Silkin VA, Pautova LA, Podymov OI, Chasovnikov VK, Lifanchuk AV, Fedorov AV. [Phytoplankton dynamics and biogeochemistry of the Black Sea]. *Inzhenernye Morskiye Nauki*. 2023;11. DOI:10.3390/jmse11061196. (In Russ.)
5. Silkin VA, Abakumov AA, Esin NI, Pautova LA, Lifanchuk AV, Fedorov AV. [Phytoplankton dynamics and biogeochemistry: Model studies]. *Inzhenernye Morskiye Nauki*. 2024;12: DOI:10.3390/jmse12010178. (In Russ.)
6. Arkhipkin VS, Gippius FN, Koltermann KP, Surkova GV. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2014;14:2883-97.
7. Barton AD, Pershing AJ, Litchman E, Record NR, Edwards KF, Finkel ZV, Kiørboe T, Ward BA. The biogeography of marine plankton traits. *Ecol Lett*. 2013;16(4):522-34.
8. Cermeno P, Dutkiewicz S, Harris RP, Follows M, Schofield O, Falkowski PG. The role of nutricline depth in regulating the ocean carbon cycle. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2008;105(49):20344-9.
9. Droop MR. The nutrient status of algal cells in continuous culture. *J Mar Biol Assoc UK*. 1974;54(4):825-55.

24. Stolte W, Riegman R. A model approach for size-selective competition of marine phytoplankton for fluctuating nitrate and ammonium. *J Phycol.* 1996;32(5):732-40.
25. Tilman D. Resource competition between planktonic algae: An experimental and theoretical approach. *Ecology.* 1977;58(2):338-48.
26. Tilman D. Resource competition and community structure. Princeton: Princeton University Press; 1982.
27. Tozzi S, Schofield O, Falkowski P. Historical climate change and ocean turbulence as selective agents for two key phytoplankton functional groups. *Mar Ecol Prog Ser.* 2004;274:123-32.
28. Verdy A, Follows M, Flierl G. Optimal phytoplankton cell size in an allometric model. *Mar Ecol Prog Ser.* 2009;379:1-12.
29. Volk T, Hoffert MI. Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO<sub>2</sub> changes. In: Sundquist ET, Broecker WS, editors. *The carbon cycle and atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural variations Archean to present.* Washington: American Geophysical Union; 1985. p. 99-110.
30. Ward BA, Dutkiewicz S, Jahn O, Follows MJ. A size-structured food-web model for the global ocean. *Limnol Oceanogr.* 2012;57(6):1877-1891.



УДК 551.465.7

CC BY-NC 4.0

© А.А. Целентис, А.В. Федоров; ФНИ «XXI век»

# ГРАВИТАЦИОННЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ НАСОС В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ. ПОДХОДЫ И РЕШЕНИЯ

**А.А. Целентис\*, А.В. Федоров**

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

\*Эл. почта: [al.tselentis@gmail.com](mailto:al.tselentis@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 17.08.2025; принята к печати 14.10.2025

Исследован механизм гравитационного углеродного насоса в северо-восточной части Чёрного моря, основанный на сезонной динамике фитопланктона. Показано, что органическая (диатомовые водоросли) и карбонатная (кокколитофориды *Emiliania huxleyi*) помпы сменяют друг друга, демонстрируя различный экспортный потенциал органического углерода. Методами микроскопии и с учетом закона Стокса проведена оценка скорости оседания частиц. Установлено, что летне-осенние виды диатомей *Pseudosolenia calcar-avis* и *Proboscia* обладают максимальной скоростью оседания (до 2,47 м/сут). У агрегатов этих крупных диатомовых водорослей, образующих «морской снег», скорость оседания возрастает более чем на порядок. Виды весеннего цветения – мелкоклеточные диатомеи и единственные представители карбонатной помпы кокколитофориды – остаются в эвфотическом слое длительное время (до 100 суток). Результаты важны для понимания механизмов функционирования биологического углеродного насоса и оценки роли Чёрного моря в глобальном углеродном цикле.

**Ключевые слова:** Чёрное море, фитопланктон, морской снег, скорость оседания, закон Стокса.

## GRAVITATIONAL CARBON PUMP IN THE NORTHEASTERN PART OF THE BLACK SEA. APPROACHES AND SOLUTIONS

**A.A. Tselentis, A.V. Fedorov**

Shirshov Institute of Oceanology, the Russian Academy of Sciences, Gelendjik, Russia

E-mail: [al.tselentis@gmail.com](mailto:al.tselentis@gmail.com)

The mechanism of the gravitational carbon pump in the northeastern Black Sea has been investigated based on the seasonal dynamics of phytoplankton. It has been shown that the organic (diatom algae) and carbonate (the coccolithophore *Emiliania huxleyi*) pumps alternate, demonstrating different export potentials for organic carbon. Particle sinking rates were assessed using microscopy with account for the Stokes law. It has been found that the summer-autumn diatom species *Pseudosolenia calcar-avis* and *Proboscia* possess the maximum sinking rate (up to 2.47 m/day). The sinking rate of aggregates of these large diatoms, which form "marine snow", increases by more than an order of magnitude. Species associated with spring blooms – small-celled diatoms and the sole representatives of the carbonate pump, coccolithophores – remain in the euphotic layer for an extended period (up to 100 days). The results are important for understanding the functioning mechanisms of the biological carbon pump and assessing the role of the Black Sea in the global carbon cycle.

**Keywords:** Black Sea, phytoplankton, marine snow, deposition rate, Stokes law.

### Введение

Функционирование биологического углеродного насоса (БУН), который осуществляет захват атмосферного углерода и перенос его в глубокие слои океана, является принципиальным для формирования климата [25, 35]. Считается, что в индустриальную эпоху климатические сдвиги связаны с повышением уровня углекислого газа в атмосфере [9,10], в первую очередь из-за сжигания ископаемого топлива. Основным механизмом снижения концентрации углекислого газа в атмосфере является его связывание в реакциях фотосинтеза с образованием органического

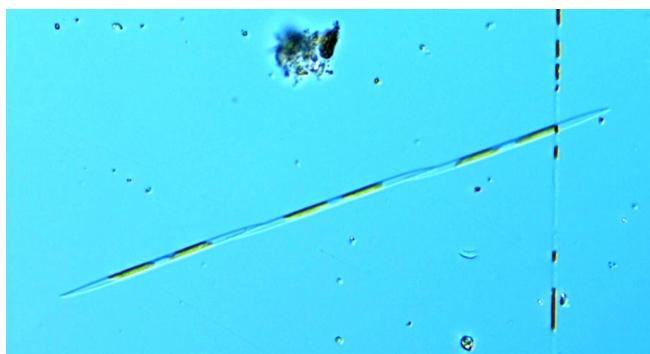
вещества, и этот процесс лежит в основе органической помпы. Кроме того, растворенный в воде углекислый газ может связываться в реакциях образования кальцита, и этот биологический процесс определяет функционирование карбонатной помпы.

В океане основную роль в функционировании органической помпы играют диатомовые водоросли [32], которые формируют до 40% первичной продукции. Работу карбонатной помпы в океане более чем на 50% определяют кокколитофориды [18, 23], которые обладают свойством формировать оболочку клетки из кальцитовых пластин – кокколит. Основным видом

кокколитофорид в океане является *Emiliania huxleyi*, которая образует обширные цветения, обычно тяготеющие к высоким широтам [12, 22, 34]. Вывод связанных углерода как в органической, так и неорганической форме из эвфотической зоны в глубокие слои осуществляется с помощью трех основных механизмов переноса углерода [7, 8, 15, 24]. Первый механизм переноса основан на гравитационном осаждении частиц органического вещества за счет разницы в удельной плотности [24]. Он получил название гравитационного насоса. В последнее время выделяется дополнительно еще несколько процессов переноса углерода из эвфотического слоя в глубокие слои. Они относятся к механизмам активного переноса [7]. Среди них выделяют три чисто физических способа переноса и два биологических [7, 8, 15]. Есть оценки вклада каждого из этих механизмов переноса углерода в общий глобальный экспорт углерода: гравитационный насос экспортирует 70%, на остальные приходится 30% [20].

В Черном море биологический углеродный насос представлен как органической, так и карбонатной помпами [4], которые сменяют друг друга в сезонной динамике. Органическая помпа включает мелких диатомей, доминирующих весной, и крупных диатомей, образующих цветение летом и осенью. Карбонатная помпа функционирует в конце весны и начале лета за счет цветения кокколитофориды *Emiliania huxleyi*.

Однако, до настоящего времени не проведены оценки скорости оседания основных доминант фитопланктона Черного моря, формирующих БУН. По этой причине в настоящем исследовании сделана попытка оценить скорости оседания всех доминант – структурных элементов БУН. Рассматривается следующая гипотеза: мелкоклеточные виды диатомовых водорослей и кокколитофорида *E. huxleyi* практически не выходят за пределы эвфотической зоны, основной экспортный потенциал формируют крупные диатомовые водоросли.



**Рис. 1.** Мелкая пеннатная диатомовая водоросль *Pseudo-nitzschia delicatissima*

## Материалы и методы

В качестве объектов исследования выступали клетки доминирующих видов фитопланктона и частицы морского снега северо-восточной части Черного моря. Точка отбора проб находилась у окончания причала Южного отделения Института океанологии РАН в Голубой бухте (г. Геленджик). Отбор, фиксация и концентрирование проб, а также все процедуры по подсчету, идентификации и обработке результатов были выполнены, согласно методам принятым в ИО РАН [29]. Идентификация видов была основана на морфологии клеток [30, 31] с использованием следующих справочных изданий: Tomas [30], Throndsen et al. [31], а также электронных баз данных Algae Base [14] и World Register of Marine Species [38]. Скорость оседания частицы рассчитывалась при помощи формулы Стокса для силы сопротивления поступательно движущегося шара в жидкостях при малых значениях числа Рейнольдса:

$$F_c = 6\pi\mu r w, \quad (1)$$

где:  $r$  – радиус частицы, м;  $\mu$  – вязкость среды, Па·с;  $w$  – скорость движения частицы, м/с.

## Результаты

В результате мониторинговых наблюдений получен ряд данных, которые позволили определить сезонную сукцессию фитопланктона. Она может быть выражена в виде следующей схемы: мелкие диатомовые (весна) → кокколитофориды (конец весны и начало лета) → крупные диатомовые (лето-осень) [5]. Мелкие и крупные диатомовые водоросли отражают работу органической помпы, а кокколитофориды – карбонатной. Таким образом сезонную сукцессию БУН можно представить как смену органической и карбонатной помп: органическая → карбонатная → органическая.

Размеры и формы клеток фитопланктона составляющих органическую и карбонатную помпы северо-восточной части Черного моря разнообразны. Мелкие диатомовые представляют собой виды пеннатных и центрических водорослей, таких как *Pseudo-nitzschia*



**Рис. 2.** Мелкая центрическая диатомовая водоросль *Skeletonema costatum*

(рис.1), *Skeletonema costatum* (рис. 2) и мелкие виды *Chaetoceros*.

Основной вид, отвечающий за функционирование карбонатной помпы в Черном море – кокколитофорида *Emiliania huxleyi* является сфероидом (рис. 3). Этот вид может иметь размеры 3–10 мкм, а также различное количество слоев кокколит – кальцитных чешуек, покрывающих клетку, либо не иметь их вообще при определенных условиях. Степень кальцификации сильно влияет на плотность клеток, и, соответственно на скорость погружения.

Крупные диатомовые водоросли, доминирующие летом и осенью в основном представлены двумя видами – *Pseudosolenia calcar-avis* (рис. 4) и *Proboscia alata* (рис. 5).

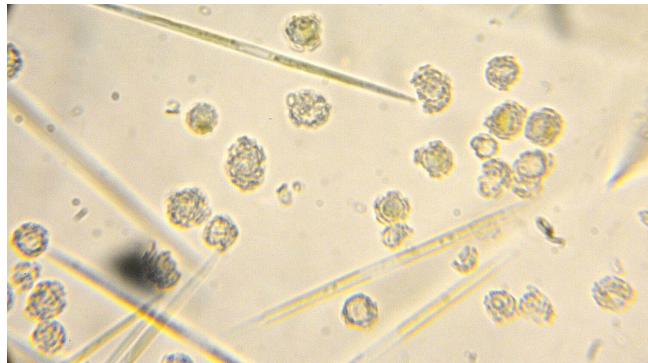
### Морской снег

Морской снег – это разнообразные по форме и размерам взвешенные в воде частицы, видимые невооруженным. В процессе жизнедеятельности и после гибели клетки фитопланктона выделяют в окружающую среду различные полимерные органические ве-

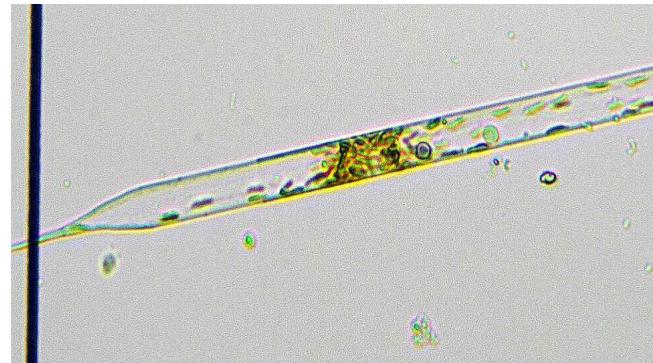
щества. Эти вещества помогают отдельным клеткам и другим взвешенным частицам образовывать мосты при столкновении друг с другом. Столкнувшись частицы, ударяясь о другие такие же частицы слипаются и увеличиваются в размерах. В зависимости от турбулентных характеристик среды такие частицы могут распадаться на более мелкие, или слипаться вновь, иногда образуя волокна до нескольких сантиметров в длину [36].

В случае доминирования диатомовой водоросли *Pseudosolenia calcar-avis* в летний период (рис. 4) она составляет каркас морского снега (рис. 6–8).

К агрегатам прикрепляются остатки клеток других видов, такие как, например, створки динофлагеллят, их цисты, домики инфузорий, хитиновые панцири ракообразного зоопланктона, а также минеральная взвесь. Чем ближе к берегу, тем чаще происходит взмучивание дна, и органоминеральные мелкодисперсные частицы гораздо в большей степени включаются в состав морского снега. Так, например можно это наблюдать на частицах из относительно мелководной Геленджикской бухты (рис. 8)



**Рис. 3.** Клетки кокколитофориды *Emiliania huxleyi* с различным количеством кальцитных оболочек и *Pseudo-nitzschia* spp. Из эксперимента по накопительному культивированию природной популяции (700 кратное увеличение)



**Рис. 4.** Крупная центрическая диатомовая водоросль *Pseudosolenia calcar-avis*. Проба из Голубой бухты 21.08.2024 г.



**Рис. 5.** Диатомовая водоросль *Proboscia alata*. Проба из Голубой бухты 27.02.2023.

Ввиду разнообразия форм оседающих частиц встает необходимость использовать такие допущения, как эквивалентный сферический диаметр (ESD). В большинстве задач моделирования выбор ESD является универсальным; при этом необходимо учитывать, что процессы колонизации частицы бактериями, а следовательно, и реминерализация в значительной степени связаны с формой и структурой частицы, что в свою очередь влияет на скорость оседания. Так например, частицы сферической формы с плотной структурой как правило колонизируются бактериями по поверхности, в то время как у частиц, имеющих неправильную форму и рыхлую структуру, колонизация может протекать по всему объему [21].

Таким образом, для получения простой прогностической модели, удовлетворительно описывающей процессы гравитационного оседания частиц, необходимо учитывать плотность и ESD частицы. Из допусков необходимо отметить Стоксовую скорость оседания частиц и отсутствие взаимодействия между частицами.

Преимуществом такой модели является возможность получить аналитическое решение.



**Рис.6.** Частица морского снега 1 августа 2024 года из поверхностного слоя на станции над глубиной 500 м при увеличении 100х.

### Скорость оседания частицы

В нашем случае, на частицу действуют три силы: сила тяжести, сила сопротивления Стокса и выталкивающая сила Архимеда.

Применяя формулу Стокса (1) для силы сопротивления действующей на частицу сферической формы и движущуюся в жидкости поступательно, можно рассчитать скорость оседания:

$$w = \frac{(\rho - \rho_r)d^2g}{18\mu} \quad \text{или} \quad w = \frac{2(\rho - \rho_r)r^2g}{9\mu} \quad (2)$$

где:  $d$  – диаметр частицы, м;  $r$  – радиус частицы;

$\mu$  – вязкость среды, Па•с;

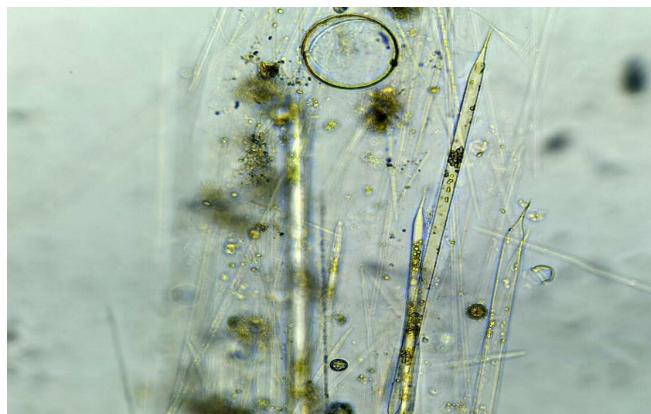
$w$  – скорость движения частиц, м/с;

$\rho_r$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

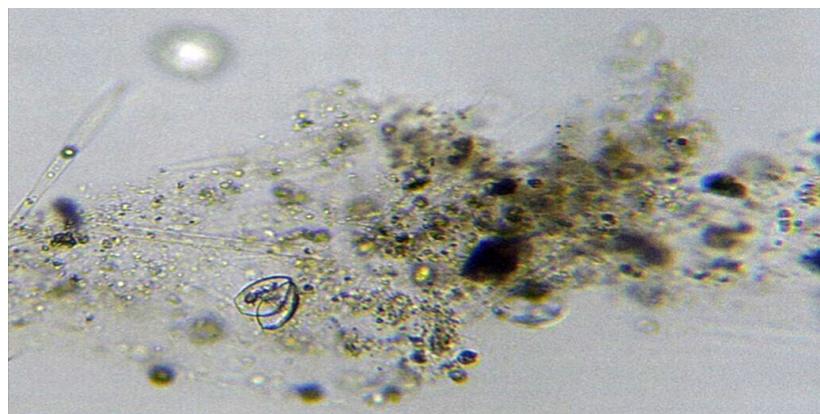
$\rho$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

В большинстве случаев скорость оседания у частиц с несферической формой меньше, чем у частиц с сферической, при равных эквивалентных диаметрах. Эквивалентный диаметр частицы определяется по ее массе  $m$ .



**Рис.7.** Частица морского снега 1 августа 2024г. из поверхностного слоя на станции над глубиной 500м при увеличении 200х.



**Рис.8.** Частица морского снега 21 августа 2024 года из поверхностного слоя в Геленджикской бухте при увеличении 200х. На фото видны включения мелких частиц, створок динофлагеллят *Porocentrum micans* и *Prorocentrum corollatum*, домик инфузории.

$$d_{ESD} = \sqrt[3]{6m/\pi\rho} \quad (3)$$

Если влиянием формы можно пренебречь, то скорость оседания таких частиц рассчитывают по формуле (2) с учетом (3).

Для частицы цилиндрической формы, падающей перпендикулярно своей оси, можно применять следующую формулу [17]:

$$w = \frac{0,079g'L^2}{\nu} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{-1,664} \quad g' = g \cdot \frac{(\rho - \rho_r)}{\rho_r}, \quad (4)$$

где:  $L$  – длина цилиндра, м;  $\nu$  – кинематическая вязкость среды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

При этом необходимо учитывать, что выражение (4) применимо при значениях числа Рейнольдса  $Re$

$$Re = \rho_r \cdot \frac{wL}{\mu} \quad (5)$$

меньше, чем два.

Необходимо отметить, что применимость закона Стокса имеет нижний предел, определяемый настолько мелкими частицами ( $d << 1 \text{ мкм}$ ), что они становятся чувствительными к ударам молекул и находятся в броуновском движении.

Ниже приводятся расчеты скорости оседания клеток фитопланктона – основных доминант в сезонной сукцессии. Главными видами весеннего цветения являются *Pseudo-nitzschia spp.* и *Skeletonema costatum*. Расчеты для кокколитофорид применены для одного вида *Emiliania huxleyi*, при этом число оболочек кокколит принималось варьирующим от 1 до 4. Размер клетки без кокколит изменялся от 4 до 7 мкм. Для видов летнего цветения крупных диатомовых водорослей использовались морфологические характеристики *Pseudosolenia calcar-avis*, при этом диаметр изменялся от 10 до 30 мкм, а длина составила 500 мкм. В качестве примера динофлагеллят использовался *Scrippsiella acuminata*, этот вид иногда доминирует в биомассе весной после цветения мелких диатомовых [4].

Для сравнения были проведены расчеты скорости оседания цианобактерии рода *Synechococcus* – основной доминант фитопланктона в олиготрофных тропических водах [26].

### Оценки скорости оседания

Результаты расчетов, с использованием выражений (2), скорости оседания для сферических частиц разного диаметра и плотности (табл. 1) показывают, что этот параметр определяется диаметром клетки. Такой эффект особенно выражен у кокколитофорид, где увеличение диаметра связано в первую очередь с количеством оболочек кокколит. Плотность кокколит значительно выше плотности самой клетки, и повышение диаметра сопровождается повышением плотности.

Результаты расчетов с использованием выражений (4) для скорости оседания цилиндрических частиц разного диаметра и плотности приведены в таблице 2.

Расчеты показывают, что скорость оседания мелких диатомей *Pseudo-nitzschia spp.* не превышает 0,34 м/сут. Другими словами, время удержания в эвфотическом слое глубиной 50 метров составляет более 100 суток. Для *Emiliania huxleyi* скорость оседания составляет 0,006–2,28 м/сут, таким образом клетки с большим количеством кокколит будут находиться в эвфотическом слое более 20 суток, без кокколит время удержания существенно возрастает. Скорость оседания близка к 2,5 м/сут, или время удержания близко к 20 суткам. Для динофлагеллят максимальная скорость оседания приближается к 8 м/сут, то есть время удержания составляет 6 суток. Для *Synechococcus* время удержания в эвфотическом слое стремится к бесконечности. Расчитанная скорость оседания частицы морского снега диаметром 100 мкм (выше – имеется ограничение для формулы Стокса) показывает, что они выходят за пределы эвфотической зоны в течение суток.

### Обсуждение

Сезонная сукцессия в северо-восточной части Черного моря следует схеме [5]: мелкие диатомовые → кокколитофориды → крупные диатомовые, или другими словами: органическая помпа → карбонатная помпа → органическая помпа.

Органическая помпа, функционирующая весной, демонстрирует очень низкие скорости оседания и, соответственно, длительное время удержания клеток в эвфотическом слое. Из этого следует, что существует высокая вероятность поглощения клеток видами более высокого трофического уровня. Часть биомассы клеток уходит на рост и поддержание этих видов, вторая часть в виде непереваренных остатков выводится в виде фекальных пеллет, объем которых зависит от соотношения усвоенной и потребленной пищи то есть от усвояемости (см. Общие основы изучения водных экосистем) [1]. Таким образом, органическая помпа, функционирующая весной, проводит трансформацию произведенного органического вещества и его переупаковку [33].

Существующая парадигма биологического углеродного насоса [27] говорит о том, что основная масса органического вещества за год производится именно в период весеннего цветения, другими словами, в период функционирования органической помпы, основанной на мелкоклеточных диатомеях. Наши расчеты согласуются с предположением, что основная часть продукции органической помпы идет на переработку органического вещества, в результате которой происходит переупаковка в иную морфологическую форму, которая имеет более высокую скорость оседания.

Скорость оседания кокколитофорид также низка, и время удержания их в эвфотическом слое достаточно

Табл. 1.

**Скорость оседания сферических клеток кокколитофориды *Emiliania huxleyi*, динофлагелляты *Scrippsiella acuminata* и цианобактерии *Synechococcus spp.***

	<i>Emiliania huxleyi</i>			<i>Scrippsiella acuminata</i> (trochoidea)			<i>Synechococcus</i>	Частица*
	<i>d</i> , мкм	4	7	10	15	20	30	морского снега
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1100	1300	1500	1200	1200	1200	1200	1187,5
<i>w</i> , м/сут	0,06	0,7	2,28	1,96	3,5	7,83	0,009	80
Время удержания, сутки	833,3	71,4	21,9	25,5	14,2	6,4	5555	0,6

\* Частица морского снега представляла собой сферу, предельного диаметра, для которой применим закон Стокса. Плотность частицы была представлена в виде процентного соотношения составляющих ее компонент: органика – 85% с плотностью 1100 кг/м<sup>3</sup>, минералы – 10% с плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup> и транспарентные экзополимерные частицы – 5% с плотностью 1050 кг/м<sup>3</sup> соответственно.

Табл. 2.

**Скорость оседания клеток для частиц цилиндрической формы**

	<i>Pseudo-nitzschia spp.</i>			<i>Pseudosolenia calcar-avis</i>		
<i>L</i> , мкм	70			500		
<i>d</i> , мкм	1	3	5	10	15	30
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1100	1100	1100	1030	1030	1030
<i>w</i> , м/сут	0,02	0,15	0,34	0,39	0,77	2,47
Время удержания, сут	2500	333	147	128,2	64,9	20,2

длительное, чтобы частицы могли быть подвержены переработке. Наличие кокколит повышает скорость оседания клеток, но не настолько, чтобы снизить время удержания до тех значений, которые необходимы для быстрого оседания клеток. Клетки кокколитофорид интенсивно потребляются представителями более высокого трофического уровня. В частности, показано интенсивное поедание этих клеток динофлагеллятами вида *Noctiluca scintillans* [2]. Существует так называемая баластная гипотеза [6], согласно которой баластные элементы, такие как кокколиты, повышают скорость оседания органического вещества. Наши расчеты показывают, что действительно скорость оседания отдельных клеток увеличивается, но не настолько, чтобы существенно снизить время удержания в эвфотическом слое. Таким образом, продукты функционирования карбонатной помпы практически полностью перерабатываются в эвфотическом слое. Возможно, что кокколиты в случае отсутствия растворения существенно повысят плотность фекальных пеллет и, как следствие, повысят скорость оседания.

Наши оценки скорости оседания совпадают с результатами прямых измерений в Черном море при помощи вертикальных профилей с буев «Argo» [3]. Здесь скорости колебались от 0,2 до 2 м/сут. Наименьшие скорости наблюдались с февраля по август.

В первую половину года функционируют органическая и карбонатная помпы, основанные на мелкоклеточном фитопланктоне, который потребляется мелкоразмерной фракцией зоопланктона, включающей крупные динофлагелляты, инфузории и мелкий зоопланктон [27]. Эти данные не противоречат гипотезе, согласно которой мелкий фитопланктон практически полностью перера-

батывается в эвфотической зоне [16, 17] и не участвует в процессе переноса органического углерода за пределы эвфотической зоны. Таким образом, биологический углеродный насос в первую половину года не экспортирует клетки фитопланктона, а производит их перевупаковку в более крупные морфологические формы.

У клеток крупного фитопланктона достаточно высока вероятность покинуть эвфотическую зону отдельно или в виде агрегатов. Органическая помпа в период летнего цветения крупных диатомей показывает относительно высокую скорость оседания клеток. В период функционирования этой помпы замечено формирование агрегатов клеток – морского снега, основной каркас которых составляют клетки *Pseudosolenia calcar-avis*. Из морфологических особенностей этих агрегатов следует, что их ESD очень высок. Крупный фитопланктон, ввиду морфологических особенностей, выедается только крупным зоопланктоном [37]. Пеллеты крупного зоопланктона, очевидно, имеют более высокую скорость оседания и соответственно существенно меньшее время нахождения в эвфотической зоне. Таким образом, летом органическая помпа имеет высокий экспортный потенциал.

Наши расчеты показывают, что органическая помпа, основанная на цианобактериях, является помпой с низким экспортным потенциалом: выводятся только продукты, переупакованные представителями более высоких трофических уровней. Здесь формируются относительно длинные пищевые цепи, характеризующиеся меньшим экспортом углерода [19].

Скорость оседания динофлагеллят велика, и поэтому необходимым условием их закрепления в эвфотической зоне является движение клеток. В процессе

эволюции возникли различные механизмы, позволяющие эффективно препятствовать их гравитационному оседанию [13].

## Выходы

Важную роль в работе гравитационного углеродного насоса в северо-восточной части Черного моря играет сезонная динамика фитопланктона, которая может быть представлена в виде схемы: мелкие диатомовые (весна) → кокколитофориды (конец весны и начало лета) → крупные диатомовые (лето-осень).

Весной функционирует органическая помпа, при этом доминируют мелкоклеточные диатомовые водоросли *Pseudo-nitzschia spp.*, *Skeletonema costatum*, характеризующиеся низкой скоростью оседания (до 0,34 м/сут), что приводит к длительному пребыванию в эвфотическом слое (до 100 суток) и активному потреблению зоопланктоном с дальнейшим образованием пеллет.

В конце весны и начале лета за счет увеличения популяции доминирующего вида кокколитофориды *Emiliania huxleyi* активно функционирует карбонатная помпа. Скорость оседания кокколитофорид составляет 0,06–2,28 м/сут в зависимости от степени кальцификации, но в целом остается недостаточной для быстрого вывода органического углерода в глубинные слои. Несмотря на балластный эффект кокколитов, клетки *Emiliania huxleyi* остаются в эвфотическом слое длительное время, подвергаясь переработке в пищевых цепях.

Летом и осенью доминируют крупные диатомеи *Pseudosolenia calcar-avis* и *Proboscia alata*, скорость оседания которых достигает 2,47 м/сут. Морской снег, состоящий из крупных диатомовых водорослей, минеральных частиц и органического детрита, обладает высокой плотностью. Расчеты показывают, что скорость оседания агрегатов морского снега, особенно в прибрежной зоне, может достигать 80 м/сут. Следовательно, морской снег является основным фактором, определяющим вертикальный перенос органического углерода в глубинные слои.

Таким образом, исследование убедительно подтверждает гипотезу, согласно которой, основной вклад в гравитационный углеродный насос северо-восточной части Черного моря вносят крупные диатомеи летне-осеннего периода, тогда как весенние мелкоклеточные диатомеи и кокколитофориды задерживаются в эвфотическом слое, участвуя преимущественно в переработке и переупаковке органического вещества.

Полученные данные важны для понимания роли Черного моря в глобальном углеродном цикле и открывают новые направления для изучения роли седиментационных процессов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института океанологии РАН им. Ширшова FMWE-2024-0027 «Комплексные исследования морских природных систем Чёрного и Азовского морей».

## Литература

1. Алимов АФ, Галковская ГА, Винберг ГГ и соавт. Общие основы изучения водных экосистем. Ленинград: Наука; 1979.
2. Дриц АВ, Никишина АБ, Сергеева ВМ и др. Питание, дыхание и экскреция черноморской *Noctiluca scintillans* MacCartney в летний период. Океанология. 2013;53(4):497-506. DOI: 10.1134/S0001437013040036
3. Кубряков АА, Станичный СВ. Вертикальное распределение скорости частиц в Черном море и ее сезонная изменчивость по измерениям буев Био – Арго. Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва. 2021;505-506. DOI:10.29006/978-5-6045110-3-9. ISBN 978-5-6045110-3-9
4. Паутова ЛА, Силкин ВА. Биологический углеродный насос в океане и структура фитопланктона. Экология гидросфера. 2019;1(3):1-12. DOI: 10.24411/2658-3910-2019-00001
5. Силкин ВА, Подымов ОИ, Лифанчук АВ. Биологическая углеродная помпа в Черном море. Экология гидросфера. 2022;2(8): 69–92. DOI – [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2\(8\)-69-92](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2(8)-69-92).
6. Archer D. Association of sinking organic matter with various types of mineral ballast in the deep sea: Implications for the rain ratio. Deep-Sea Res Part I. 2002;49:185-204. DOI: 10.1029/2001GB001765
7. Boyd PW, Claustre H, Levy M et al. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. Nature. 2019;568:327-35. DOI: 10.1038/s41586-019-1098-2
8. Claustre H, Legendre L, Boyd PW et al. The Oceans' biological carbon pumps: framework for a research observational community approach. Front Mar Sci. 2021;8:780052. DOI: 10.3389/fmars.2021.780052
9. Doney SC, Fabry VJ, Feely RA et al. Ocean acidification. Ann Rev Mar Sci. 2009;1:169-92. DOI: 10.1146/annurev.marine.010908.163834

10. Falkowski P, Scholes RJ, Boyle EA et al. The global carbon cycle. *Science*. 2000;290:291-6. DOI: 10.1126/science.290.5490.291
11. Guiry MD, Guiry GM. AlgaeBase. Galway: National University of Ireland; 2023 [cited 2023 Dec 15]. Available from: <https://www.algaebase.org>
12. Iglesias-Rodriguez MD, Brown CW, Doney SC et al. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carboncycle models: Coccolithophorids. *Glob Biogeochem Cycles*. 2002;16:1-20. DOI: 10.1029/2001GB001454
13. Jiang H, Kanso E. Evolutionary adaptations of dinoflagellates to reduce gravitational sedimentation. *Journal of Plankton Research*. 2022;44(2):201-15. DOI: 10.1093/plankt/fbab085
14. Komar PD. Settling velocities. *J Geol*. 1980;88:327-36. DOI: 10.1086/628510
15. Le Moigne FAC. Pathways of organic carbon export. *Front Mar Sci*. 2019;6:334. DOI: 10.3389/fmars.2019.00334
16. Legendre L, Le Fèvre J. Microbial food webs and the export of biogenic carbon in oceans. *Aquatic Microbial Ecology*. 1995;9(1):69-77. DOI: 10.3354/ame009069
17. Legendre L, Rassoulzadegan F. Food-web mediated export of biogenic carbon in oceans: hydrodynamic control. *Marine Ecology Progress Series*. 1996;145:179-93. DOI: 10.3354/meps145179
18. Milliman JD. Production of calcium carbonate. *Glob Biogeochem Cycles*. 1993;7:927-57. DOI: 10.1029/93GB02524
19. Negrete-García G, Lovenduski NS, Nauri C et al. Sudden emergence of a shallow aragonite saturation horizon in the Southern Ocean. *Nat Commun*. 2022;13:1452. DOI: 10.1038/s41467-022-28847-y
20. Nowicki M, DeVries T, Siegel DA et al. Quantifying the carbon export and sequestration pathways of the ocean's biological carbon pump. *Glob Biogeochem Cycles*. 2022;36:e2021GB007233. DOI: 10.1029/2021GB007233
21. Omand MM, Govindarajan R, He J et al. Sinking flux of particulate organic matter in the oceans: Sensitivity to particle characteristics. *Sci Rep*. 2020;10:1-16. DOI: 10.1038/s41598-020-60424-5
22. Paasche E. *Emiliania huxleyi* review. *Phycologia*. 2002;40:503-29. DOI: 10.2216/i0031-8884-40-6-503.1
23. Poulton AJ, Adey TR, Balch WM et al. Relating coccolithophore calcification rates to phytoplankton community dynamics: Regional differences and implications for carbon export. *Deep-Sea Res Part II*. 2007;54:538-57. DOI: 10.1016/j.dsr2.2006.12.003
24. Sanders R, Henson SA, Koski M et al. The biological carbon pump in the North Atlantic. *ProgOceanogr*. 2014;129:200-18. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.005
25. Sarmiento JL, Gruber N. *Ocean Biogeochemical Dynamics*. Princeton: Princeton Univ Press; 2006.
26. Scanlan DJ, West NJ. Molecular ecology of the marine cyanobacterial genera *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. *FEMS Microbiol Ecol*. 2002;40:1-12. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2002.tb00930.x
27. Siegel DA, Buesseler KO, Doney SC et al. Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models. *Glob Biogeochem Cycles*. 2014;28(3):181-96. DOI: 10.1002/2013GB004743
28. Siegel DA. The ocean carbon pump. *Glob Biogeochem Cycles*. 2002;16:1029. DOI: 10.1029/2001GB001765
29. Silkin VA, Pautova LA, Giordano M, Chasovnikov VK, Vostokov SV, Podymov OI, Pakhomova SV, Moskalenko LV. Drivers of phytoplankton blooms in the northeastern Black Sea. *Marine Pollut Bull*. 2019;138: 274-84 DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.042
30. Throndsen J, Hasle GR, Tangen K. *Phytoplankton of Norwegian Coastal Waters*. Almater Forlag, 2007. P.341. ISBN 978-82-7858-086-8
31. Tomas CR. *Identifying Marine Phytoplankton*. Academic Press.1997.858. ISBN: 0-12-693018-X
32. Tréguer P, Bowler C, Moriceau B et al. Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump. *Nat Geosci*. 2017;11:27-37. DOI:10.1038/s41561-017-0028-x
33. Turner JT. Zooplankton fecal pellets, marine snow, phytodetritus and the ocean's biological pump. 2015, *Progress in Oceanography*, DOI:10.1016/j.pocean.2014.08.005: 69–92. DOI:10.33624/2587-9367-2022-2(8)-69-92
34. Tyrrell T, Merico A. E. *huxleyi* blooms. In: *Coccolithophores*. Berlin: Springer; 2004. P.75-97.DOI: 10.1007/978-3-662-06278-4
35. Volk T, Hoffert MI. Ocean carbon pumps. *Geophys Monogr Ser*. 1985;32:99-110. DOI: 10.1029/GM032p0099
36. Wagner S, Schubotz F, Kaiser K, Hallmann C, Waska H, Rossel PE, Hansman R, Elvert M, Middelburg JJ, Engel A, Blattmann TM, Catalá TS, Lennartz ST, Gomez-Saez GV, Pantoja-Gutiérrez S, Bao R, Galy V. Soothsaying DOM: a current perspective on the future of oceanic dissolved organic carbon. *Front Mar Sci*. 2020;7:341. doi:10.3389/fmars.2020.00341. DOI: 10.3389/fmars.2020.00341
37. Wirtz KW. Who is eating whom? Morphology and feeding type determine the size relation between planktonic predators and their ideal prey. *Marine Ecol Progr Ser*. 2012;445:1-12. DOI: 10.3354/meps09502
38. WoRMS Editorial Board. World Register of Marine Species. Ostend: VLIZ; 2023 [cited 2023 Dec 15]. Available at: <https://www.marinespecies.org>

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИВУЧАМИ АНТРОПОГЕННОГО ЛАНДШАФТА ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО НА ЗИМОВКАХ В АВАЧИНСКОЙ БУХТЕ В 2020–2025 ГОДЫ

**Е.С Васюков<sup>1, 2\*</sup>, П.П Снегур<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Молодежная лаборатория исследования антропогенной динамики экосистем, Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга», г. Петропавловск-Камчатский, Россия;

<sup>2</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия;

<sup>3</sup>Лаборатория экологии животных, Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия.

\*Эл. почта: [egor.vasyukov@list.ru](mailto:egor.vasyukov@list.ru)

Статья поступила в редакцию 24.08.2025; принята к печати 25.10.2025

История освоения портовых зон Петропавловска-Камчатского сивучами берет начало с 1970-х годов. В настоящее время существует три лежбища в черте города: пирс МРКЗ, мыс Чавыча и морской порт. Выяснение особенностей залегания и поведения сивучей на нетипичных антропогенно измененных ландшафтах при воздействии некоторых экологических факторов поможет расширить знания об интеграции сивуча в антропогенную среду. Рассчитав плотность залегания и особенности распределения сивучей, мы выявили, что наиболее благоприятным для залегания является мыс Чавыча, где находятся сивучи всех половозрастных категорий. Наиболее уязвимые – самки и молодые звери – придерживаются центральных участков, взрослые самцы распределены равномерно. На лежбищах пирса МРКЗ и морского порта преобладают смешанные и техногенные ландшафты и залегают на них преимущественно взрослые самцы. Наблюдения за поведением меченых сивучей показали, что агрессия и тревожность чаще встречается на смешанных и техногенных ландшафтах в связи с возможностью получения подкормки. Агрессия на естественных ландшафтах возникает при большой плотности взрослых самцов. Структурообразующие факторы среды – это ландшафт, подкормка и беспокойство, причем последнее оказывало значимое влияние только в сезон 2021-2022 годов при постоянном и длительном беспокойстве. В целом наблюдается адаптация к неблагоприятным факторам, когда сивучи не покидают Авачинскую бухту, а перераспределяются внутри лежбища или переходят на другое место.

**Ключевые слова:** ландшафт, залегание, адаптация, сивуч, беспокойство

## THE USE OF THE ANTHROPOGENIC LANDSCAPE OF PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY BY STELLER SEA LIONS AT WINTERING GROUNDS IN AVACHA BAY IN 2020-2025

**Ye.S. Vasiukov<sup>1, 2\*</sup>, P.P. Snegur<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Kamchatka State University named after Vitus Bering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia;

<sup>2</sup>Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

<sup>3</sup>Kamchatka Branch of Pacific Institute of Geography, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia.

\*E-mail: [egor.vasyukov@list.ru](mailto:egor.vasyukov@list.ru)

The history of the development of the port areas of Petropavlovsk-Kamchatsky by Steller sea lions dates back to the 1970s. Currently, there are three haul-outs within the city: the MRKZ Pier, Cape Chavicha and the seaport. Clarifying the features of the occurrence and behavior of sea lions in atypical anthropogenically altered landscapes under the influence of certain environmental factors will help expand knowledge about integration of sea lions into the anthropogenic environment. Having calculated the density of occurrence and its distribution features, we found that Cape Chavicha is the most favorable site for sea lions of all sex and age categories. The most vulnerable females and juveniles stick to the central areas, while adult males are evenly distributed. The haul-outs of the MRKZ pier and the seaport are dominated by mixed and manmade landscapes and are inhabited mainly by adult males. Based on observations of the behavior of tagged sea lions, it was revealed that aggression and anxiety are more common in mixed and manmade landscapes, due to the possibility of obtaining top dressing. Aggression in natural landscapes occurs when the density of adult males is high. The structural factors of the environment are landscape, extra feeding, and anxiety, the latter having a significant impact only in the season 2021-2022 upon constant and prolonged anxiety. In general, sea lions are able to adapt to unfavorable factors and thus not to leave Avacha Bay, but to redistribute inside the haul-out or move to another one.

**Keywords:** landscape, occurrence, adaptation, Steller sea lion, disturbance

## Введение

Сивуч (*Eumetopias jubatus*) является эндемиком северной части Тихого океана. С 1994 года этот вид занесен в Красную Книгу и международный список охраны природы (МСОП) [4]. Для залегания в естественной среде обитания сивучи предпочитают открытые защищенные пляжи с твёрдым субстратом или закрытые скалистые участки, омываемые волнами, которые зачастую не являются частью непрерывной береговой линии. Тип субстрата скально-плитный, либо каменистый, гравийный, реже песчаный пляж [14–16]. Сивучи могут использовать для своего временного залегания и рукотворные сооружения в черте населенных пунктов. Это могут быть как объекты, отрезанные от береговой линии, такие как навигационные буи и лодки, так и крупные береговые объекты – пирс, волнолом и др. [19].

В 1970-х годах в Авачинской бухте наблюдались первые взрослые самцы сивучей, которые подкармливались отходами переработки рыбы, сбрасываемыми в бухту в порту Петропавловска-Камчатского (данный способ питания сивуча далее будет обозначаться как «подкормка»). Вероятно, наличие доступной подкормки в зимнее время стимулировало сивучей проводить в бухте больше времени. К 1991–1992 годах сивучи образовали первое береговое лежбище на разрушенном пирсе Моховского рыбоконсервного завода (МРКЗ), используя его как место отдыха в перерывах между поиском пищи [7]. Численность сивучей на этом участке к 2007 году превысила 200 особей [9]. Вместе с тем увеличились случаи намеренного беспокойства со стороны человека. Предполагаем, что возросшая численность на небольшом участке, стресс и открытие новых мест сдачи рыбы побудили сивучей искать новые места отдыха. Большая часть зверей стала залегать на мыс Чавыча [2]. До 2019 года береговые залежки претерпевали значительные изменения, которые были связаны в большей степени с изменением мест сдачи рыбного улова, а также с намеренным беспокойством от человека. Сивучи встречались на воде в районах п. Авача, ЗАО Акрос, колхоза им. Ленина, жестяно-баночной фабрики (ЖБФ) [10]. Основными лежбищами являлись по-прежнему пирс МРКЗ, мыс Чавыча и разные участки мыса Сигнального. Изменения коснулись и морского порта. До 2021 года сивучи встречались там на Угольном причале и мысе Сигнальном напротив входа в ковш порта, а также изредка выбирались на пирсы [8, 11]. В 2021 году сивучи стали выходить на берег вдоль ул. Красинцев [5] напротив рыбообрабатывающего предприятия «КМП Холод ЛТД».

Существующие публикации о зимующих сивучах Авачинской бухты достаточно подробно описывают историю освоения городских лежбищ, динамику численности и половозрастной состав поголовья [2, 7, 8, 9, 11]. Также отмечалось влияние беспокойства со

стороны человека и наличие подкормки, исходящей от деятельности рыбообрабатывающих предприятий, на численность сивучей в местах их залегания [8, 9, 11]. При этом роль окружающего ландшафта в формировании поведения и структуры размещения данных ластоногих не раскрывается или упоминается кратко [2, 8, 9], хотя известно, что сивучи в естественной среде предпочитают образовывать лежбища на определённых типах ландшафта [15].

Цель нашей работы – определить особенности использования сивучами антропогенного ландшафта портовых зон города Петропавловск-Камчатский.

Поставлены следующие задачи:

- выявить предпочтительность залегания на участках для разных половозрастных групп с учетом окружающего ландшафта;
- рассмотреть влияние абиотических (погодные условия, уровень воды, рельеф), биотических (половозрастной состав) и антропогенных (беспокойство, подкормка) факторов на характер залегания сивучей.
- описать особенности поведения сивучей на разных типах ландшафта.

## Материалы и методы

### Места и сроки исследования

Исследования проводились в черте г. Петропавловск-Камчатский в период с 14 сентября 2020 года по 25 апреля 2025 года с возвышенности или береговой линии, в светлое время суток, преимущественно в интервале 10:00–16:00 на следующих береговых лежбищах: пирс МРКЗ; мыс Чавыча; Морской порт (берег морского порта и причал №7) (Рис.1). Сивучи ежегодно наблюдаются в Авачинской бухте с сентября по май. Этот срок мы называем зимовкой. Таким образом, наблюдения охватывают пять сезонов зимовок.

На пирсе МРКЗ было проведено 129 обследований, на мысе Чавыча – 137, в Морском порту – 138. Иных мест залегания сивучей на берегу в черте Петропавловска-Камчатского нами не зарегистрировано.

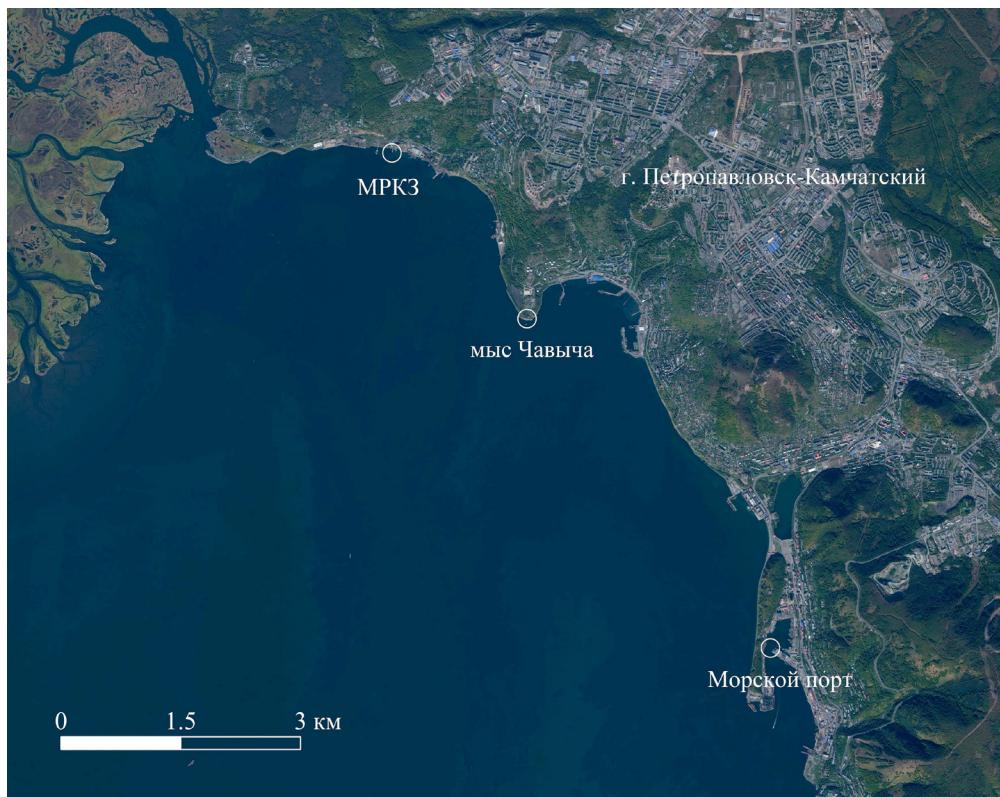
### Описание и измерение участков

Береговые лежбища разделялись на участки с учетом географических особенностей и по визуальному охвату всех присутствующих зверей.

На участках выделялись зоны по степени вовлеченности ландшафтов в антропогенные процессы:

- визуально не измененные антропогенной деятельностью;
- частично измененные или имеющие следы хозяйственной деятельности человека;
- полностью рукотворные техногенные ландшафты.

Для разграничения мы загружали полученные снимки, имеющие географическую привязку от аэрофотосъемки в программу «AgisoftPhotoScan» (Agisoft) и склеивали снимки в единый ортофотоплан, на



**Рис. 1.** Карта Авачинской бухты с указанием исследуемых лежбищ сивуча

котором в отдельных векторных слоях обрисовывались полигоны, соответствующие границам участков, а также зонам ландшафта. Поскольку на каждом участке действуют приливно-отливные процессы, то для определения крайней береговой границы лежбищ мы брали минимальный уровень воды за период наблюдения (-2 м). Для определения площади, доступной для залегания, мы использовали встроенную в «Agisoft» функцию «расчет площади полигона» для каждого участка в отдельности.

#### Подсчет численности

Подсчет сивучей проводили по снимкам или визуально отдельно на каждом участке по половозрастным категориям, которые легко определяются визуально (табл. 1).

После подсчета животных по всем категориям они суммировались. Мы решили исключить из учетов зверей, находящихся в воде, так как они могли бы повлиять на расчеты плотности залегания на участках. Поэтому считалось, что звери находятся на лежбище, если используют субстрат как опору, а не находятся на плаву.

Для оценки связи численности между разными половозрастными группами и между погодными условиями и численностью использовали коэффициент

корреляции Спирмэна. Для определения достоверности различий в численности между сезонами использовали U-тест Манна-Уитни с поправкой Бонферрони.

#### Регистрация таврённых особей и наблюдения за их поведением

В ходе обследования каждого участка всех сивучей осматривали в бинокль на наличие меток на левом боку. После обнаружения меченого зверя делали серию снимков с целью дальнейшего прочтения номера тавро. В полевой дневник заносили номер меченого животного, его расположение на участке, особенности поведения (отдых, пищевое поведение, территориальное поведение, агрессия, игровое поведение, почесывание, проявление тревоги). При аэрофотосъемке поиск меченых осуществляли в процессе просмотра готовых снимков, которые обрабатывали в компьютерной программе «PhotoCount 3v.». Каждое тавро имеет точную информацию о поле и возрасте зверя, и месте рождения. Наблюдения за меченными сивучами использовали для описания встречаемости разных типов поведения на различных ландшафтах.

На пирсе в морском порту не было отмечено ни одного меченого сивучя, поэтому зверей идентифицировали по приметным индивидуальным особенностям на теле, таким как шрамы, травмы, особенности окраса и др.

Табл. 1

### Половозрастные категории сивучей

Категория	Описание
Секач (AN)	Взрослый самец 8 лет и старше
Полусекач (Sa)	Молодой самец 4-7 лет
Самка (F)	Взрослая самка от 4 лет
Щенок (Р)	Молодое животное этого года рождения
Молодой (J)	Молодое животное, пол по внешнему виду не определяется, 1-3 года
Не определен (U)	Категория не определена, зверь виден не полностью

## Результаты исследования и обсуждение

### Физико-географическое описание береговых лежбищ

**Пирс МРКЗ.** Примыкает к берегу на северной части бухты Моховая (53.06302 с.ш. 158.56683 в.д.). Лежбище полностью располагается на бетонном пирсе и не имеет зон естественных ландшафтов. Делится на старую аварийную часть пирса, представленную размытым бревенчатым каркасом на каменистой насыпи с обломками бетонных плит, которые соединены стальной арматурой, и новую реконструированную часть пирса, которая возвышается над старой частью примерно на 1–1,5 м и является практически ровной забетонированной площадкой. Учитывая разницу в целостности покрытия и высоты, мы разделили старую и новую часть пирса как 1-ый и 2-й участок соответственно (Рис. 2). Оба участка соединены между собой железобетонной открытой лестницей. Площадь первого участка 331 м<sup>2</sup>, второго 339 м<sup>2</sup>.

**Мыс Чавыча**(53.04621 с.ш. 158.59415 в.д.). Границит с бухтой Моховая с запада и бухтой Сероглазка с востока. С северной стороны пляж ограничен береговыми обрывами в виде скальных образований высотой от 5 до 15,1 м, покрытых рыхлыми отложениями с редкими пологими склонами, которые были образованы в результате оползней [12].

Береговая линия ровная, слегка загибается к северу с двух сторон. Субстрат преимущественно каменистый (Рис. 3А), с выступающими местами скалами и булыжниками разного размера по краям лежбища (Рис. 3В).

Длина всего лежбища с запада на восток составляет 163 м. Участки для наблюдений выбраны с учётом особенностей рельефа (Рис. 4).

Участок № 1. Берег сильно прижат к отвесной скале и огибает её по дуге, по сути является непропуском (участок береговой линии, на котором пеший проход по урезу воды не возможен). Субстрат состоит преимущественно из булыжников и выступающих скальных пород.

Участок № 2. Представляет собой «карман», окруженный отвесными скальными выступами. При силь-

ном приливе фактически отрезан от других участков по сушке. Берег каменистый с небольшими булыжниками.

Участок № 3. Северная часть граничит со скальным выступом, который к западу сглаживается оползневыми процессами. Берег каменистый, без крупных включений. Граничит со сливной трубой очистных сооружений, в связи с чем имеет зону видоизмененного ландшафта в виде искусственно выровненных пород, бетонных и металлических конструкций.

Участок № 4. Полностью техногенный, состоит из двух бетонных коробов, через которые проходят сливные трубы очистных сооружений.

Участок № 5. На восточной границе имеет небольшую зону искусственного сглаживания скальных пород и рыхлых грунтов в месте входа одной из сливных труб в почву на оползневом склоне. Берег ровный, мелко-каменистый.

Участок № 6. С востока частично ограничен скальным выступом, с запада сильно-выступающим непропуском. Берег каменистый с крупными булыжниками.

Участок № 7. Ограничен с обеих сторон отвесными непропусками, берег ровный, каменистый, с редкими булыжниками.

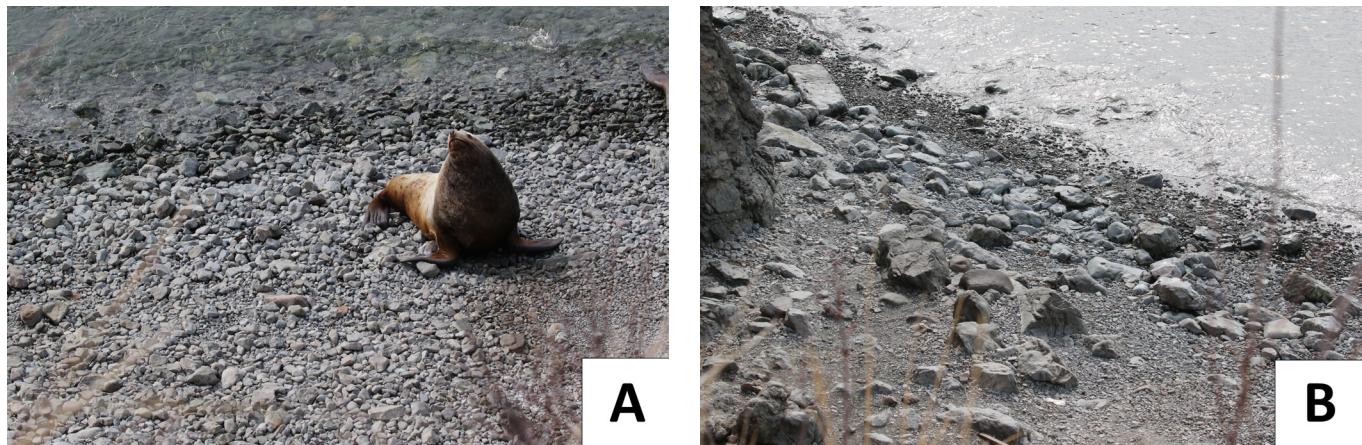
Было несколько случаев выхода одного самца сивуча к востоку от границ участка № 1. Мы условно назвали его «нулевой участок», но не включали в учеты, так как эти выходы были единичными. К югу он отрезан от основного лежбища, а к северу не ограничивается скалами, что делает его незащищённым. Поэтому использование данного участка маловероятно.

Общая площадь доступная для залегания на лежбище составляет 1993 м<sup>2</sup>.

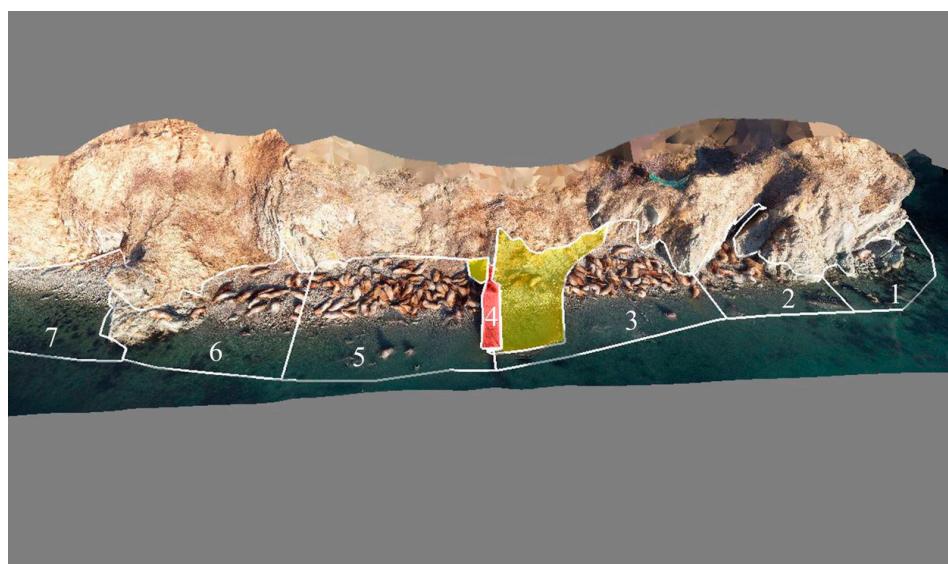
**Морской порт.** Часть лежбища расположена на береговой линии с восточной стороны сопки Сигнальная (53.01386 с.ш. 158.64326 в.д.), вдоль автомобильной дороги по ул. Красинцев (Рис. 5). Лежбище отделяется от дороги грунтовой насыпью высотой 1,5–2 м. С северной стороны ограничено бетонно-металлическими ограждениями портовой инфраструктуры. С южной стороны береговая полоса полностью уходит в дорожную насыпь. Изначально субстрат представлял собой мелко-каменистый пляж, который был укреп-



**Рис. 2.** Разграничение участков на пирсе МРКЗ (фото Е.С. Васюкова). Цифры обозначают номера участков



**Рис. 3.** А – каменистый субстрат; В – каменисто-булыжный субстрат (фото Е.С. Васюкова)



**Рис. 4.** Трехмерная модель лежбища на мысе Чавыча с разграничением участков (цифрами обозначены номера участков) и зон ландшафтов (красный – техногенный; жёлтый – видоизмененный) (смоделировано в «Agisoft» по аэрофотоснимкам Васюкова Е.С.)

плен фрагментами бетонных плит и металлическими конструкциями, препятствующими размыванию проходящей рядом дороги. Помимо этого, на берегу находится большое количество антропогенного мусора. Имеется небольшой плавучий деревянный понтон. Площадь всего лежбища 725м<sup>2</sup>.

Также сивучи выходят на бетонный пирс №7 (53.01321 с.ш. 158.6449 в.д.) расположенный у «КМП Холод ЛТД», протяженностью 97 м (Рис. 6).

Пирс служит местом стоянки и ремонта судов и сдачи улова, является полностью техногенным ландшафтом. Сивучи используют для передвижения практически весь причал, однако залегают только у кромки. Общая используемая площадь составляет приблизительно 120 м<sup>2</sup> или 1/10 от общей площади причала.

Оба участка в Морском порту разделены водной преградой. Прямое кратчайшее расстояние между ними достигает 118 м.



**Рис. 5.** Разграничение лежбища на берегу морского порта по ландшафтам (красный – техногенный; жёлтый – видоизмененный) (фото Васюкова Е.С.)



**Рис. 6.** Пирс №7 (фото Васюкова Е.С.)

## Предпочтительность участков для залегания и особенности распределения

Прежде всего следует учесть, что численность животных на лежбище Чавыча ежегодно на порядки превосходит численность на Моховой и в порту (табл. 2). Численности животных на двух последних лежбищах сравнимы.

Для расчета предпочтительности мы взяли не показатель численности, а плотность залегания (особей/м<sup>2</sup>) так как все участки имеют разную площадь. Мы исходим из того, что чем выше плотность, тем более предпочтительным для сивучей является данный участок.

На мысе Чавыча распределение животных по участкам неравномерное (Рис. 7). Наибольшую наполняе-

мость имеют участки № 3 и № 5. Соседние с ними № 2, № 4, № 6 используются меньше, а на крайние участки № 1 и № 7 сивучи выходят весьма редко.

На мысе Чавыча залегают животные всех половозрастных групп (Рис. 8). Доля секачей на всех участках примерно одинаковая: 44–69% от общего числа. Это самая многочисленная группа. Секачи располагаются по всему пляжу, иногда невысоко забираясь на скалы. В линии прибоя находятся только в жаркие дни. Секачи – самые конкурентоспособные особи, и их залегание не зависит от других категорий. Вторые по численности – это полусекачи (26–41%), они также занимают все участки. Иногда наблюдаются конфликты с секачами, которые пытаются прогнать более молодых от себя. Однако число секачей положительно коррелиру-

Табл. 2.

Среднее число сивучей, фиксируемое на разных лежбищах, особей (M±m)

Лежбище	Зимовка				
	2020-2021	2021-2022	2022-2023	2023-2024	2024-2025
Пирс МРКЗ	2,7±0,4	2,4±0,5	1,2±0,4	0,8±0,4	1,6±0,3
Мыс Чавыча	62,2±7,2	66,0±8,7	61,1±9,6	65,0±11,3	94,5±14,3
Морской порт	0	1,2±0,5	3,1±1,3	2,7±1,2	0,4±0,2

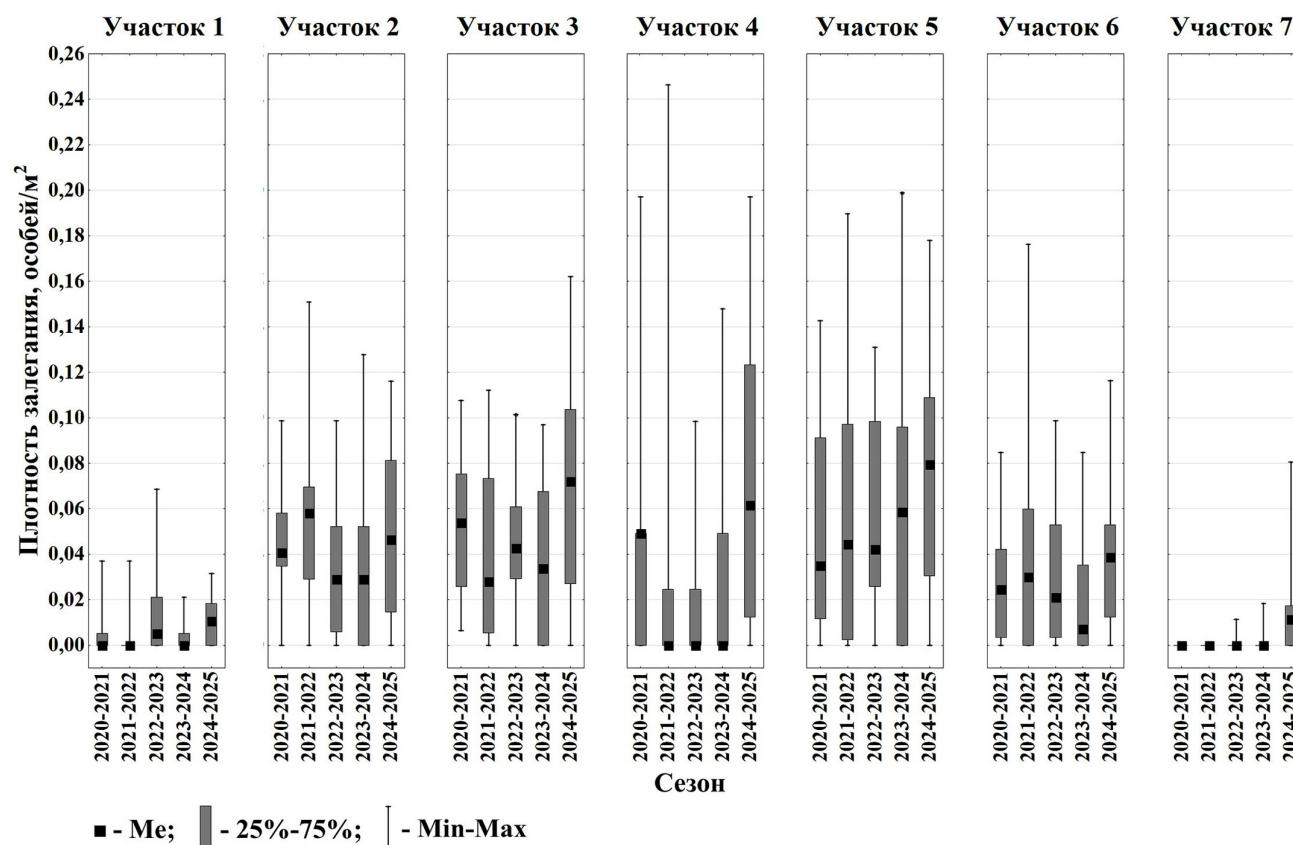
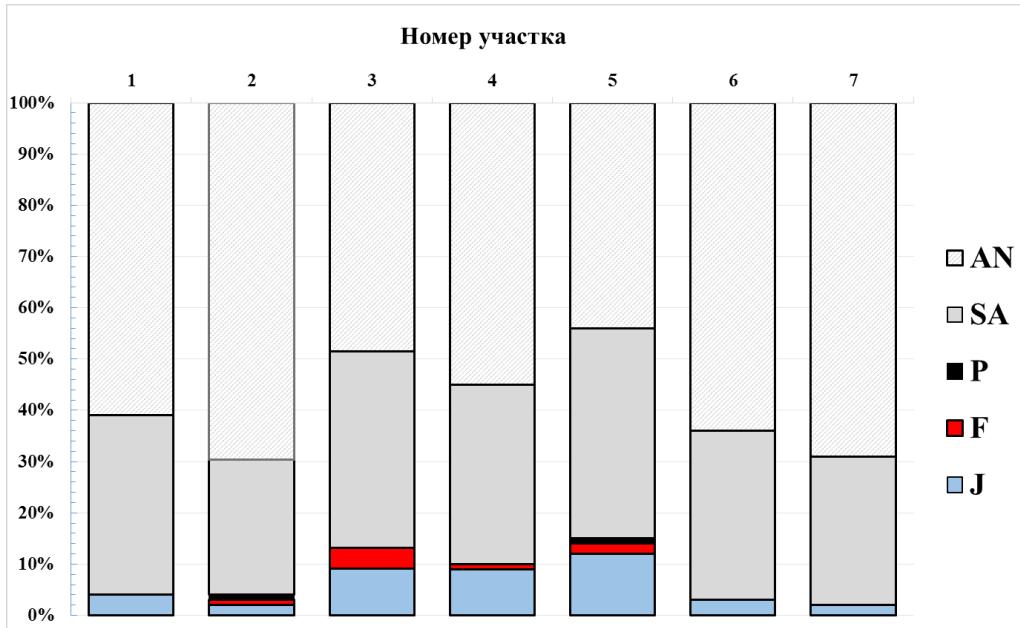


Рис. 7. Плотность залегания сивучей по участкам на мысе Чавыча за пять сезонов зимовки



**Рис. 8.** Соотношения половозрастных категорий в среднем по участкам на мысе Чавыча за 2020–2025 годах

ет ( $r = 0,74$ ) с количеством полусекачей на участках. Это говорит о том, что последние способны находить достаточное пространство для отдыха между секачами. Также найдена выраженная положительная связь между числом полусекачей и молодых зверей ( $r = 0,62$ ), поскольку они комфортно сосуществуют вместе, играют и чаще остальных проявляют большую подвижность на берегу. Молодые особи предпочитают находиться в относительно незанятой линии прибоя.

Самки составляют всего 1–4% от общего числа и занимают только участки в центре (с участка № 2 до участка № 5). Их выбор не определяется преобладанием каких-либо половозрастных категорий (из-за их малой численности трудно оценить объективно уровень корреляций с другими группами). Число наблюдений щенков также крайне мало для того, чтобы искать статистические зависимости, однако ясно, что в таком возрасте (4–8 месяцев) они кормятся молоком матери и приходят совместно с ними. Если мы не обнаружили рядом с щенком самку, то скорее всего она ушла кормится.

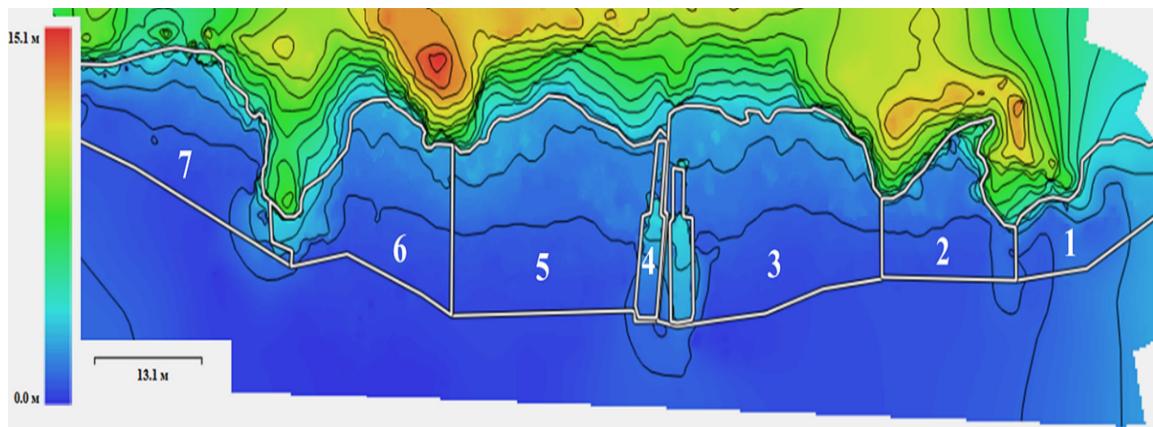
На основании данных, указанных на рис. 6 и 7, мы можем сделать вывод, что наиболее благоприятными являются участки со 2-го по 5-й: на них наибольшая плотность залегания и там присутствуют все половозрастные группы, в том числе чувствительные к стрессу самки и щенки. Субстрат на этих предпочтительных участках каменисто-булыжный, а ширина пляжа по максимальному отливу (0,5 м) составляет 20 м, что позволяет отползти в случае изменения уровня воды. Крутизна скальных склонов видимо решающего значения не имеет, поскольку и 3-й, и 5-й

участки окружены как обрывистыми скалами, так и слаженными оползнями. Однако если рассматривать максимальные высоты, то благоприятные участки пляжа образуют «получашу», окружённую наиболее высоким рельефом (Рис. 9).

Бетонные короба очистных труб являются по сути искусственным препятствием между благополучными 3-м и 5-м участками, и звери активно используют и его, поскольку он находится между ними.

Мы регистрировали два случая кормления матерями годовиков (18 и 22 февраля 2022 года) на участке № 3 (Рис. 10), что говорит о высокой степени благоприятности этого места для самой уязвимой части стада. При этом очевидно, что случаи кормления происходят чаще, поскольку зависимых от матери молодых особей первого года жизни и щенков мы регистрировали гораздо чаще.

На участке № 3 также было зафиксировано 9 января 2021 года что-то, напоминающее гаремное поведение. Два секача охраняли по одной самке, удерживая вокруг себя территорию. При этом рядом на лежбище в структуре залегания и поведении зверей изменений не отмечалось. Попыток спаривания также не наблюдали. Однако случаи территориального поведения у сивучей вне репродуктивных лежбищ встречаются, и они давно описаны [18]. Непосредственно на мысе Чавыча нет источников подкормки, однако вблизи него с двух сторон находятся рыбообрабатывающие предприятия, которые сбрасывают рыбные отходы в бухту. Центральное положение лежбища делает его удобным местом отдыха для сивучей, уходящих на подкормку.



**Рис. 9.** Карта высот берегового рельефа мыса Чавыча с границами участков (цифры) (смоделировано в «Agisoft» по аэрофотоснимкам Васюкова Е.С.)



**Рис. 10.** В центре фотографии на 3 участке самка кормит годовика (фото Васюкова Е.С.)

На пирсе МРКЗ значительно активней используется первый участок, на котором максимальная плотность составила 0,03 особей/м<sup>2</sup>. На втором участке - 0,008 особей/м<sup>2</sup>. Первый участок частично прикрыт от берега вторым, более возвышенным, и имеет прямой доступ к воде. Совокупность этих условий может давать сивучам чувство защищенности на этом месте. На пирсе встречаются только секачи и полусекачи, и число вторых в определённой мере зависит от первых ( $r = 0,43$ ), поскольку секачи наименее подвержены стрессу и охотней используют полностью техногенный ландшафт (такой, как пирс). Полусекачи же выходят, только если на пирсе присутствует какое-то число секачей. Соотношение полусекачей к секачам 1:6 и одинаково для обоих участков. На данном лежбище у сивучей нет возможности подкормится, одна-

ко рядом с ним имеется смотровая площадка, на которой до осени 2021 года туристы могли подкормить сивучей свежей и замороженной рыбой. Также рядом находятся два предприятия сбрасывающие отходы.

В Морском порту на береговом участке плотность залегания может достигать 0,03 особи/м<sup>2</sup>. Однако распределение здесь крайне неравномерное. Большая часть берега имеет резкий уклон, что даже при незначительном приливе сильно сокращает его площадь. При повышении уровня воды более крупные секачи занимают искусственную насыпь, а менее зрелые молодые самцы вынуждены находится наполовину в воде. К тому же секачи почти не боятся людей, которые подходят к насыпи практически вплотную. Из-за конкуренции за удобную насыпь и значительного беспокойства со стороны человека, большая часть залега-



A



B

**Рис. 11. А – Секач ожидает разгрузки рыбы, не пугаясь ни работы крана, ни собак, ни людей. В – Полусекач залез на кранец и нервно озирается по сторонам, на пирс вылезать опасается (фото Е.С. Васюкова)**

ющих здесь сивучей – секачи. Соотношение секачей к полусекачам 7:1.

На пирс в порту выходят только секачи (рис. 11А). Они способны выдерживать колоссальное антропогенное воздействие в поисках подкормки. Полусекачи иногда (4 зарегистрированных случая) пытаются подражать секачам и предпринимают попытки забраться на пирс (рис. 11В), но быстро пугаются и сходят в воду.

Соотношение секачей к полусекачам и в порту, и на МРКЗ приблизительно одинаковое. Мы объясняем это схожестью условий. Оба лежбища находятся в портовых зонах в непосредственной близости от активной производственной деятельности человека. Оба лежбища образованы по причине близости сдачи улова рыболовецкими судами, а значит вследствие доступной подкормки. При этом за секачами следует только часть полусекачей – более старшего возраста, близкого к наступлению полной физической зрелости.

Существует несколько работ, описывающих залегания сивучей на других лежбищах. В Северо-Курильске [8], по-видимому, ситуация схожа с тем, что мы видим в Петропавловске-Камчатском. Взрослые самцы сопровождают рыболовные суда и иногда выходят на пирсы для попрошайничества и воровства улова. В Южно-Курильске сивучи также наблюдаются в порту, но выходят на отдых на естественный мыс на удалении [3]. В Невельске (Сахалинская область) [6] и Отару [17] сивучи искусственно не подкармливаются и используют волноломы для отдыха в период миграций. В Сент-Бремор о. Угамак [21] сивучи кормятся в рыбном порту, но залегают на безопасном плавучем понтоне в отдалении.

Таким образом, сивучи способны быстро осваивать нетипичные места для залегания, в том числе созданные человеком. Определяет их использование защищенность от беспокойства и наличие доступной пищи.

### Зависимость поведения от типа ландшафта

На всех типах ландшафтов преобладал отдых (табл. 3). Пищевое поведение (попрошайничество, воровство рыбных отходов) наблюдается только в морском порту (17%). Оно же и является причиной агрессивных действий (1,3%) по отношению к человеку или собакам, что проявляется в демонстрационных позах, коротких атакующих выпадах, фырканьем и покачиванием головой с рычанием. Такими действиями сивучи пытаются прогнать людей или собак при их приближении. Также взрослые самцы сивучей прогоняют друг друга от баков с рыбными отходами. На естественном ландшафте сивучи проявляют заметно меньше агрессии к сородичам (0,5%), которая происходит только между секачами на мысе Чавыча при значительном увеличении плотности. Мы не наблюдали серьёзных драк между самцами. Все стычки заканчивались демонстрацией силы или единичными укусами, после чего конфликт исчерпывался. Но чаще зверь младшего возраста уступал старшему. Это описано как иерархия доминирования или возрастная иерархия [20].

Тревожное поведение наблюдается в основном на техногенном и видоизмененном ландшафте, так как на них сивучи чаще контактируют с человеком. На условно неизмененном (естественном) ландшафте тревога проявляется только при намеренном беспокойстве со стороны людей. Значительные перемещения на техногенном ландшафте (7%) объясняются беспокойством со стороны человека, на естественном – внутривидовым взаимодействием (15,5%), которое затем переходит в игровое, агрессивное и другие формы. Комфортное поведение проявлялось в принятии характерных поз в состоянии бодрствования либо в почесывании (На техногенном ландшафте сивучи часто использовали для этого острые предметы, такие как арматура или бетонные обломки). Видоизмененный и техноген-

Встречаемость типов поведения на разных ландшафтах, %

Тип поведения	Тип ландшафта		
	Техногенный	Видоизмененный	Естественный
Агрессия	1,3	0,0	0,5
Тревога	8,0	5,5	1,0
Игровое	0,0	0,0	1,0
Перемещение	7,0	0,0	15,5
Отдых	64,7	94,5	81,0
Комфортное	1,7	0,0	0,5
Половое/территориальное	0,0	0,0	0,5
Пищевое	17,3	0,0	0,0

ный ландшафт связан с чуть более высоким уровнем беспокойства – деятельность человека провоцирует повышенный уровень агрессии и вынужденные перемещения у сивучей.

В целом можно сказать, что поведение на условно-неизмененном ландшафте вблизи антропогенной среды ничем не отличается от поведения на естественном [1].

### Влияние факторов среды

Возможность подкормки, судя по всему, является первопричиной пребывания сивучей на зимовке и образования лежбищ в черте города. Она определяет современные места залегания на суше и скоплений на воде.

Вторым по значимости является беспокойство со стороны человеческой деятельности. Ярким примером может служить следующая ситуация. На Чавыче в сентябре 2021 году начались работы по реконструкции сливной трубы очистных сооружений, и они длились до начала января 2022 года. Работа тяжёлой техники, подъёмного крана и людей на лежбище повлекли значительные изменения, как в структуре размещения внутри самого лежбища, так и в распределении животных по Авачинской бухте. Работы велись в основном на участках № 3 и № 4, что приводило к регулярному сгону с них большей части зверей. При этом плотность соразмерно увеличивалась на участках № 2, № 5 и № 6 (Рис. 7).

В ноябре на Чавыче проводились самые интенсивные работы, и в это же время начинается освоение сивучами береговой части в морском порту. Вероятно, именно значительное беспокойство вынудило часть зверей отдохнуть в порту сразу после подкормки, не уходя на мыс Чавыча. В дальнейшем сивучи в морском порту наблюдались до начала декабря 2024 года и прекратили посещать это лежбище после закрытия рыбообрабатывающего предприятия.

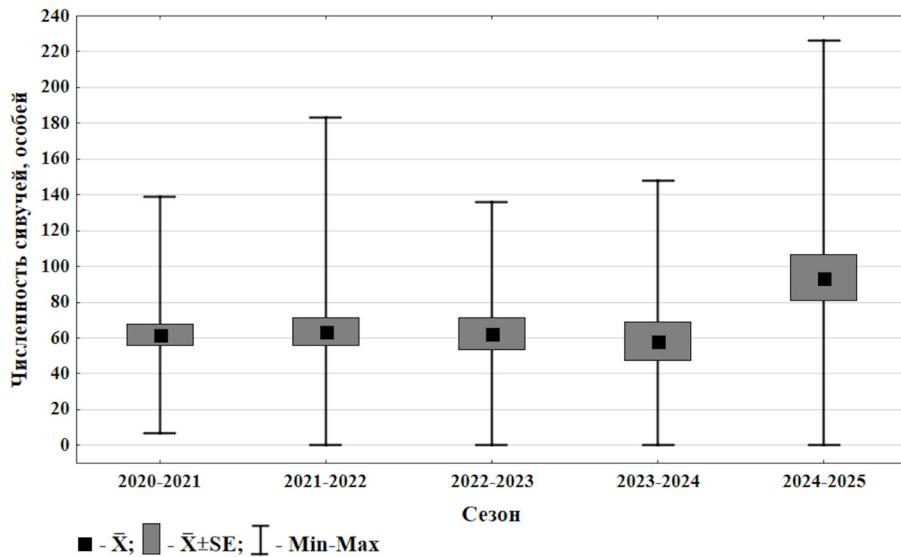
Реконструкция трубы – это длительное и серьёзное беспокойство, которое оказало заметное влияние на численность и распределение в отдельный промежуток сезона 2021-2022 ( $r = -0,450$ ;  $P \leq 0,05$ ). Во все остальные периоды наблюдений случаи беспокойства

также встречались, но были непродолжительными и не оказали воздействия на общую численность. Но нами установлено, что в целом ни в указанный сезон, ни в последующие две зимовки в общей численности сивучей на мысе Чавыча по сравнению с первым сезоном наблюдений статистически достоверных изменений не происходило (Рис. 12). И только в сезон 2024-2025 годов наблюдалось значительное увеличение показателя ( $P \leq 0,04$ ), которое объясняется общим увеличением зимующей в бухте группировки.

Таким образом, даже при сильном локальном беспокойстве, как в описанном случае, звери не уходили из городской акватории полностью, а перераспределялись на участках внутри одного лежбища или в незначительном числе размещались на соседних. Также вероятно, многие звери пережидали неблагоприятные условия на плаву, и поэтому не попадали в результаты наземного учёта.

Мы рассчитывали влияние абиотических факторов среды только на мысе Чавыча. Значимое воздействие может оказывать температура и давление (табл. 4). Чем выше была температура, тем больше сивучей сходило в воду, очевидно для охлаждения. Мы не выявили статистически достоверного влияния уровня заплеска и высоты прилива на численность сивучей на берегу, поскольку даже при максимальном приливе животным хватало места на данном лежбище, чтобы отодвинуться от линии прибоя. Однако на пирсе МРКЗ, очевидно, этот фактор имеет значение, так как происходит затопление более удобного первого участка. А в морском порту, напротив, низкий уровень воды ограничивал возможность сивучей выходить на пирс. На двух последних лежбищах из-за ограниченного объема данных делать выводы, основанные на статистических расчетах, считаем нецелесообразным.

Несмотря на отсутствие в наших наблюдениях значимой зависимости, ледовая обстановка в бухте может точечно влиять на численность при большом проценте оледенения. В таком случае льды иногда используются сивучами как субстрат для отдыха. Так же толстый обширный лёд способен затруднять перемещение, так как сивучам сложно его пробить, чтобы сделать лунку для



**Рис. 12.** Общая численность сивучей на мысе Чавыча в течение зимовок с осени 2020 до весны 2025 года

Табл. 4.

**Коэффициенты корреляции Спирмэна между числом залегающих на лежбище Чавыча сивучей и некоторыми факторами среды (полужирным шрифтом выделены показатели со значимостью  $p < 0,05$ )**

Факторы	Зимовки				
	2020-2021	2021-2022	2022-2023	2023-2024	2024-2025
Температура	<b>-0,39</b>	<b>-0,47</b>	-0,32	<b>-0,65</b>	<b>-0,56</b>
Давление	<b>-0,51</b>	<b>-0,41</b>	-0,16	-0,10	-0,02
Осадки	-0,19	0,12	0,03	-0,19	-0,38
Заплеск	-0,26	Оледенение отсутствовало	0,02	0,13	0,01
Оледенение	-0,01	-0,03	-0,06	0,18	Оледенение отсутствовало
Высота прилива	0,14	0,28	0,28	0,19	-0,23

дыхания. Тогда более молодые сивучи стараются избегать обширного льда. Следует отметить, что в результате наблюдений и их анализа мы не сталкивались с фактами, указывающими на то, что происходящие процессы восстановления биоты Авачинской губы после замора в результате «красного прилива» осенью 2020 года могли напрямую влиять на численность и распределение зимующих сивучей в этой акватории [13].

### Заключение

На лежбищах Авачинской бухты встречаются сивучи всех половозрастных категорий. Распределение их крайне неравномерное. Самки и молодые звери составляют небольшую долю от всех животных и залегают только на мысе Чавыча, поскольку это место редко посещается людьми, имеет удобный для залегания глубокий пляж, защищённый со стороны суши возвышенным рельефом. Самцы составляют абсолютное большинство в бухте, в том числе, на мысе Чавыча, и в силу своей высокой толерантности к стрессу только

их можно встретить рядом с портовыми сооружениями, где они получают подкормку.

Различия в поведении, проявляющиеся в увеличении межвидовой и внутривидовой агрессии, вынужденных перемещениях и тревожности, обусловлены не самим ландшафтом, а необходимостью взаимодействия с человеком в портовых зонах для получения подкормки, в то время как на мысе Чавыча поведение вполне соответствует естественному в нерепродуктивный период. Несмотря на значительное беспокойство и периодический сгон сивучей на отдельных лежбищах, животные выработали стратегию перераспределения по участкам или ухода на соседние лежбища. В подобных случаях они стремятся не покидать Авачинскую бухту, что подтверждается отсутствием достоверных различий по численности между зимовками.

Абиотические условия в основном не оказывают значимого влияния на численность залегающих сивучей. Исключением является температура воздуха – чем она выше, тем меньше сивучей остается на берегу.

**Благодарности.** Результаты исследований, представленные в настоящей публикации, получены в рамках государственного задания Минобрнауки России FZSS-2025-0006, реализуемой ФГБОУ ВО «КамГУ им. Витуса Беринга». Также частично в рамках государственного задания КФ ТИГ ДВО РАН по теме «Структурно-функциональная организация, динами-

ка и продуктивность наземных и прибрежных экосистем на Дальнем Востоке РФ. Разработка научных основ и экономических инструментов устойчивого природопользования» (№ ЕГИСУ 124012700496-4) и по теме «Исследование и сохранение уникального морского биоразнообразия Камчатки» (№ ЕГИСУ 124093000049-8).

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Алтухов АВ. Репродуктивное поведение сивучей (*Eumetopias jubatus* Schreber 1776) (диссертация). Москва: МГУ им. Ломоносова; 2005.
2. Баянов АЮ, Корнев СИ. Образование нового берегового лежбища сивучей (*Eumetopias jubatus*) в г. Петропавловске-Камчатском. В кн.: Морские млекопитающие Голарктики. Одесса; 2008. С. 62-4.
3. Бородавкина МВ, Бобырь ИГ, Карпенко СЕ. Зимующие сивучи (*Eumetopias jubatus*) у островов Кунашир и Шикотан. В кн.: Сборник научных трудов по материалам IX международной научной конференции «Морские млекопитающие Голарктики»; 31 октября-5 ноября 2016. Астрахань-Москва; 2018; С. 90-4.
4. Бурканов ВН. Сивуч *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776). В кн. Бурканов ВН, ред. Красная книга Российской Федерации. Москва: Национально-исследовательский институт экологии; 2021. С. 1001-2.
5. Васюков ЕС, Кириллова АД, Бурканов ВН. Краткие сведения о наблюдениях за зимующими в Авачинской бухте сивучами в сезоны 2020/2021 и 2021/2022 гг. В кн.: Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Петропавловск-Камчатский; 2022. С.153-6.
6. Васюков ЕС, Кириллова АД, Любаченко СВ, Бурканов ВН. Лежбище сивучей (*Eumetopias jubatus*) на волноломе порта Невельск в условиях антропогенного воздействия. Биосфера. 2025;17(2):108-123.
7. Вертянкин ВВ, Никулин ВС. Залежка сивучей (*Eumetopias jubatus*) в черте города Петропавловска-Камчатского. В кн.: Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Петропавловск-Камчатский; 2005. С. 23-33.
8. Корнев СИ. Синантропизация сивуча (*Eumetopias jubatus*, Schreber, 1776) на Камчатке в черте г. Петропавловска-Камчатского (Итоги 20-летнего мониторинга). Вестник КамчатГТУ. 2022;60:98-122.
9. Никулин ВС, Корнев СИ, Бурканов ВН. Особенности зимовки сивучей *Eumetopias jubatus* в Авачинской бухте в сезон 2014/2015 гг. В кн.: Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Петропавловск-Камчатский; 2015. С. 200-3.
10. Никулин ВС, Корнев СИ, Вертянкин ВВ, Есина ВП, Бурканов ВН. Результаты мониторинга сивучей (*Eumetopias jubatus*), зимовавших в Авачинской бухте в 2001–2012 гг. Исследование водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2013;28:17-35.
11. Никулин ВС, Корнев СИ, Есина ВП, Бурканов ВН. Новые сведения о сивучах *Eumetopias jubatus*, зимовавших в Авачинской бухте в сезоне 2012/13 г. В кн.: Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Петропавловск-Камчатский; 2013. С. 246-9.
12. Павлова ВЮ, Делемень ИФ. Применение метода георадиолокации на Камчатке. Москва: Академия Естествознания; 2024; С. 144.
13. Токранов АМ, Данилин ДД, Жигадлова ГГ, Санамян КЭ, Санамян НП, Усатов ИА. Оценка воздействия возникшей осенью 2020 г. у берегов Камчатки неблагоприятной экологической обстановки на представителей различных групп гидробионтов. Труды X Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)»; 2021 окт 25–29; Москва, Тверь: ПолиПРЕСС; 2021. С.93-6.

### Общий список литературы/Reference List

1. Altukhov AV. [Reproductive Behavior of the Sea Lion (*Eumetopias jubatus* Schreber 1776)]. PhD Dissertation. Moscow: Moscow State University; 2005. (In Russ.)
2. Bayanov AYu, Kornev SI. [Formation of a new coastal rookery of sea lions (*Eumetopias jubatus*) in Petropavlovsk-Kamchatsky]. In: Moskiye Mlekopitayuschiye Golarktiki [Marine Mammals of the Holarctic]. Odessa-Moscow; 2008: P. 62-4. (In Russ.)

3. Borodavkina MV, Bobyr IG, Karpenko SYe. [Wintering Steller sea-lions (*Eumetopias jubatus*) near Kunashir and Shikotan Islands]. In: Moskiye Mlekopitayuschiye Golarktiki [Marine Mammals of the Holarctic]. Astrakhan-Moscow; 2018; P. 90-4. (In Russ.)
4. Burkanov VN. [Sea lion *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776)]. In: Burkanov VN, ed. Krasnaya Kniga Rossiyskoy Federatsii [Red Book of the Russian Federation]. Moscow: Nauchno-Issledovatelskiy Institut Ekologii; 2021. P. 1001-2. (In Russ.)
5. Vasyukov YeS, Kirillova AD, Burkanov VN. [Brief information on observations of sea lions wintering in Avacha Bay in the seasons 2020/2021 and 2021/2022]. In: Sokhraneniye Bioraznoobraziya Kamchatki i Prilegayuschikh Morey [Conservation of Biodiversity of Kamchatka and Adjacent Seas]. Petropavlovsk-Kamchatsky; KB PGI FEB RAS; 2022. P.153-6. (In Russ.)
6. Vasyukov YeS, Kirillova AD, Liubachenko SV, Burkanov VN. [A Haul-out of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) located on the mole of Nevelsk port under anthropogenic impact]. Biosfera. 2025; 17(2):108-123.
7. Vertiankin VV, Nikulin VS. [Sea lion (*Eumetopias jubatus*) haulout in the Petropavlovsk-Kamchatskiy city]. In: Sokhraneniye Bioraznoobraziya Kamchatki i Prilegayuschikh Morey [Conservation of Biodiversity of Kamchatka and Adjacent Seas]. Petropavlovsk-Kamchatsky; KB PGI FEB RAS; 2004. P. 23-33. (In Russ.)
8. Kornev SI. [Synanthropization of the sea lion (*Eumetopias jubatus*, Schreber, 1776) in Kamchatka within the city of Petropavlovsk-Kamchatsky (Results of 20-year monitoring)]. Bulletin of KamchatSTU. 2022;60:98-122. (In Russ.)
9. Nikulin VS, Kornev SI, Vertyanin VV, Yesina VP, Burkanov VN. [Monitoring results of sea lions (*Eumetopias jubatus*) wintering in Avacha Bay in 2001-2012]. Issledovaniye Vodnykh Biologicheskikh Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoy Chasti Tikhogo Okeana [Researche of the Aquatic Biological Resources of Kamchatka and the North-West Part of the Pacific Ocean]. 2013;28:17-35. (In Russ.)
10. Nikulin VS, Kornev SI, Yesina VP, Burkanov VN. [New information about sea lions *Eumetopias jubatus* wintering in Avacha Bay in the 2012/13 season]. In: Sokhraneniye Bioraznoobraziya Kamchatki i Prilegayuschikh Morey [Conservation of Biodiversity of Kamchatka and Adjacent Seas]. Petropavlovsk-Kamchatsky; 2013. P. 246-9. (In Russ.)
11. Nikulin VS, Kornev SV, Burkanov VN. [Features of wintering of sea lions *Eumetopias jubatus* in Avacha Bay in the 2014/2015 season]. In: Sokhraneniye Bioraznoobraziya Kamchatki i Prilegayuschikh Morey. [Conservation of Biodiversity of Kamchatka and Adjacent Seas]. Petropavlovsk-Kamchatsky; KB PGI FEB RAS; 2015. P. 200-3. (In Russ.)
12. Pavlova VYu, Delemen IF. Primereniye Metoda Georadiolokatsii na Kamchatke [Application of the Georadiolocation Method in Kamchatka]. Moscow: Akademiya Yestestvennykh Nauk; 2024. P. 144. (In Russ.)
13. Tokranov AM, Danilin DD, Zhigadlova GG, Sanamyan KE, Sanamyan NP, Usatov IA. [Evaluation of the effect of negative ecological situation arisen near coasts of Kamchatka in autumn 2020 on different groups of hydrobionts]. In: Trudy X Mezhdunrodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii "Morskiye Issledovaniya i Obrazovaniye (MARESEDU-2021)" [Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2021)"; 2021 Oct 25-29; Moscow, Tver: poliPRESS; 2021. P. 93-6. (In Russ.)
14. Ban SS. Modelling and characterization of Steller sea lion haulouts and rookeries using oceanographic and shoreline type data. PhD Dissertation. University of British Columbia; 2005.
15. Ban SS, Trites AW. Quantification of terrestrial haulout and rookery characteristics of Steller sea lions. Marine Mammal Sci.. 2007;23(3):496-507.
16. Call KA, Loughlin TR. An ecological classification of Alaskan Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*) rookeries. Fisheries Oceanography. 2005;14(1):212-22.
17. Chayahara Y, Nakanowataru Y, Abe S, Kurosawa R, Suma S, Murasato N, Oyamada R, Ebashi N, Tsunokawa M, Sakurama M, Kooriyama T. Human impact on the twenty-four-hour patterns of Steller sea lions' use of a haulout in Hokkaido, Japan. Animals. 2024;14(9):1312.
18. Harestad AS, Fisher HD. Social behavior in a non-pupping colony of Steller sea lions (*Eumetopias jubata*). Can J Zool. 1975;53:1596-613.
19. Jefferson TA, Smultea MA, Ward EJ. Distribution and abundance of California (*Zalophus californianus*) and Steller (*Eumetopias jubatus*) sea lions in the Inshore Waters of Washington. Aquat Mammals. 2023;49(4):366-81.
20. Le Boeuf BJ, Peterson RS. Social status and mating activity in elephant seals. Science. 1969;163(3862):91-3.
21. National Marine Fisheries Service. Endangered Species Act Section 7(a) (2) Biological Opinion: Biorka Island Dock Replacement Project, Sitka, Alaska. Retrieved from NOAA Repository; 2017.

# ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ДИНАМИКУ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ ПРИ ОДНОРОДНОМ РЕЖИМЕ ОСАДКОВ: МУЛЬТИСАЙТОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В НИГЕРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SOILGRIDS И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**Н.О. Нвоби**

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия.

Эл. почта: [nvobi\\_n@pfur.ru](mailto:nvobi_n@pfur.ru)

Статья поступила в редакцию 19.10.2025; принята к печати 12.11.2025

Изучено влияние свойств почв на предрасположенность к овражной эрозии в трёх различных геоморфологических районах Нигерии: на плато Абуджа, в холмистой области Иданре и в бассейне Огун-Ошун. Все указанные территории находятся в зоне однородного режима осадков. С помощью метода классификации «случайный лес» (*Random Forest*, RF) и почвенных характеристик, извлечённых исключительно из базы данных SoilGrids, проведён анализ того, как физико-химические свойства почв формируют пространственные различия в развитии оврагов. Динамика оврагообразования за период с 2000 по 2025 год демонстрирует существенное расширение овражной сети на всех участках: общая площадь оврагов увеличилась более чем на 500% в бассейне Огун-Ошун и на плато Абуджа. Среди оценённых почвенных параметров ключевыми предикторами возникновения оврагов оказались содержание песка, содержание глины, соотношение песка и глины. Эти переменные показали наибольшие значения важности признаков (0,15–0,27). Почвенный органический углерод (SOC) также внес умеренный вклад в качество модели, что указывает на его стабилизирующее влияние на структуру почвы. Модели RF продемонстрировали высокую прогностическую точность ( $F1\text{-score} = 0,88$ ;  $AUC = 0,79$ ), подтвердив надёжность прогнозирования на основе гранулометрического состава почв в гетерогенных ландшафтах. Анализ пространственной изменчивости и неопределенности показал, что паттерны предрасположенности к оврагообразованию в большей степени определяются неоднородностью гранулометрического состава, а не систематической ошибкой модели. В целом результаты исследования свидетельствуют о том, что почвы с более грубым гранулометрическим составом и низким содержанием почвенного органического углерода (SOC) сильнее подвержены образованию оврагов. Это подчёркивает необходимость целенаправленной охраны почв и управления растительным покровом в бассейнах, склонных к эрозии. Работа подтверждает ключевую роль состава почв в формировании динамики оврагообразования и предлагает основанную на данных методологическую рамку для снижения регионального риска эрозии.

**Ключевые слова:** овражная эрозия, свойства почв, SoilGrids, Нигерия, дистанционное зондирование, эродируемость почв, геоинформационные системы

## SOIL CONTROLS OF GULLY EROSION DYNAMICS IN CONDITIONS OF UNIFORM RAINFALL REGIMENS: A MULTI-SITE STUDY IN NIGERIA USING SOILGRIDS AND REMOTE SENSING

**N.O. Nwobi**

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Email: [nvobi\\_n@pfur.ru](mailto:nvobi_n@pfur.ru)

This study investigates the influence of soil properties on gully erosion susceptibility across three distinct geomorphic settings in Nigeria: the Abuja Plateau, the Idanre Hills, and the Ogun-Oshun Basin, all of which are located under a uniform rainfall regime. Using Random Forest (RF) classification and soil attributes derived exclusively from the SoilGrids database, the analysis evaluates how physicochemical soil characteristics shape spatial variations in gully development. Gully dynamics between 2000 and 2025 reveal a substantial expansion across all sites, with the total gully area increasing by over 500% in the Ogun-Oshun Basin and the Abuja Plateau. Among the soil variables assessed, sand content, clay content, and the sand-clay ratio emerged as dominant predictors of gully occurrence, accounting for the highest feature importance values (0.15–0.27). Soil organic carbon (SOC) also contributed moderately to model performance, suggesting its stabilising influence on soil structure. The RF models achieved strong predictive accuracy ( $F1\text{-score} = 0.88$ ;  $AUC = 0.79$ ), confirming the robustness of soil-texture-based prediction across heterogeneous landscapes. Spatial variability and uncertainty analyses further indicated that textural heterogeneity largely governs susceptibility patterns rather than model bias. Overall, the findings demonstrate that coarser-textured, low soil organic carbon (SOC) soils are more prone to gully initiation, highlighting the need for targeted soil conservation and vegetation management in erosion-prone basins. The study reinforces the central role of soil composition in shaping gully evolution and provides a data-driven framework for mitigating regional erosion risk.

**Keywords:** Gully erosion; soil properties; SoilGrids; Nigeria; remote sensing; soil erodibility; GIS

## 1. Введение

Овражная эрозия повсеместно признаётся одной из наиболее серьёзных форм деградации земель в мировом масштабе. Она приводит к образованию глубоких промоин, фрагментирующих ландшафты, и удалению плодородного слоя почвы и создаёт угрозу жизнедеятельности населения. Помимо локальных последствий, овраги вносят существенный — и притом непропорционально большой — вклад в увеличение стока наносов, ухудшение качества воды и деградацию экосистем [1, 2]. Актуальность проблемы за последние два десятилетия привлекла внимание исследователей во всём мире. При этом факторы, обусловливающие развитие оврагов, остаются крайне изменчивыми и специфичными для каждого конкретного участка. Их формирование определяется сложным взаимодействием климатических, геоморфологических, почвенных факторов и особенностей землепользования [3, 4].

В Африке овражная эрозия представляет собой значительную экологическую и социально-экономическую угрозу. Современные оценки континентального масштаба, выполненные с применением дистанционного зондирования и методов машинного обучения, показали, что на африканском континенте распространены обширные овражные сети. Особенно это характерно для влажных и субгумидных регионов, где интенсивные осадки сочетаются с неустойчивыми почвами и интенсивным землепользованием [5, 6]. В южной части Африки исследования предрасположенности к оврагообразованию свидетельствуют о том, что, хотя экстремальные осадки инициируют зарождение оврагов, их дальнейшее распространение в значительной степени определяется внутренними свойствами почв и особенностями рельефа [7]. Аналогично, исследования в Западной Африке показывают, что вырубка лесов, слабая структура почв и строительство дорог ускоряют образование оврагов. Это имеет серьёзные последствия для продуктивности сельского хозяйства и инфраструктуры сельских территорий [8].

Нигерия входит в число стран, испытывающих наиболее острые последствия данного процесса. Многочисленные исследования фиксируют тревожные темпы роста оврагов в юго-восточных и южно-центральных штатах, где стремительная урбанизация и обезлесение усугубляют проблему [9–11]. Многовременное картографирование оврагов выявило темпы их расширения от нескольких до десятков метров в год. Это нередко приводит к: потере сельскохозяйственных угодий, разрушению жилых домов и дорог, вынужденному переселению целых населённых пунктов [12, 13]. При этом, несмотря на десятилетия исследований, сосредоточенных преимущественно на роли осадков, сохраняется заметная вариабельность в развитии оврагов при сходных климатических усло-

виях. Последние исследования, проведённые в Нигерии, показывают: почвы с высоким содержанием пыли, низким содержанием органического вещества и слабой агрегатной устойчивостью значительно более подвержены быстрому развитию оврагов по сравнению с соседними участками, где почвы обладают большей связностью [14–16]. Эти данные свидетельствуют о том, что почвенные характеристики — недостаточно изученный, но критически важный фактор, определяющий динамику оврагообразования.

Однако количественная оценка взаимосвязи между свойствами почв и развитием оврагов зачастую затруднена из-за сложности и высокой стоимости сбора полевых данных на множестве участков. В этой связи цифровые методы картографирования почв предлагают альтернативное решение. Они позволяют получать согласованные оценки таких характеристик, как гранулометрический состав, содержание органического углерода и объемная плотность, на обширных территориях [17, 18].

В рамках данного исследования данные о свойствах почв были извлечены из глобальной базы данных Soil-Grids v2.0 (ISRIC), доступ к которой осуществлялся через платформу Google Earth Engine (GEE). Эта база предоставляет стандартизированную почвенную информацию, полученную на основе моделей машинного обучения и гармонизированных почвенных наблюдений. Такие наборы данных позволяют исследовать связи между свойствами почв и эрозионными процессами в ландшафтных и региональных масштабах, в том числе в тех случаях, когда проведение традиционных полевых исследований невозможно.

Таким образом, цель данного исследования — оценить роль свойств почв в развитии овражной эрозии на трёх участках, находящихся в зоне однородного режима осадков. В рамках исследования предполагается: (1) картографировать и количественно оценить динамику овражной эрозии за период с 2000 по 2025 год; (2) извлечь и охарактеризовать свойства почв; (3) установить связь между почвенными переменными и показателями оврагообразования; (4) оценить вариабельность и неопределённость взаимосвязей «почва — овраг»; (5) интерпретировать общую роль почв в объяснении предрасположенности к оврагообразованию при однородном режиме осадков.

## 1. Introduction

Gully erosion is widely recognised as one of the most severe forms of land degradation worldwide, producing deep incisions that fragment landscapes, remove fertile topsoil, and threaten human livelihoods. Beyond local impacts, gullies also contribute disproportionately to sediment fluxes, water quality deterioration, and ecosystem decline [1,2]. The urgency of this problem has drawn global research attention over the past two decades,

yet its drivers remain highly variable and site-specific, reflecting the interaction of climatic, geomorphic, soil, and land-use factors [3,4].

Across Africa, gully erosion represents a significant environmental and socio-economic hazard. Recent continental-scale assessments using remote sensing and machine learning have revealed that Africa is home to extensive gully networks, particularly in humid and sub-humid regions, where high-intensity rainfall combines with fragile soils and intensive land use [5,6]. In southern Africa, susceptibility studies highlight that while extreme rainfall initiates gullying, intrinsic soil and terrain conditions largely govern where gullies expand [7]. Similarly, West African studies demonstrate that land clearing, weak soil structure, and road development accelerate gully initiation, with severe consequences for agricultural productivity and rural infrastructure [8].

Nigeria is among the countries most critically affected. Numerous studies document the alarming growth of gullies in southeastern and south-central states, where rapid urbanisation and deforestation exacerbate the problem [9-11]. Multi-temporal mapping of gullies has revealed expansion rates ranging from a few meters to tens of meters annually, often leading to the loss of farmland, destruction of houses and roads, and displacement of entire communities [12,13]. Yet despite decades of rainfall-focused explanations, notable variability persists among gullies that receive similar climatic inputs. Recent Nigerian studies indicate that soils with high silt content, low organic matter, and poor aggregate stability are far more susceptible to rapid gully advance than adjacent landscapes with more cohesive soils [14-16]. This evidence suggests that soils are an underexplored yet critical factor in shaping gully dynamics.

However, quantifying soil-gully relationships has often been constrained by the difficulty and cost of collecting field soil data across multiple locations. Digital soil mapping initiatives now offer an alternative, providing consistent estimates of soil properties such as texture fractions, organic carbon, and bulk density across large areas [17,18]. In this study, soil property data were extracted from the global SoilGrids v2.0 database (ISRIC), which delivers standardised soil information derived from machine learning models and harmonised soil observations. These datasets enable the testing of soil-erosion linkages at landscape and regional scales, particularly where traditional field campaigns are not feasible.

The aim of this study is therefore to evaluate the role of soil properties in driving gully erosion across three sites under a uniform rainfall regime. Specifically, the study will (i) map and quantify gully erosion dynamics between 2000 and 2025, (ii) extract and characterise soil properties, (iii) relate these soil variables to gully metrics, (iv) assess variability and uncertainty in the soil-gully relationships,

and (v) interpret the broader role of soils in explaining susceptibility under uniform rainfall.

## **2. Материалы и методы**

### **2.1. Район исследований**

Исследование проводилось в трех ландшафтах Нигерии: плато Абуджа, холмы Иданре и бассейн рек Огун-Ошун (Рис. 1-3). Эти участки были выбраны потому, что представляют геоморфологически разнородные среды, но имеют общий режим осадков, что предоставляет возможность оценить роль свойств почвы в развитии овражной эрозии без мешающего влияния климатической изменчивости. Вместе они также подчеркивают экологическую и социально-экономическую важность борьбы с эрозией, поскольку каждый участок сталкивается с проблемами деградации земель, угрожающими сельскому хозяйству, поселениям и инфраструктуре.

## **2. Materials and Methods**

### **2.1. Study Area**

The research was carried out in three landscapes in Nigeria: the Abuja Plateau, the Idanre Hills, and the Ogun-Osun River Basin (Fig. 1-3). These sites were selected because they represent geomorphologically diverse environments but share a common rainfall regime, thereby providing an opportunity to evaluate the role of soil properties in driving gully erosion without the confounding influence of climatic variability. Together, they also emphasise the environmental and socio-economic importance of erosion control, as each site faces challenges related to land degradation that threaten agriculture, settlements, and infrastructure.

#### **2.1.1. Плато Абуджа**

Плато Абуджа расположено в центральной части Нигерии (Рис. 1), приблизительно между 8°50' с.ш. и 9°30' с.ш., и 7°00' в.д. и 7°40' в.д. Территория характеризуется возвышенным рельефом с островными горами (инзельбергами), расчлененными равнинами и волнистыми холмами, подстилаемыми в основном гранитными и мигматитовыми гнейсами [19]. Выветривание этих пород приводит к образованию песчаных почв, сильно подверженных эрозии при нарушении растительного покрова. Климат влажный тропический, с одним выраженным сезоном дождей с апреля по октябрь и сухим сезоном с ноября по март. Годовое количество осадков в среднем составляет 1200-1500 мм, обычно они выпадают в виде коротких, интенсивных ливней [20]. Быстрая урбанизация на территории Федеральной столичной области ускорила деградацию земель, сделав плато горячей точкой для развития оврагов [21].

Согласно классификации Всемирной реферативной базы почвенных ресурсов (WRB), преобладаю-

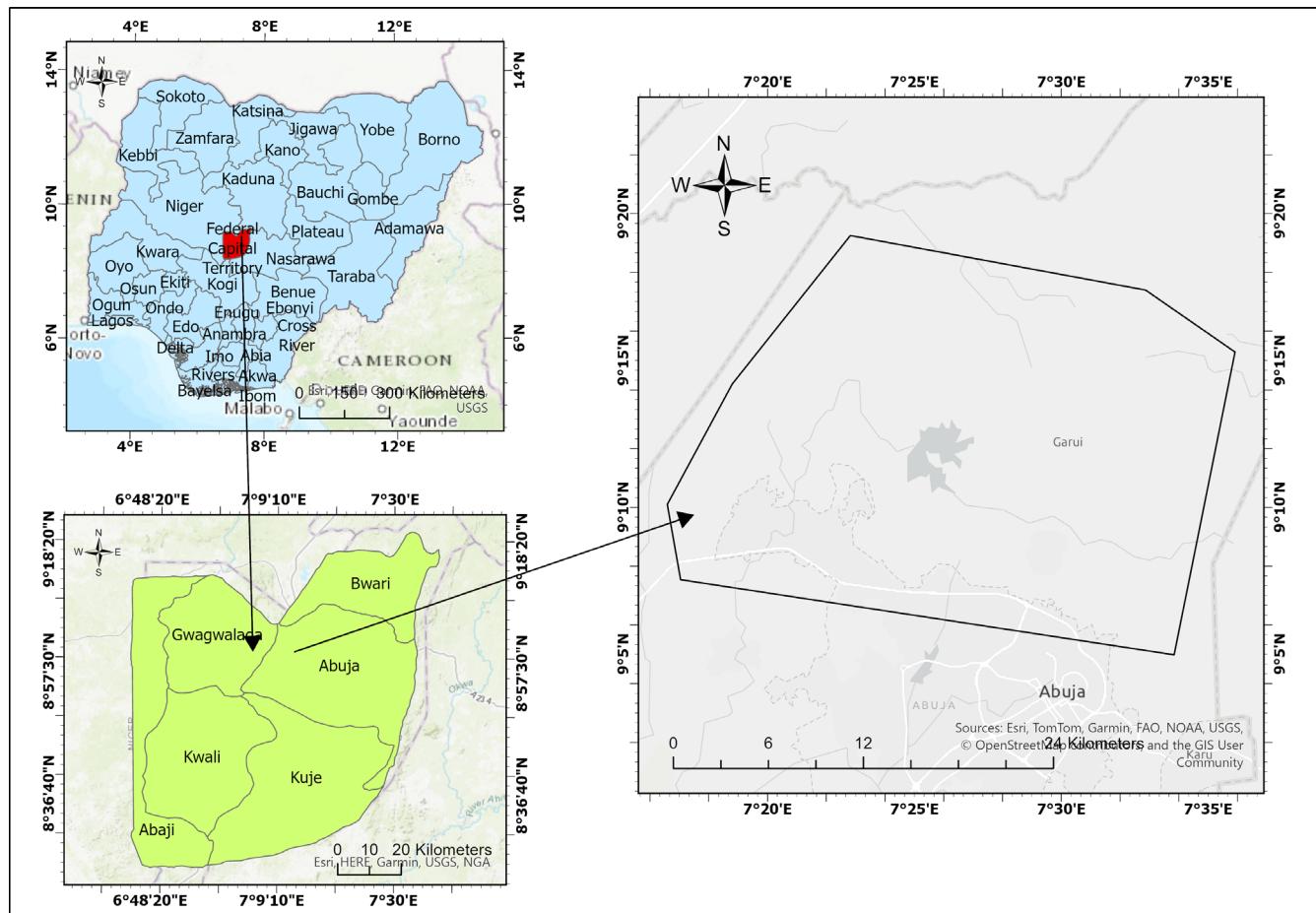
ший почвенный покров плато Абуджа представлен лептосолями, регосолями и ферральсолями, которые сочетаются с акрисолями на нижних частях предгорий и склонах речных долин. Лептосоли и регосоли приурочены к мелководным каменистым возвышеностям и скалистым инзельбергам, где почвообразование ограничено устойчивыми коренными породами фундамента. Ферральсоли и акрисоли, напротив, представляют собой глубоко выветрелые латеритные почвы, распространённые на полого-волнистых поверхностях плато. Эти сильно окисленные, обогащённые железом почвенные профили характеризуются низкой катионаобменной способностью и слабой структурной устойчивостью. Вследствие этого они подвержены интенсивной эрозии при удалении защитного растительного покрова.

### 2.1.1 Abuja Plateau

The Abuja Plateau is situated in north-central Nigeria (Fig. 1), approximately between 8°50'N and 9°30'N, and 7°00'E and 7°40'E. The area is characterised by elevated terrain with inselbergs, dissected plains, and undulating hills,

underlain primarily by granitic and migmatite gneiss rocks [19]. Weathering of these rocks produces sandy soils that are highly erodible when vegetation is disturbed. The climate is humid tropical, with a unimodal rainy season from April to October and a dry season from November to March. Annual rainfall averages 1,200-1,500 mm, typically delivered by short, intense storms [20]. Rapid urban expansion in the Federal Capital Territory has accelerated land degradation, making the plateau a hotspot for gully development [21].

According to the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification, the dominant soils of the Abuja Plateau comprise Leptosols, Regosols, and Ferralsols, occurring in association with Acrisols on the lower pediments and valley flanks. The Leptosols and Regosols occupy shallow, stony uplands and rocky inselbergs where resistant basement rocks limit soil formation, while the Ferralsols and Acrisols are deeply weathered, lateritic soils found on the gently undulating plateau surfaces. These highly oxidised, iron-rich profiles exhibit low cation-exchange capacity and weak structural stability, predisposing them to severe erosion once the protective vegetation cover is removed.



**Рис. 1. Карта расположения плато Абуджа.**

**Fig. 1. Location map of the Abuja Plateau.**

### 2.1.2. Холмы Иданре (штат Ондо)

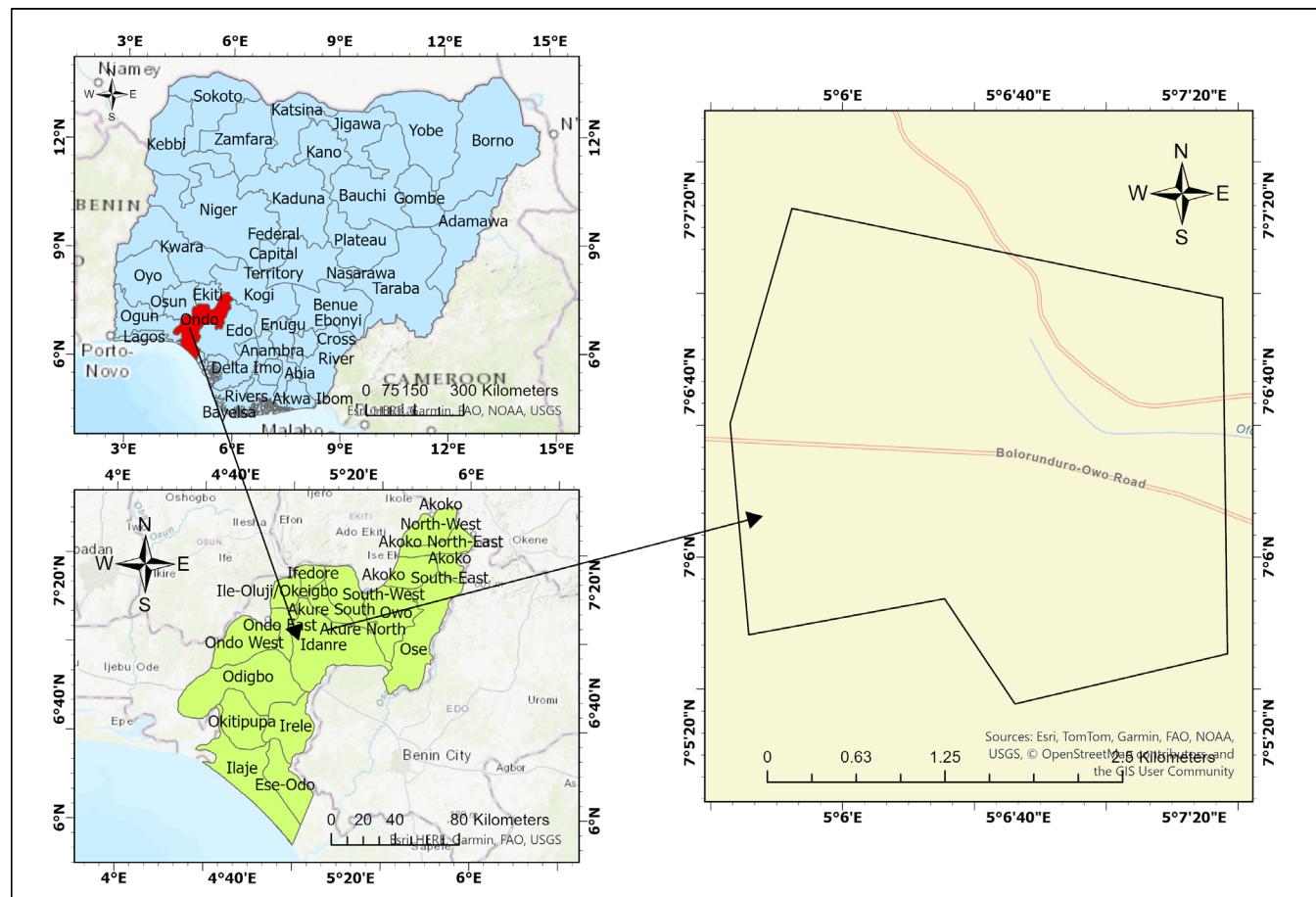
Холмы Иданре расположены на юго-западе Нигерии (Рис. 2), в штате Ондо, в пределах широт от 6°40' с.ш. до 7°10' с.ш. и долгот от 5°00' в.д. до 5°15' в.д. Этот пересеченный ландшафт состоит из крутых гранитных инзельбергов и гряд с высотами, превышающими 900 м [22]. Маломощные почвы и крутые уклоны способствуют быстрому поверхностному стоку во время дождей, а растительность представлена в основном низменным тропическим лесом. Однако расширение сельского хозяйства и заселение территории вокруг города Иданре привели к сведению лесов и обнажению почв. На территории выпадает 1500–2000 мм осадков в год с пиками в июне-июле и в сентябре [23]. Овраги в этом районе, как правило, меньше по размерам, но с крутыми склонами [24], что отражает влияние склоновой гидрологии.

Согласно классификации Всемирной реферативной базы почвенных ресурсов (WRB), почвенный покров холмов Иданре преимущественно представлен лептосолями и регосолями. Эти почвы приурочены к крутым скалистым склонам и вершинам холмов, где мощ-

ность почвенного профиля минимальна, а материнская порода (гранит) выходит на поверхность. На нижних частях предгорий и подножиях долинных склонов широко распространены камбисоли и акрисоли. Они формируют слаборазвитые и средневыветрелые профили, сформировавшиеся в условиях влажного тропического климата. В окружающих низменностях и межхолмовых понижениях встречаются более глубокие, хорошо структурированные ферральсоли и нитисоли. Для них характерны: прочная агрегатная структура, красноватая окраска и низкая насыщенность основаниями — признаки, типичные для интенсивно выветрелых тропических почв. Такое пространственное варьирование почвенного покрова отражает тесное взаимодействие топографии, литологии и степени выветривания в пределах ландшафта Иданре.

### 2.1.2 Idanre Hills (Ondo State)

The Idanre Hills are located in southwestern Nigeria (Fig. 2), within Ondo State, bounded by latitudes 6°40'N to 7°10'N and longitudes 5°00'E to 5°15'E. This rugged landscape comprises steep granitic inselbergs and ridges,



**Рис. 2.** Карта расположения холмов Иданре.  
**Fig. 2.** Location map of the Idanre Hills

with elevations exceeding 900 m [22]. Shallow soils and steep gradients promote rapid surface runoff during rainfall events, while vegetation is derived mainly from lowland rainforest. However, agricultural expansion and settlement activities around Idanre town have led to deforestation and soil exposure. The area receives 1,500–2,000 mm of annual rainfall, with peaks in June and July, and again in September [23]. Gullies in this area are typically smaller but steep-sided [24], reflecting the influence of slope-driven hydrology.

According to the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification, the soils of the Idanre Hills are predominantly Leptosols and Regosols, occurring on the steep, rocky hill slopes and summits where soil depth is minimal and the parent material is exposed granite. On the lower pediments and valley footslopes, Cambisols and Acrisols are common, representing weakly developed to moderately weathered profiles formed under humid tropical conditions. Surrounding lowlands and inter-hill depressions host deeper, well-structured Ferralsols and Nitisols, characterised by strong aggregation, reddish colouration, and low base saturation typical of intensely weathered tropical soils. This spatial variation reflects the close interaction between topography, lithology, and degree of weathering across the Idanre landscape.

### 2.1.3 Бассейн рек Огун-Ошун

Бассейн Огун-Ошун охватывает части штатов Огун, Осун и Ойо (Рис. 3), занимая площадь около 75 000 км<sup>2</sup> между 6°30' и 8°45' с. ш. и 3°00' и -5°30' в. д.. Это крупная речная система, впадающая в Лагосскую лагуну через реки Огун и Ошун [25]. Геология меняется от пород фундаментного комплекса на севере к осадочным формациям на юге, что приводит к почвам от ферраллитных тропических до песчаных аллювиальных [26]. Количество осадков варьирует от 1200 мм на севере до почти 2000 мм на юге [27]. Тем не менее, бассейн находится в той же влажной тропической зоне, что и другие участки. Землепользование доминирует сельскохозяйственное, хотя урбанизация вокруг Ибадана, Абеокуты и Ошогбо усилила эрозию [28], при этом овраги часто наблюдаются вдоль дорожной сети и окраин поселений.

Согласно классификации Всемирной реферативной базы почвенных ресурсов (WRB), в бассейне реки Огун-Осун на возвышенностях и склонах средней крутизны наблюдается мозаичное распространение ферральсолей, нитисолей, акрисолов и ликсисолов. Эти почвы сформировались на глубоко выветрелых железистых материнских породах. Для указанных почв типичны красноватая или желтовато-красная окраска, хорошая водопроницаемость и низкие запасы питательных веществ, что является следствием длительного тропического выветривания. В южной части бассейна и на аллювиальных участках преобладают

флювисоли и глейсоли. Они приурочены к современным аллювиальным отложениям и гидроморфным ландшафтам в поймах и речных долинах. Локально, в пределах осадочных зон, также встречаются слаборазвитые песчаные ареносоли и регосоли. Такое сочетание сильно выветрелых почв возвышенностей и гидроморфных почв низменностей обуславливает неоднородность эрозионных процессов в бассейне и определяет различия в пригодности земель для хозяйственного использования в пределах его физико-географических зон.

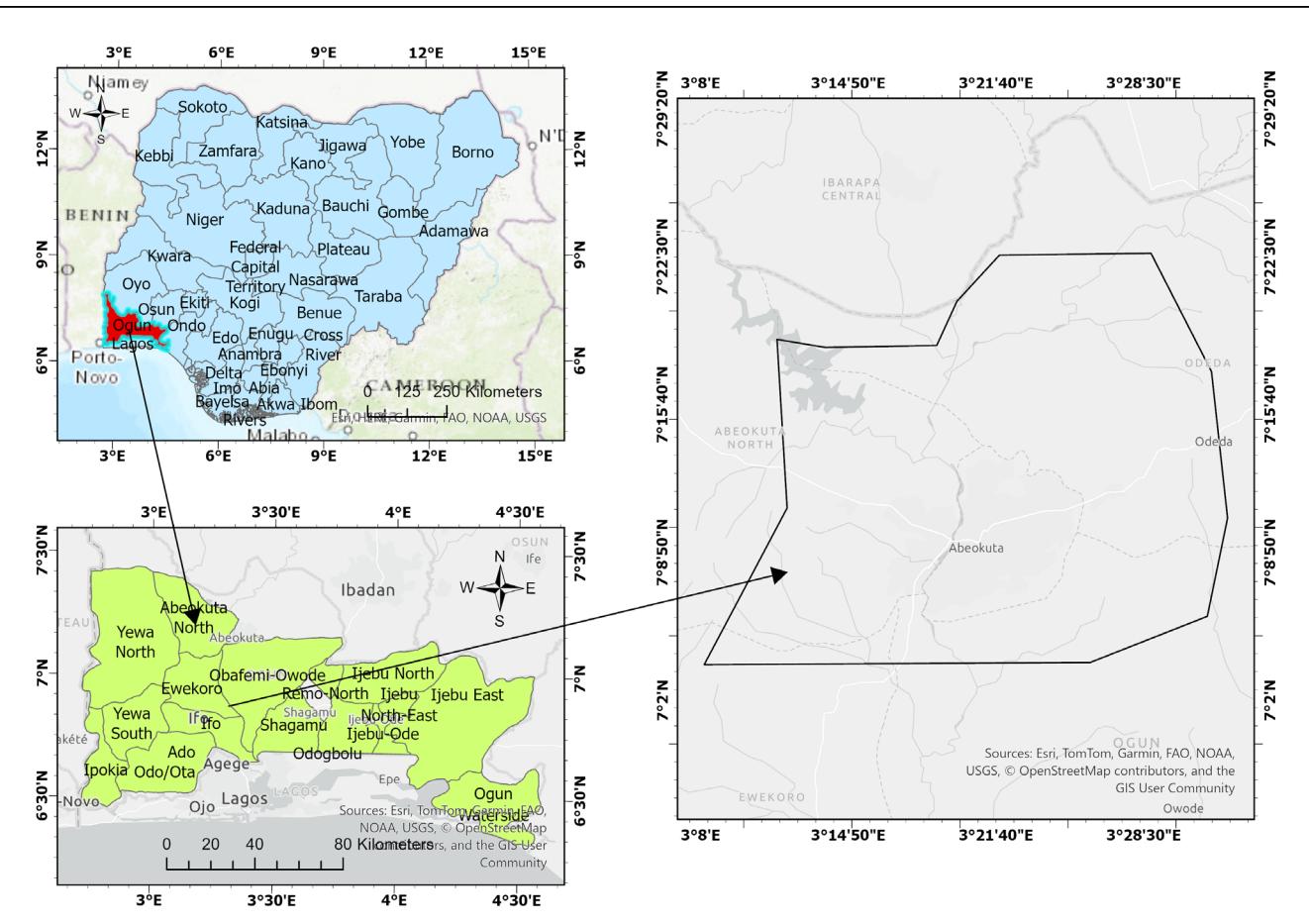
#### 2.1.3. Ogun-Osun River Basin

The Ogun-Osun Basin spans parts of Ogun, Osun, and Oyo States (Fig. 3), covering an estimated 75,000 km<sup>2</sup> between 6°30'N-8°45'N and 3°00'E-5°30'E. It is a major fluvial system draining into the Lagos Lagoon via the Ogun and Osun Rivers [25]. The geology transitions from basement complex rocks in the north to sedimentary formations in the south, resulting in soils that range from ferruginous tropical soils to sandy alluvium [26]. Rainfall varies from 1,200 mm in the north to nearly 2,000 mm in the south [27]. However, the basin falls within the same humid tropical zone as the other sites. Land use is primarily dominated by agriculture, although urbanisation around Ibadan, Abeokuta, and Oshogbo has intensified erosion [28], with gullies commonly observed along road networks and settlement fringes.

According to the World Reference Base for Soil Resources (WRB) classification, the Ogun-Osun River Basin exhibits a mosaic of Ferralsols, Nitisols, Acrisols, and Lixisols across the upland and mid-slope landscapes, underlain by deeply weathered, ferruginous parent materials. These soils are typically red to yellowish-red, well-drained, and low in nutrient reserves, reflecting the prolonged tropical weathering that has occurred over time. In the southern and alluvial portions of the basin, Fluvisols and Gleysols are dominant, corresponding to recent alluvial deposits and hydromorphic environments along the floodplains and river valleys. Sandy and weakly developed Arenosols and Regosols also occur locally within the sedimentary zones. This combination of highly weathered upland soils and hydromorphic lowland soils shapes the basin's variable erosion dynamics and influences land-use suitability across its physiographic zones.

## 2.2. Дизайн исследования

Для изучения того, как свойства почвы влияют на овражную эрозию в условиях однородного режима осадков, был использован сравнительный многосекционный геопространственный дизайн исследования. Вниманием, сосредоточенным на трех локациях в одной климатической зоне было обеспечено отсутствие влияния осадков как мешающего фактора, что позволило исследовать свойства почв в качестве ключевого



**Рис. 3: Карта расположения бассейна рек Огун-Ошун.**  
**Fig. 3 Location map of the Ogun-Osun River Basin.**

детерминанта вариаций в динамике оврагов. Принятый подход объединял дистанционное зондирование, ГИС и статистический анализ, что позволило охватить как временные изменения, так и пространственные закономерности в развитии оврагов и их взаимосвязь с почвенными характеристиками.

## 2.2. Research Design

A comparative, multi-site geospatial research design was employed to examine how soil properties influence gully erosion under uniform rainfall conditions. By focusing on three locations within the same climatic zone, it was ensured that rainfall would not be a confounding factor, allowing soils to be investigated as the key determinant of variation in gully dynamics. The adopted approach combined remote sensing, GIS, and statistical analysis within a single framework, enabling the capture of both temporal changes and spatial patterns in gully development, as well as their relationship with soil characteristics.

## 2.3. Источники данных

Были использованы множественные наборы данных, представляющие взаимодополняющие сведения о динамике оврагов, свойствах почв и пространственных границах. Ключевые наборы данных, использованные в этом исследовании, суммированы в Таблице 1.

## 2.3 Data Sources

Multiple datasets were utilised that provided complementary information on gully dynamics, soil properties, and spatial reference boundaries. The key datasets used in this study are summarised in Table 1.

## 2.4. Предварительная обработка данных

Для подготовки наборов данных к анализу был выполнен ряд шагов предобработки для обеспечения пространственной согласованности и сопоставимости по трем исследуемым участкам. Эти шаги суммированы в Таблице 2. Благодаря этим шагам было обеспечено, что все наборы данных пространственно совмещены, имеют единое разрешение и адаптированы к району исследований. Полученные почвенные индексы и параметры оврагов легли в основу последующего статистического анализа взаимосвязей между почвой и оврагами.

Табл. 1. Table 1.

**Сводка по наборам данных, использованным в исследовании.**  
*Summary of datasets used in the study*

Тип данных <i>Data type</i>	Источник / платформа <i>Source / Platform</i>	Переменные / описание <i>Variables / Description</i>	Временной охват <i>Temporal coverage</i>	Пространственное разрешение / Глубина <i>Spatial resolution / Depth</i>	Назначение в исследовании <i>Purpose in the study</i>
Об оврагах <i>Gully data</i>	Google Earth Pro	Оцифрованные контуры оврагов <i>Digitised gully polygons</i>	2000–2025	Съёмка высокого разрешения <i>High-resolution imaging</i>	Картографирование и количественная оценка динамики овражной эрозии <i>Mapping and quantifying gully dynamics</i>
О почвах <i>Soil data</i>	SoilGrids v. 2.0 (ISRIC)	Песок, ил, глина, органический углерод почвы (SOC), объёмная масса <i>Sand, silt, clay, soil organic carbon (SOC), and bulk density</i>	Статичные данные <i>Static</i>	0–30 см <i>0–30cm</i>	Характеристика свойств почв <i>Characterisation of soil properties</i>
Вспомогательные <i>Supporting data</i>	Административные границы <i>Administrative boundaries</i>	Национальные/государственные векторные слои <i>National/state vector layers</i>	Статичные данные <i>Static</i>	Векторные данные (масштаб 1:50 000) <i>Vector (scale 1:50,000)</i>	Определение границ исследуемой территории и картографический контекст <i>Defining study area boundaries and mapping context</i>

#### 2.4 Data Preprocessing

To prepare the datasets for analysis, a series of preprocessing steps was carried out to ensure spatial consistency and comparability across the three study sites. These steps are summarised in Table 2. Through these steps, it was ensured that all datasets were spatially aligned, at a uniform resolution, and tailored to the study area. The derived soil indices and gully metrics provided the basis for subsequent statistical analysis of the relationships between soil and gully.

#### 2.5. Сопряжение данных о почвах и оврагах

Интеграция почвенных данных и сведений об оврагах выполнялась в среде Google Earth Engine (GEE). Это позволило обеспечить точное пространственное согласование данных и эффективно извлечь характеристики почв. В GEE были загружены оцифрованные полигоны оврагов (полученные в Google Earth Pro) для трёх исследуемых участков — плато Абуджа, бассейна Огун-Ошун и холмов Иданре, набор данных SoilGrids v2.0 (глубина 0–30 см). Из почвенных данных были извлечены следующие показатели: объемная плотность почвы, катионообменная способность (СЕС), содержание глины, содержание песка, соотношение песок/глина, содержание почвенного органического углерода (SOC).

Для каждого полигона оврага была создана буферная зона шириной 50 м. Это позволило охватить прилегающую почвенную зону, оказывающую влияние на зарождение и развитие оврагов. В пределах каждой буферной зоны в GEE рассчитаны зональные статистики — средние значения почвенных показателей. Затем данные экспортаны в виде CSV-файлов, отдельных для каждого исследуемого участка [14, 29]. Полученные табличные наборы данных послужили основой для последующего моделирования. Такой подход обеспечил: пространственное согласование установленных связей между свойствами почв и развитием оврагов и эффективную обработку данных SoilGrids высокого разрешения за счёт облачных вычислительных возможностей GEE [30, 31].

Данные о свойствах почв были получены из глобальной растровой базы данных SoilGrids v2.0 [17], которая предоставляет непрерывные карты ключевых почвенных характеристик с пространственным разрешением 250 м для шести стандартных интервалов глубины: 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 и 100–200 см — в соответствии со спецификациями GlobalSoilMap [32]. База SoilGrids создана Международным центром почвенной информации и референции (ISRIC) с применением моделей машинного обучения. Эти модели обучены на массиве, включающем свыше 240 000 описаний почвенных профилей, с учётом экологических кова-

**Основные этапы предобработки данных**  
*Summary of data preprocessing steps*

Набор данных Dataset	Этап предобработки <i>Preprocessing step</i>	Цель <i>Purpose</i>	Используемая система координат <i>CRS Used</i>
Все пространственные данные <i>All spatial data</i>	Перепроектирование в зону UTM (соответствующую территории Нигерии) <i>Projected to UTM Zone (appropriate for Nigeria)</i>	Обеспечение единой системы координат для всех данных <i>Ensuring a consistent coordinate system</i>	WGS 84 / UTM Zone 32N (EPSG: 32632)
Слои SoilGrids <i>SoilGrids layers</i>	Передискретизация до разрешения 30 м; обрезка по границам исследуемой территории; расчёты производных индексов (соотношения песок/глина, ил/глина) <i>Resampled to 30 m resolution; clipped to study area; derived indices (sand/clay, silt/clay ratios)</i>	Приведение к единому пространственному разрешению; вычисление показателей эродируемости почв <i>Harmonising resolution and computing soil erodibility indicators</i>	WGS 84 / UTM Zone 32N (EPSG: 32632)
Данные об оврагах <i>Gully data</i>	Оцифровка полигонов в Google Earth Pro; расчёты метрик в ArcGIS Pro (площадь, длина, годовые темпы роста) <i>Digitised polygons from Google Earth Pro; converted to metrics (area, length, annual growth rates) in ArcGIS Pro</i>	Формирование показателей овражной эрозии для временного анализа <i>Generate gully erosion indicators for temporal analysis</i>	WGS 84 / UTM Zone 32N (EPSG: 32632)

риатов – данных о климате, рельефе и материалах дистанционного зондирования. Для описания состояния поверхности слоя почв, значимого при моделировании эрозии и деградации земель, почвенные параметры были агрегированы в композитный слой 0–30 см. Агрегация выполнена путём расчёта средневзвешенного по глубине значения для первых трёх слоёв SoilGrids (0–5, 5–15 и 15–30 см) по формуле:

$$X_{0-30} = \frac{5X_{0-5} + 10X_{5-15} + 15X_{15-30}}{30}$$

где:  $X_{0-30}$  – значение показателя (содержание песка, пыли, глины или органического углерода) для слоя 0–30 см.

Данный подход соответствует рекомендациям GlobalSoilMap по агрегации данных и гарантирует, что полученный слой адекватно отражает взвешенный вклад каждого интервала глубины в пределах верхнего почвенного горизонта.

## 2.5. Linking Soil and Gully Data

The integration of soil and gully data was performed in the Google Earth Engine (GEE) environment to ensure consistent spatial alignment and efficient extraction of soil attributes. Digitised gully polygons (from Google Earth Pro) for the three study sites — Abuja Plateau, Ogun-Oshun Basin, and Idanre Hills — were uploaded to GEE alongside the SoilGrids v2.0 dataset (0–30 cm

depth). The relevant soil variables extracted included bulk density, cation exchange capacity (CEC), clay content, sand content, sand-to-clay ratio, and soil organic carbon (SOC).

A 50 m buffer was applied around each gully polygon to capture the immediate soil zone influencing gully initiation and expansion. Within each buffered area, zonal statistics were computed in GEE to extract mean soil values, which were subsequently exported as site-specific CSV files (one per study area) [29, 14]. These tabular datasets formed the analytical foundation for subsequent modelling. This approach ensured that soil-gully linkages were derived in a spatially consistent manner, while leveraging GEE's cloud-based processing capabilities to handle high-resolution SoilGrids data efficiently [30,31].

Soil property data were obtained from the SoilGrids v2.0 global gridded database [17], which provides continuous maps of key soil attributes at 250 m spatial resolution for six standard depth intervals (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100, and 100–200 cm) following the GlobalSoilMap specifications [32]. SoilGrids is produced by the International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) using machine-learning models trained on over 240,000 soil profile observations combined with environmental covariates such as climate, terrain, and remote sensing data.

To represent surface soil conditions relevant for erosion and land degradation modelling, soil parameters were ag-

gregated to a 0–30 cm composite layer by computing a depth-weighted average of the first three SoilGrids layers (0–5, 5–15, and 15–30 cm) using the formula:

$$X_{0-30} = \frac{5X_{0-5} + 10X_{5-15} + 15X_{15-30}}{30}$$

where  $X_{0-30}$  represents the property value (sand, silt, clay, or organic carbon) for the 0–30 cm layer.

This approach adheres to the GlobalSoilMap aggregation guideline, ensuring that the derived layer accurately reflects the weighted contribution of each depth interval within the upper soil horizon.

## 2.6. Анализ данных

CSV-файлы, полученные в Google Earth Engine (GEE), были после извлечения импортированы в Google Colab для статистического анализа и машинного обучения с использованием языка Python и следующих библиотек: *pandas*, *scikit-learn*, *NumPy* и *Matplotlib*. Для каждого исследуемого участка отдельно применялся алгоритм классификации «случайный лес» (*Random Forest*, RF). Целью было смоделировать наличие (1) или отсутствие (0) оврагов как функцию шести почвенных переменных, извлечённых из базы SoilGrids. Оценка качества модели выполнялась методом пятикратной перекрёстной проверки (*five-fold cross-validation*). Эффективность модели оценивалась по следующим метрикам: точность (*accuracy*), прецизионность (*precision*), полнота (*recall*), F1-мера (*F1-score*), площадь под кривой ошибок приёмника (*area under the receiver operating characteristic curve*, AUC).

Из каждой обученной модели были извлечены показатели важности переменных. Это позволило количественно оценить относительный вклад отдельных почвенных параметров в предрасположенность к оврагообразованию. Кроме того были выполнены: описательная статистика и сравнительный анализ по участкам для оценки вариабельности и неопределенности взаимосвязей «почва–овраг» [14, 17]. Алгоритм RF был выбран по следующим причинам: устойчивость к мультиколлинеарности, способность выявлять нелинейные зависимости между свойствами почв и эрозией, доказанная эффективность при картографировании экологической предрасположенности [33, 18]. Совместная работа в средах GEE и Colab позволила создать воспроизводимую и масштабируемую методологическую схему. Она обеспечивает установление связей между свойствами почв и возникновением оврагов в условиях однородного режима осадков. Наконец, были проведены межплощадочные сравнения взаимосвязей «овраг–почва». Это позволило: выявить различия между тремя исследуемыми участками и их общие черты и оценить, как почвенные характеристики обуславливают динамику овражной эрозии при однородном режиме осадков.

## 2.6. Data Analysis

After extraction, the CSV files from GEE were imported into Google Colab for statistical and machine learning analysis using Python (*pandas*, *scikit-learn*, *NumPy*, and *Matplotlib* libraries). The Random Forest (RF) classification algorithm was applied separately for each site to model the presence (1) and absence (0) of gullies as a function of the six SoilGrids-derived soil variables. Model evaluation was conducted using a five-fold cross-validation approach, with performance assessed through accuracy, precision, recall, F1-score, and the area under the receiver operating characteristic curve (AUC).

Variable importance scores were extracted from each trained model to quantify the relative contribution of individual soil parameters to gully susceptibility. Descriptive statistics and site-level comparisons were also undertaken to assess variability and uncertainty in soil-gully relationships [14, 17]. The RF approach was selected for its robustness to multicollinearity, capacity to capture nonlinear soil-erosion relationships, and proven suitability for environmental susceptibility mapping [33, 18]. Together, the GEE-Colab workflow provided a reproducible and scalable framework for linking soil properties to gully occurrence under uniform rainfall conditions. Finally, cross-site comparisons of gully-soil relationships were conducted to highlight differences and commonalities across the three study areas, thereby assessing how soils condition gully erosion dynamics under uniform rainfall regimes.

## 3. Результаты

### 3.1. Динамика овражной эрозии в период с 2000 по 2025 год

Для выполнения первой задачи на всех трёх исследуемых участках были картографированы овраги в 2000 и 2025 годы. Затем количественно оценены следующие показатели: число оврагов, общая площадь оврагов, средняя площадь одного оврага, максимальная площадь отдельного оврага. Результаты демонстрируют выраженное увеличение как площади, так и количества оврагов за 25-летний период (табл. 3). Сопоставительный анализ данных из табл. 3 и 4 выявил устойчивую и тревожную тенденцию: на всех трёх участках за период с 2000 по 2025 год выросло число оврагов и увеличилась их суммарная площадь. Наиболее значительные изменения зафиксированы в бассейне Огун-Ошун: число оврагов возросло более чем в два раза (с 58 до 129), общая площадь оврагов увеличилась на 5,36 км<sup>2</sup>, прирост составил свыше 614 %, среднегодовые темпы расширения – 0,21 км<sup>2</sup>/год. На плато Абуджа также отмечен существенный рост оврагообразования: общая площадь увеличилась с 0,83 до 5,19 км<sup>2</sup>, прирост составил 523%, среднегодовые темпы расширения – 0,17 км<sup>2</sup>/год. Холмы Иданре, несмотря на наименьшую общую площадь оврагов (с 0,004 до 0,019 км<sup>2</sup>), проде-

монстрировали значительный прирост в 418%. Это свидетельствует о том, что даже слабо урбанизированные ландшафты не застрахованы от нарастающей активности оврагообразования.

### 3. Results

#### 3.1 Gully Erosion Dynamics between 2000 and 2025

To address the first objective, gullies were mapped for the years 2000 and 2025 across the three study sites, and their number, total area, mean area, and maximum area were quantified. The results reveal a pronounced increase in both the extent and number of gullies over the 25 years (Table 3). The comparative analysis from Tables 3 and 4 shows a consistent and alarming increase in both the number and the areal extent of gullies across all three study areas between 2000 and 2025.

The gully density values further emphasise the intensity of landscape degradation, with the Ogun Osun Basin and Abuja showing the highest densities in 2025, reflecting the influence of urban expansion, vegetation loss, and poor land management practices. The growth factors derived from Table 4 (ranging from 5× in Idanre to over 7× in Ogun Osun Basin) demonstrate how rapidly gully systems have evolved over the past 25 years. The spatial distribution of gullies for both years is visualised in Fig. 4.

Показатели плотности оврагов дополнительно подчёркивают интенсивность деградации ландшафтов. В 2025 году наибольшая плотность зафиксирована: в бассейне Огун-Ошун (0,53%) и на плато Абуджа (0,78%). Такие значения отражают влияние следующих факторов: расширение городских территорий, сокращение растительного покрова, неэффективное землепользование. Коэффициенты роста, рассчитанные на основе данных табл. 4 (от 5 раз для Иданре до более чем 7 раз для бассейна Огун-Ошун), наглядно демонстрируют, насколько стремительно развивались овражные системы за последние 25 лет. Пространственное распределение оврагов за оба временных среза представлено на рис. 4.

The gully density values further emphasise the intensity of landscape degradation, with the Ogun Osun Basin and Abuja showing the highest densities in 2025, reflecting the influence of urban expansion, vegetation loss, and poor land management practices. The growth factors derived from Table 4 (ranging from ×5 in Idanre to over ×7 in Ogun Osun Basin) demonstrate how rapidly gully systems have evolved over the past 25 years. The spatial distribution of gullies for both years is visualised in Fig. 4.

#### 3.2. Обзор характеристик почв на трёх исследуемых участках

На рис. 5 представлены сводные данные о физико-химических свойствах почв на трёх участках ис-

следования: на плато Абуджа, в бассейне Огун-Ошун и на холмах Иданре. Анализировались следующие показатели: объемная плотность почвы, катионообменная способность (СЕС), содержание глинистой и песчаной фракций, соотношение песок/глина, содержание почвенного органического углерода (SOC). Эти параметры отражают физическое и химическое состояние почв, а также их потенциальную связь с процессом оврагообразования.

Можно отметить следующие особенности: почвы бассейна Огун-Ошун характеризуются повышенным содержанием песка и плотностью сложения, почвы холмов Иданре отличаются более тонким гранулометрическим составом и высоким содержанием органического углерода. Пространственная изменчивость почвенных характеристик создаёт важную основу для интерпретации последующих результатов анализа методом «случайного леса» (раздел 3.3). В нём исследуются прогностические связи между указанными почвенными параметрами и наличием оврагов.

#### 3.2. Overview of Soil Characteristics across the three Study Sites

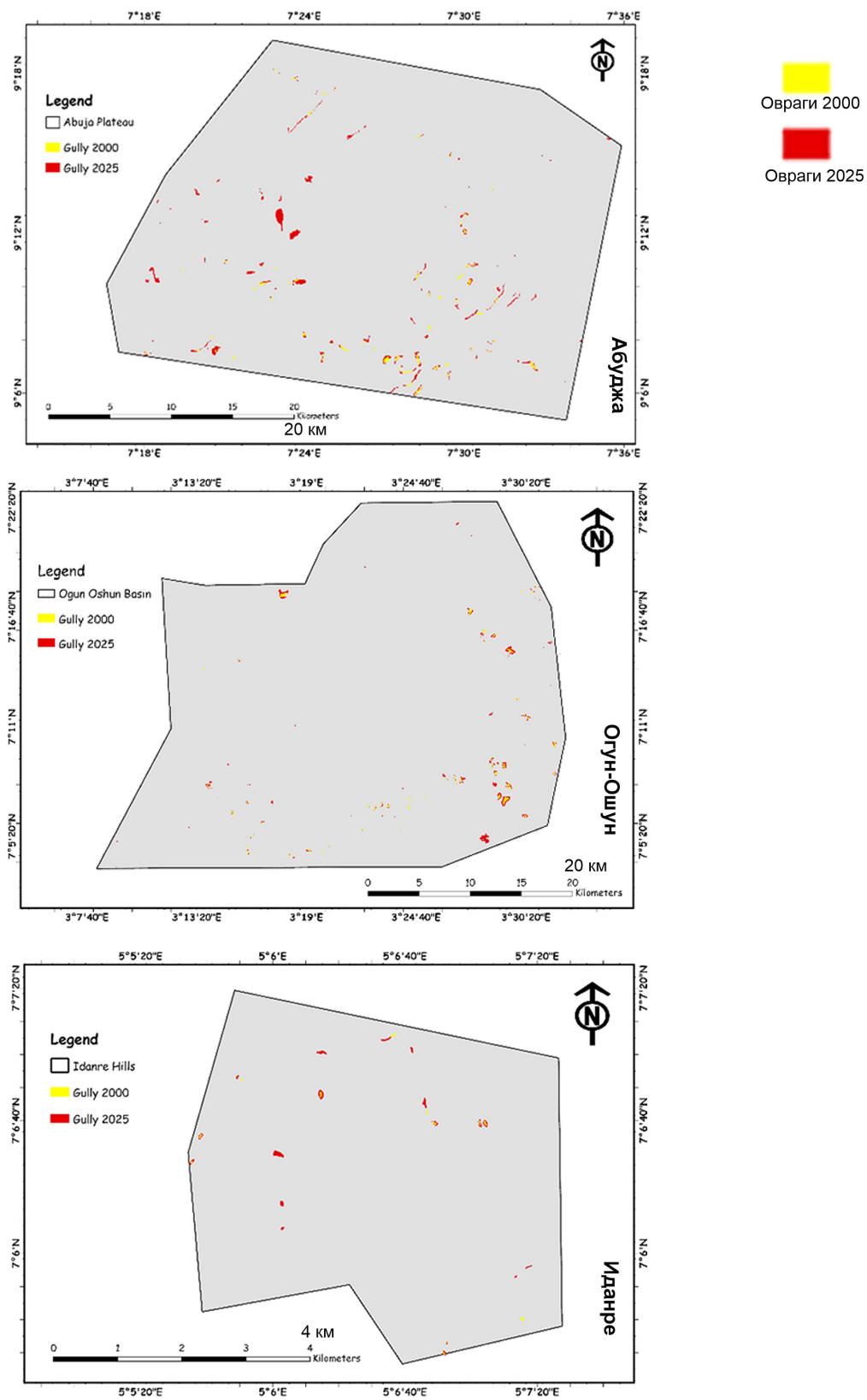
The descriptive summary of soil physicochemical properties across the three study sites, Abuja Plateau, Ogun-Oshun Basin, and Idanre Hills, is presented in Fig. 5. The analysed variables include bulk density, cation exchange capacity (CEC), clay and sand fractions, sand/clay ratio, and soil organic carbon (SOC). These indicators reflect the physical and chemical status of soils and their potential relationship to gully formation.

Soils of the Ogun-Oshun Basin are characterised by higher sand content and bulk density, while those of the Idanre Hills exhibit finer texture and greater organic carbon. These spatial variations in soil characteristics provide a crucial foundation for interpreting the subsequent Random Forest analysis (Section 3.3), which examines the predictive relationships between these soil parameters and the presence of gullies.

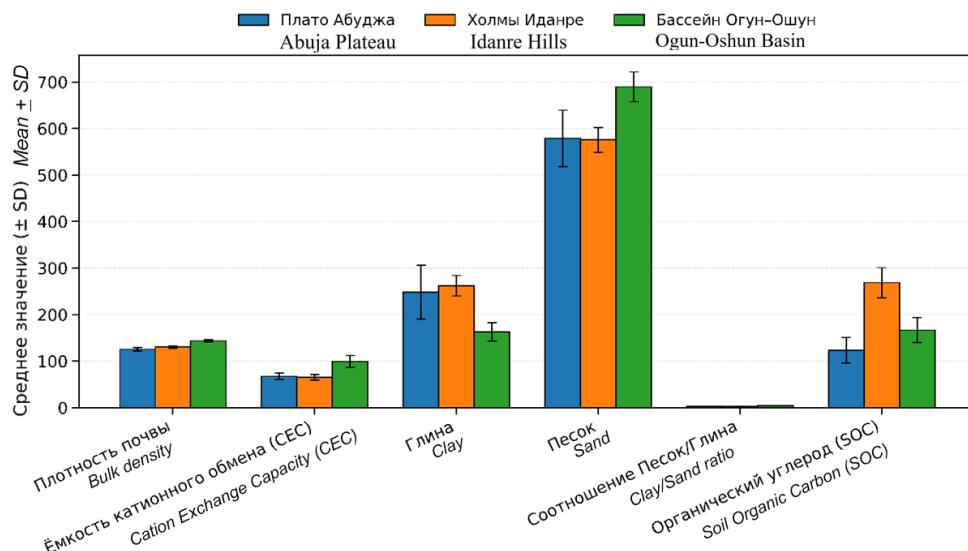
#### 3.3. Классификация методом «случайного леса» наличия оврагов в зависимости от почвенных атрибутов

Для каждого исследуемого участка отдельно были построены модели «случайного леса» (Random Forest, RF) с целью оценить прогностическую силу почвенных переменных при объяснении факта наличия оврагов. Обобщённые показатели важности признаков и статистические характеристики качества моделей представлены на рисунках 6 и 7.

В всех локациях ключевыми предикторами наличия оврагов выступили показатели гранулометрического состава почв — в первую очередь содержание песка, содержание глины и соотношение песок/



**Рис. 4.** Карты оврагов для каждого участка, показывающие оцифрованные овраги 2000 и 2025 годов  
**Fig. 4.** Gully maps for each site showing the Digitised 2000 and 2025 Gullies



**Рис. 5.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая (среднее  $\pm$  стандартное отклонение) свойства почв (0-30 см) на трех участках исследования.

**Fig. 5.** Grouped Bar chart showing the (mean  $\pm$  SD) of soil properties (0-30 cm) across the three study sites.

глина. Совместно эти переменные обеспечили наивысшие значения относительной важности (в диапазоне от 0,15 до 0,27). Это свидетельствует о том, что баланс между крупно- и мелкофракционными компонентами существенно регулирует эродируемость почв. Почвенный органический углерод (SOC) также продемонстрировал значимый вклад на участках плато Абуджа и бассейна Огун-Ошун (0,17–0,20). Это позволяет предположить, что повышенные уровни SOC способны: усиливать агрегатную устойчивость почв, снижать риск зарождения оврагов. В то же время объемная плотность почвы и катионообменная способность (CEC) оказались сравнительно менее значимыми. Это указывает на то, что структурные и химические свойства почв играют скорее опосредованную роль в регулировании процессов оврагообразования.

### 3.3. Random Forest Classification of Gully Presence in relation to Soil Attributes

The Random Forest (RF) models were developed separately for each study site to evaluate the predictive strength of soil variables in explaining gully occurrence. The overall feature importance and model performance statistics are presented in Figs. 6 and 7.

Across all locations, soil texture variables, particularly sand, clay, and the sand/clay ratio, emerged as the dominant predictors of gully presence. These variables jointly accounted for the highest relative importance values (ranging from 0.15 to 0.27), indicating that the balance between coarse and fine fractions strongly regulates soil erodibility. Soil organic carbon (SOC) also contributed meaningfully at the Abuja Plateau and Ogun-Oshun Basin

sites (0.17–0.20), suggesting that higher SOC levels may enhance aggregate stability and reduce the risk of gully initiation. In contrast, bulk density and cation exchange capacity (CEC) were of comparatively lower importance, implying that structural and chemical soil attributes play more indirect roles in controlling gully processes.

Показатели качества модели дополнительно демонстрируют межплощадочную изменчивость. На участках плато Абуджа и бассейна Огун-Ошун достигнуты умеренные и высокие значения прогностической точности (0,65–0,78) и F<sub>i</sub>-меры (0,74–0,81). Это свидетельствует о надёжной дифференцирующей способности модели при разделении участков с оврагами и без них. В отличие от них, модель для холмов Иданре показала ограниченную прогностическую способность. Основной причиной стали малый размер обучающей выборки, низкая вариабельность почвенных предикторов. Относительно высокие значения AUC на всех участках (0,62–0,80) указывают на приемлемую обобщающую способность моделей и устойчивость пороговых значений классификации.

В целом полученные результаты подтверждают, что гранулометрический состав почв и содержание органического вещества – ключевые факторы, определяющие возникновение оврагов при однородном режиме осадков. Результаты моделирования методом «случайного леса» подтверждают гипотезу: почвы с более грубым гранулометрическим составом при низком содержании SOC демонстрируют повышенную предрасположенность к размыву и развитию оврагов. Согласованность результатов по всем участкам позволяет сделать вывод: состав почв играет первостепенную роль в динамике овражной эрозии. Это соответствует

Табл. 3. Table 3

**Сводка по оврагам на уровне участков (2000 год в сравнении с 2025 годом)**  
**Site-level gully summary (2000 vs 2025)**

Участок <i>Site</i>	Год <i>Year</i>	Число оврагов <i>No. of gullies</i>	Общая площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Total area (km<sup>2</sup>)</i>	Средняя площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Mean area (km<sup>2</sup>)</i>	Максимальная площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Max area (km<sup>2</sup>)</i>	Плотность оврагов (% площади участка) <i>Gully density (% of site area)</i>
Абуджа <i>Abuja</i>	2000	64	0,833	0,013	0,058	0,12
	2025	106	5,187	0,0489	0,479	0,78
Огун-Ошун <i>Ogun-Oshun</i>	2000	58	0,872	0,015	0,117	0,07
	2025	129	6,234	0,0483	0,437	0,53
Иданре <i>Idanre</i>	2000	12	0,004	0,0003	0,001	0,04
	2025	18	0,019	0,001	0,003	0,20

Табл. 4. Table 4

**Показатели изменения овражной сети в период с 2000 по 2025 год**  
**Gully change metrics between 2000 and 2025**

Участок <i>Site</i>	Увеличение <i>Increment</i>				Годовые темпы расширения (км <sup>2</sup> /год) <i>Annual expansion (km<sup>2</sup>/ year)</i>	Прирост общей площади оврагов (%) <i>% change in total gully area</i>	Коэффициент роста площади оврагов (×) <i>Gully area growth factor (×)</i>
	Число оврагов <i>No. of gullies</i>	Общая площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Total area (km<sup>2</sup>)</i>	Средняя площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Mean area (km<sup>2</sup>)</i>	Максимальная площадь (км <sup>2</sup> ) <i>Max area (km<sup>2</sup>)</i>			
Абуджа <i>Abuja</i>	42	4,3541	0,0359	0,4208	0,1742	522,7539	6,2275
Огун-Ошун <i>Ogun-Oshun</i>	71	5,362	0,0333	0,32	0,2145	614,6058	7,1461
Иданре <i>Idanre</i>	6	0,0151	0,0007	0,0027	0,0006	418,3472	5,1835

поставленной цели – установить связь между почвенными характеристиками и пространственными паттернами предрасположенности к оврагообразованию.

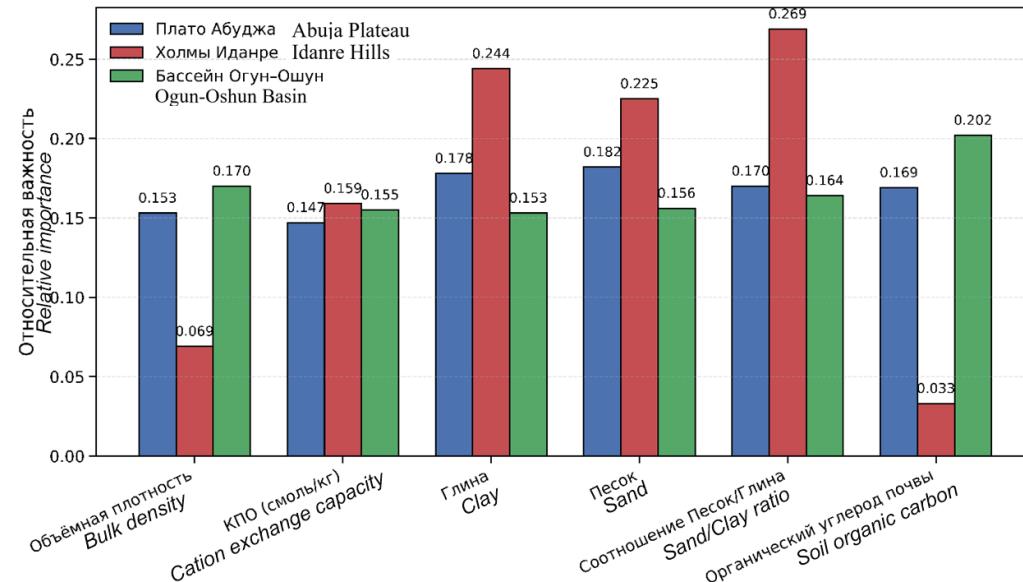
Model performance metrics further highlight site-specific variability. The Abuja Plateau and Ogun-Oshun Basin sites achieved moderate to strong predictive accuracies (0.65–0.78) and F1-scores (0.74–0.81), demonstrating robust discrimination between gully and non-gully conditions. In contrast, the Idanre Hills model yielded limited predictive power, mainly due to a small training sample size and low variability in soil predictors. The relatively higher AUC values across sites (0.62–0.80) indicate acceptable model generalisation and stable classification thresholds.

Overall, these results confirm that soil texture and organic matter properties are key determinants of gully occurrence under a uniform rainfall regime. The RF outcomes support the hypothesis that coarser-textured soils, when combined with low SOC content, exhibit a higher susceptibility to detachment and gully development. This cross-site consistency supports the inference that soil composition exerts a first-order control on gully erosion dynamics, fulfilling the objective of linking soil variables to gully susceptibility patterns.

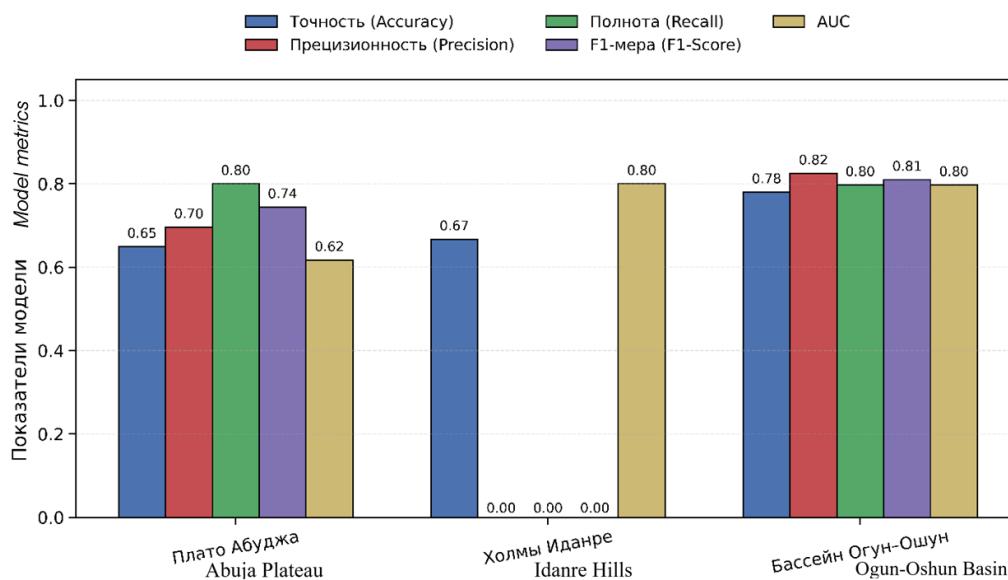
#### 3.4. Анализ пространственной изменчивости и неопределённости

Пространственная изменчивость почвенных свойств на трёх исследуемых участках (Рис. 8) выявляет отчётливые эдафические контрасты, которые лежат в основе наблюдаемой динамики оврагообразования. Плотность сложения почвы демонстрировала следующий градиент: максимальная – в бассейне Огун-Ошун:  $143,52 \pm 2,50$  г см<sup>-3</sup>, умеренная – на холмах Иданре:  $130,20 \pm 2,67$  г см<sup>-3</sup>, минимальная – на плато Абуджа:  $125,31 \pm 3,63$  г см<sup>-3</sup>. Такой градиент уплотнения может ограничивать инфильтрацию влаги в низменной части бассейна. Катионообменная способность (СЕС) варьировала от  $65,16 \pm 5,76$  сммоль кг<sup>-1</sup> (холмы Иданре) до  $99,28 \pm 12,69$  сммоль кг<sup>-1</sup> (бассейн Огун-Ошун). Это отражает различия в минералогическом составе и содержании органического вещества.

Содержание глины заметно выше на возвышенных участках ( $262,07 \pm 22,05$  г кг<sup>-1</sup> на холмах Иданре), чем в бассейне ( $162,91 \pm 19,79$  г кг<sup>-1</sup>). Обратная картина наблюдается для содержания песка ( $689,50 \pm 32,17$  г кг<sup>-1</sup> в бассейне). Соотношение песок/глина возрастало вниз по склону: ≈ 2,2 на холмах Иданре, ≈ 4,3 в бассейне Огун-Ошун. Это указывает на преобладание более грубых почв в зонах с повышенной предраспо-



**Рис. 6.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая важность признаков RF на всех областях исследований  
**Fig. 6.** Grouped Bar Chart showing RF Feature Importance across Study Areas



**Рис. 7.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая производительность модели RF по районам исследований.  
**Fig. 7.** Grouped Bar Chart showing RF Model Performance per Study Area

ложенностю к оврагообразованию. Содержание почвенного органического углерода (SOC) отличалось наибольшей относительной изменчивостью (коэффициент вариации > 20 %). Это подтверждает существенную неоднородность органического состояния почв даже при в целом однородном режиме осадков.

Оценка неопределенности на основе модели (Рис. 9) показала умеренную, но пространственно согласованную прогностическую способность. Классификатор «случайный лес» достиг следующих средних

значений точности: плато Абуджа — 0,65 ( $\pm 0,04$ ), холмы Иданре — 0,75 ( $\pm 0,13$ ), бассейн Огун-Ошун — 0,70 ( $\pm 0,03$ ). Значения AUC (0,67–0,75) свидетельствуют о надежной дифференцирующей способности модели при разделении участков, подверженных оврагообразованию, и устойчивых территорий. При этом вариабельность размера выборки по участкам частично влияла на устойчивость оценок. В целом результаты показывают, что пространственная неопределенность преимущественно обусловлена различиями в

гранулометрическом составе и структуре почв, а не систематическими ошибками модели. Это дополнительно подтверждает доминирующую роль почвенного состава в развитии оврагов при однородных климатических условиях.

### 3.4. Spatial Variability and Uncertainty Analysis

The spatial variability of soil properties across the three study sites (Fig.8) highlights clear edaphic contrasts that underpin observed gully dynamics. Bulk density was highest in the Ogun-Oshun Basin ( $143.52 \pm 2.50 \text{ g cm}^{-3}$ ), moderate in Idanre Hills ( $130.20 \pm 2.67 \text{ g cm}^{-3}$ ), and lowest in the Abuja Plateau ( $125.31 \pm 3.63 \text{ g cm}^{-3}$ ), suggesting a gradient of compaction that may restrict infiltration in the lowland basin. Cation exchange capacity (CEC) varied from  $65.16 \pm 5.76 \text{ cmol kg}^{-1}$  in Idanre Hills to  $99.28 \pm 12.69 \text{ cmol kg}^{-1}$  in Ogun-Oshun, reflecting differences in mineralogical composition and organic matter content.

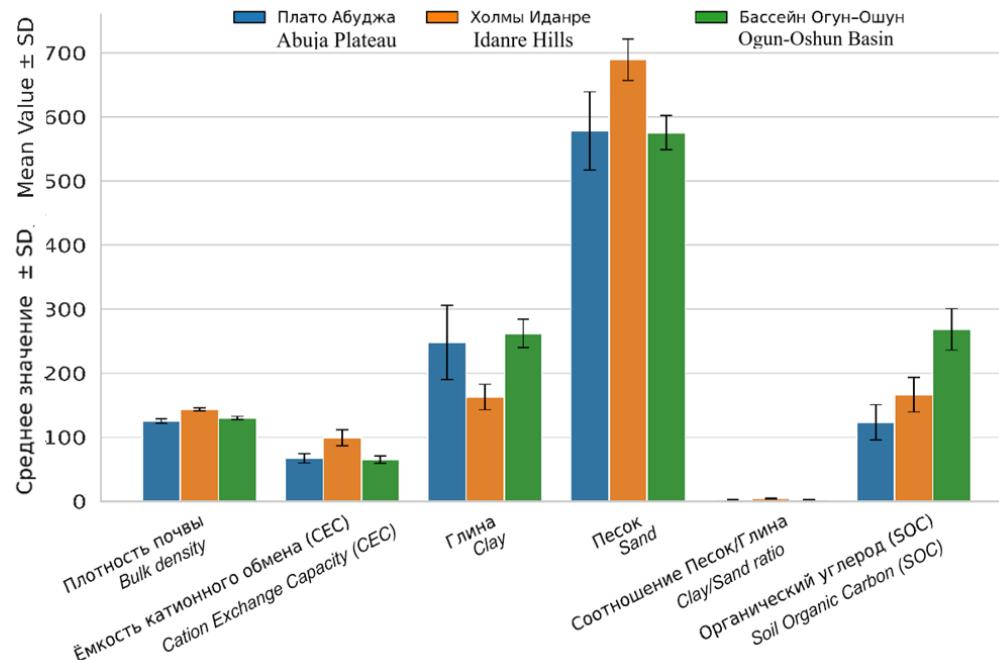
Clay content was notably higher in the upland sites ( $262.07 \pm 22.05 \text{ g kg}^{-1}$  in Idanre Hills) than in the basin ( $162.91 \pm 19.79 \text{ g kg}^{-1}$ ), while sand showed the opposite pattern ( $689.50 \pm 32.17 \text{ g kg}^{-1}$  in the basin). The sand/clay ratio increased downslope, from  $\approx$  approximately 2.2 in the Idanre Hills to  $\approx$  approximately 4.3 in the Ogun-Oshun Basin, implying that coarser soils predominate where gully susceptibility is most significant. SOC exhibited the most considerable relative variation (coefficient of variation

$> 20\%$ ), confirming the substantial heterogeneity in soil organic status even under a broadly uniform rainfall regime.

Model-based uncertainty assessment (Fig.9) revealed moderate but spatially consistent predictive performance. The Random Forest classifier achieved mean accuracies of  $0.65 (\pm 0.04)$  for Abuja Plateau,  $0.75 (\pm 0.13)$  for Idanre Hills, and  $0.70 (\pm 0.03)$  for the Ogun-Oshun Basin. The AUC values (0.67–0.75) indicate reliable discrimination between gully-prone and stable locations, though site-specific variability in sample size partly influenced stability of the estimates. Overall, the results suggest that spatial uncertainty is primarily driven by differences in soil texture and structure, rather than by model bias, reinforcing the dominant influence of soil composition on gully development under uniform climatic conditions.

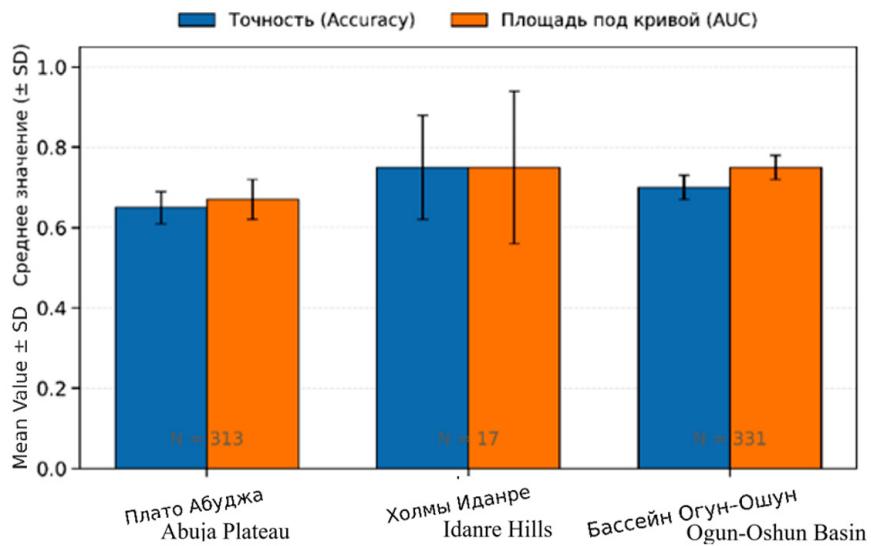
### 3.5. Интегрированная интерпретация почвенно-эрзационных взаимосвязей

Сопоставление результатов разделов 3.1–3.4 выявляет устойчивую и логически согласованную связь между составом почв, морфологией рельефа и динамикой овражной эрозии в условиях относительно однородного климата. Анализ временных изменений (раздел 3.1) показал, что за 25 лет интенсивность оврагообразования резко возросла на всех участках. Наиболее выраженные приросты числа и площади оврагов зафиксированы: в бассейне Огун-Ошун, и на плато Абу-



**Рис. 8.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая изменчивость свойств почв районов исследований.

**Fig. 8.** Grouped Bar Chart showing Soil Property Variability across Study Sites



**Рис. 9.** Сгруппированная столбчатая диаграмма, показывающая неопределенность модели Random Forest районов исследований.

**Fig. 9.** Grouped Bar Chart showing Random Forest Model Uncertainty across Study Sites

джа. В отличие от них, на холмах Иданре расширение овражной сети было относительно умеренным. Это объясняется локальной устойчивостью, обусловленной: спецификой почвенных свойств, и положением в рельефе. При сопоставлении геоморфологических изменений с данными о физико-химических свойствах почв (раздел 3.2) закономерности предрасположенности к оврагообразованию становятся очевиднее. Бассейн Огун-Ошун демонстрирует эталон структурно неустойчивого, быстро эродирующего ландшафта. Его отличительные черты: максимальная плотность сложения ( $143,5 \text{ кг м}^{-3}$ ), грубый гранулометрический состав (содержание песка  $\approx 690 \text{ г кг}^{-1}$ ), высокое соотношение песок/глина ( $\approx 4,3$ ). Холмы Иданре, напротив, характеризуются, более тонким гранулометрическим составом (содержание глины  $\approx 262 \text{ г кг}^{-1}$ ) низким соотношением песок/глина ( $\approx 2,2$ ), повышенным содержанием SOC ( $268,6 \text{ г кг}^{-1}$ ). Эти свойства способствуют: агрегации частиц, инфильтрации влаги, устойчивости склонов. Плато Абуджа занимает промежуточное положение: умеренная плотность сложения и сбалансированный гранулометрический состав обуславливают устойчивый, но менее интенсивный рост оврагов.

Результаты классификации методом «случайного леса» (раздел 3.3) количественно подтверждают эти взаимосвязи. На всех участках ключевыми предикторами наличия оврагов выступили: содержание песка, содержание глины, и соотношение песок/глина. Эти показатели напрямую связаны с эродируемостью и структурной связностью почв. Высокие значения важности признаков ( $0,15\text{--}0,27$ ) подтверждают, что

гранулометрический состав играет первостепенную роль в формировании предрасположенности к оврагам. SOC оказался важным стабилизирующими фактором (важность  $\approx 0,17\text{--}0,20$ ), особенно на плато Абуджа и в бассейне Огун-Ошун. Повышенное содержание органического вещества: улучшает инфильтрацию, и повышает устойчивость к зарождению промоин. Плотность сложения и СЕС оказывали менее прямое влияние, но регулировали механизмы инфильтрации и удержания влаги. Их роль усиливается в условиях уплотнённых или плохо агрегированных почв, где эрозионная активность выше.

Анализ пространственной изменчивости (раздел 3.4) дополнительно подтверждает эту интерпретацию. На участках с грубым гранулометрическим составом зафиксированы более высокие коэффициенты вариации: содержания песка, и содержания SOC. Это указывает на неоднородность предрасположенности материала, которая согласуется с картографированными скоплениями оврагов. Показатели качества модели (точность =  $0,65\text{--}0,78$ ; AUC =  $0,67\text{--}0,80$ ) свидетельствуют, что алгоритм «случайного леса» успешно выявил эдафические закономерности. Наибольшая прогностическая уверенность достигнута там, где гранулометрические контрасты наиболее выражены (бассейн Огун-Ошун и плато Абуджа). Более низкая надёжность модели для холмов Иданре обусловлена малым объёмом выборки, а не концептуальными расхождениями. Это подчёркивает необходимость более плотного полевого опробования на устойчивых возвышенных территориях. В совокупности полученные данные выстраиваются в чёткую механи-

стическую картину: овражная эрозия на юго-западе и в центральной части Нигерии — по сути, почвенно обусловленный процесс. Зоны, где преобладают: грубые, уплотнённые, и низкоорганические (по SOC) почвы, — изначально более уязвимы к врезке концентрированных потоков, особенно при: сокращении растительного покрова; и трансформации земель. Напротив, почвы с высоким содержанием глины и органического вещества противостоят размыву за счёт: повышенной структурной устойчивости, и улучшенной инфильтрации. Взаимодействие этих свойств объясняет как масштабы, так и пространственные закономерности развития оврагов, наблюдаемые в период с 2000 по 2025 г.

Этот комплексный синтез связывает эмпирические данные с последующим обсуждением. Он показывает, что различия в активности оврагов на трёх участках не случайны: они определяются измеримыми почвенными свойствами, которые регулируют гидрологический отклик и механическую прочность материала. В разделе 4 эти результаты будут рассмотрены в более широком контексте геоморфологических, климатических и землестроительных факторов. Будет оценено, как антропогенные воздействия, положение в рельефе и методы почвозащиты могут: модифицировать наблюдаемые траектории эрозии, способствовать созданию региональных карт предрасположенности к оврагам, и формировать стратегии контроля оврагообразования.

### 3.5. Integrated Interpretation of Soil-Gully Relationships

Synthesising the findings across Sections 3.1–3.4 reveals a strong, coherent linkage between soil composition, landform setting, and gully erosion dynamics under a broadly uniform climatic regime. The temporal analysis (Section 3.1) established that gully formation has intensified sharply over the 25 years across all study sites, with the most pronounced increases in gully count and areal extent occurring in the Ogun-Oshun Basin and Abuja Plateau. In contrast, the Idanre Hills exhibited relatively subdued gully expansion, reflecting site-specific resistance rooted in its soil characteristics and landscape position. When these geomorphic changes are evaluated alongside the soil physicochemical summaries (Section 3.2), the patterns of susceptibility become clearer. The Ogun–Oshun Basin, characterised by the highest bulk density ( $143.5 \text{ kg m}^{-3}$ ), coarse texture (sand  $\approx 690 \text{ g kg}^{-1}$ ), and a large sand/clay ratio ( $\approx 4.3$ ), presents the archetype of a structurally fragile, rapidly eroding landscape. In contrast, the Idanre Hills possess finer-textured, more cohesive soils (clay  $\approx 262 \text{ g kg}^{-1}$ ; sand/clay  $\approx 2.2$ ) with higher SOC levels ( $268.6 \text{ g kg}^{-1}$ ), which collectively promote aggregation, infiltration, and slope stability. The Abuja Plateau occupies an intermediate condition, exhibiting both moderate

compaction and moderate textural balance, resulting in steady but less extreme gully growth.

The Random Forest classification results (Section 3.3) provide quantitative evidence in support of these relationships. Across all sites, the dominant predictors of gully occurrence were sand, clay, and the sand-to-clay ratio variables, which are directly linked to soil erodibility and structural cohesion. Their high feature importance (0.15–0.27) confirms that texture exerts a first-order control on susceptibility. SOC followed closely as a stabilising factor, particularly in Abuja and the Ogun-Oshun Basin (importance  $\approx 0.17$ –0.20), where increased organic matter likely improves infiltration and resistance to rill initiation. Conversely, bulk density and CEC contributed less directly but modulate infiltration and soil-water retention mechanisms that amplify erosivity where soils are compacted or poorly aggregated.

Spatial variability analysis (Section 3.4) further supports this interpretation. Sites with coarser soils displayed higher coefficients of variation in both sand content and SOC, indicating heterogeneous material susceptibility that aligns with mapped gully clusters. Model performance metrics (accuracy = 0.65–0.78; AUC = 0.67–0.80) show that the Random Forest algorithm successfully captured these edaphic patterns, with the most substantial predictive confidence where textural contrasts were most pronounced (Ogun-Oshun Basin and Abuja Plateau). The lower reliability in Idanre stems from a smaller sample size rather than conceptual deviation, highlighting the need for denser ground sampling in stable upland terrains. Taken together, the integrated evidence portrays a clear mechanistic story: gully erosion in southwestern and central Nigeria is fundamentally a soil-driven process. Areas dominated by coarse, compacted, and low-surface-organic-carbon (SOC) soils are inherently more vulnerable to concentrated flow incision, notably when vegetation cover is reduced or land is converted. Conversely, soils rich in clay and organic matter buffer against detachment through enhanced structural stability and infiltration. The interplay of these attributes explains both the magnitude and spatial pattern of gully evolution observed from 2000 to 2025.

This comprehensive synthesis bridges the empirical findings and the forthcoming discussion. It establishes that the differences in gully activity across the three landscapes are not random but are governed by quantifiable soil properties that determine hydrological response and material strength. Section 4 will build on this foundation by contextualising these results within broader geomorphic, climatic, and land-management frameworks, evaluating how anthropogenic disturbance, topographic setting, and soil conservation practices can mediate the observed erosion trajectories and inform regional-scale gully susceptibility mapping and control strategies.

## 4. Обсуждение

Проведённое исследование показывает, что физические и химические свойства почв играют первостепенную роль в формировании и пространственном распределении овражной эрозии при относительно однородном режиме осадков. На трёх исследуемых участках расширение овражной сети в период с 2000 по 2025 г. носило не случайный, а системный характер и чётко соотносилось с вариациями гранулометрического состава почв, их плотности сложения и содержания органического вещества. Полученные данные подтверждают тезис о том, что помимо осадков и крутизны склонов именно внутреннее строение и состав почвы определяют масштабы и устойчивость процессов оврагообразования.

Заметно более интенсивное развитие оврагов в бассейне Огун-Осун и на плато Абуджа обусловлено сочетанием ряда почвенных характеристик: грубого гранулометрического состава, повышенной плотности сложения и сниженного содержания органического углерода. Такие свойства ограничивают инфильтрацию влаги, способствуют поверхностному стоку и формированию концентрированных потоков, которые усиливают отрыв частиц грунта и продвижение вершин оврагов. Аналогичные наблюдения описаны и для других тропических ландшафтов [34, 35]: песчаные, структурно неустойчивые почвы особенно подвержены эрозии во время ливней высокой интенсивности. В противоположность этому, на холмах Иданре почвы с более тонким гранулометрическим составом и повышенным содержанием органики демонстрируют повышенную структурную устойчивость и инфильтрационную способность. Эти свойства в совокупности снижают эрозионную энергию потока и уменьшают вероятность зарождения оврагов.

Результаты моделирования методом «случайного леса» дают количественное обоснование полевым наблюдениям. Переменные, связанные с гранулометрическим составом — в первую очередь содержание песка, содержание глины и их соотношение — стабильно занимали верхние позиции по важности признаков, подчёркивая их ключевую роль в контроле эродируемости почв. Такая закономерность согласуется с концептуальной моделью зарождения оврагов, предложенной в работе [36], где порог врезки концентрированного потока определяется балансом между инфильтрационной способностью почвы и сопротивлением отрыву частиц. Содержание почвенного органического углерода (SOC) проявило себя как значимый вторичный фактор, подтверждая стабилизирующее влияние органики на связность почвы и прочность агрегатов [37]. Однако его смягчающий эффект оказался менее выражен на уплотнённых или грубозернистых почвах, что указывает на способность текстурно обусловленных гидрологических ог-

раничений нивелировать преимущества химической стабилизации.

Анализ пространственной изменчивости и неопределенности дополнительно подтверждает надёжность полученных выводов. Диапазон значений точности модели ( $0,65–0,78$ ) и площади под ROC-кривой ( $AUC = 0,67–0,80$ ) свидетельствует о умеренной и высокой прогностической способности, несмотря на различия в объёме выборок. Стабильность ранжирования важности признаков на всех участках указывает на устойчивость и переносимость выявленных связей «почва — овраг». Несколько более высокая неопределенность модели для холмов Иданре обусловлена главным образом малым объёмом выборки и относительной однородностью почвенных характеристик, а не недостатками самой прогностической схемы. Это подчёркивает важный методологический вывод: в сложных тропических ландшафтах точность модели повышается при росте вариабельности почвенных свойств и плотности репрезентативного опробования.

Помимо механизмов, специфичных для отдельных участков, полученные результаты имеют более широкие последствия для управления ландшафтами. Доминирующая роль гранулометрического состава и SOC в объяснении наличия оврагов подчёркивает необходимость ставить во главу угла управление структурными свойствами почв при разработке мер борьбы с эрозией. Такие мероприятия, как мульчирование растительными остатками, снижение интенсивности обработки почвы и закрепление поверхности растительностью, способны существенно снизить риск зарождения оврагов даже при неизменном режиме осадков. Выявленные устойчивые взаимосвязи также создают основу для масштабирования карт предрасположенности к оврагам с использованием дистанционного зондирования и почвенных баз данных. Это позволит внедрять системы раннего оповещения и пространственного приоритезирования мероприятий.

Карты овражной сети, построенные для плато Абуджа, холмов Иданре и бассейна Огун – Осун, были верифицированы путём тщательной визуальной перекрёстной проверки и наложения на снимки высокого разрешения из Google Earth за соответствующие годы (2000 и 2025). Делимитация оврагов выполнялась вручную по многовременным спутниковым композитам (снимки Landsat и Sentinel). Это позволило: обеспечить согласованность пространственных границ и свести к минимуму ошибочную классификацию линейных эрозионных форм. С учётом ландшафтной сложности территории Нигерии и локального характера развития оврагов такой подход обеспечил высокую интерпретационную точность. Хотя формальная оценка точности на уровне пикселей не проводилась (поскольку овраги оцифровывались в виде векторных полигонов, а не классифицированных растро-

вых слоёв), общая пространственная достоверность инвентаризационных данных по оврагам оценена как превышающая 85 %. Этот показатель согласуется с результатами предшествующих геоморфологических картографирований в аналогичных условиях Нигерии. Таким образом, зафиксированные временные изменения и закономерности площадного распространения оврагов на трёх ключевых участках отражают достоверные и географически согласованные тренды развития овражной сети в пределах влажно-тропической зоны страны.

Наконец, данные о стремительном расширении овражной сети за период с 2000 по 2025 г. указывают на тревожную динамику деградации земель, особенно в низменных бассейнах, где сочетаются антропогенная нагрузка и неудовлетворительный дренаж. Без целенаправленного управления структурой почвы и её гидрологическим режимом развитие овражных систем может продолжаться нелинейно, создавая угрозу пахотным угодьям, инфраструктуре и устойчивости экосистем. Следовательно, включение почвенно ориентированных индикаторов в планирование землепользования и программы восстановления водосборов является необходимым условием для устойчивого снижения эрозионных потерь.

#### 4. Discussion

This study demonstrates that soil physical and chemical attributes exert a primary influence on the development and spatial distribution of gully erosion under a uniform rainfall regime. Across the three study areas, gully expansion between 2000 and 2025 was not random but systematically aligned with variations in soil texture, bulk density, and organic matter content. The findings thus reinforce the premise that, beyond rainfall and slope, the intrinsic soil composition and structure determine the magnitude and persistence of gully processes.

The markedly higher gully expansion observed in the Ogun-Oshun Basin and Abuja Plateau reflects the interplay between coarse-textured soils, higher compaction, and lower organic carbon. These soil characteristics limit infiltration and promote surface runoff, generating concentrated flow that enhances detachment and headcut advancement. Similar observations have been reported in other tropical landscapes [34, 35], where sandy, structurally weak soils are particularly susceptible to erosion during high-intensity storms. In contrast, the finer-textured and organic-rich soils of the Idanre Hills exhibited greater structural integrity and infiltration capacity, which together mitigate erosive energy and reduce the likelihood of gully initiation.

The Random Forest results provide a quantitative underpinning for these field-based interpretations. Texture-related variables, particularly sand, clay, and their ratio, consistently dominated the feature importance

rankings, emphasising their central role in controlling soil erodibility. This dominance aligns with the conceptual model of gully initiation proposed by [36], in which the balance between infiltration capacity and detachment resistance dictates the threshold for concentrated flow incision. SOC emerged as a significant secondary factor, highlighting the stabilising influence of organic matter on soil cohesion and aggregate strength [37]. Its moderating role, however, was less pronounced in highly compacted or coarse-textured settings, suggesting that texture-driven hydrological limitations can override the benefits of chemical stabilisation.

Spatial variability and uncertainty analysis further clarify the reliability of these findings. The observed range of model accuracies (0.65–0.78) and AUC values (0.67–0.80) indicates moderate-to-strong predictive capability despite differing sample sizes. The stability of feature importance rankings across sites suggests that the underlying soil-gully relationship is robust and transferable. The slightly higher uncertainty in the Idanre Hills model stems largely from sample scarcity and the relative uniformity of soil characteristics, rather than from inconsistencies in the predictive framework. This highlights an essential methodological insight: in complex tropical terrains, model precision improves with higher soil variability and representative sampling density.

Beyond site-specific mechanisms, these results carry broader implications for landscape management. The dominance of textural and SOC variables in explaining gully presence underscores the need to prioritise soil structural management in erosion control strategies. Measures that enhance organic matter retention, promote aggregation, and improve infiltration, such as residue mulching, reduced tillage, and vegetative stabilisation, could significantly reduce the risk of gully initiation even under unchanged rainfall regimes. The consistent relationships identified in this study also provide a foundation for scaling up gully susceptibility mapping using remote sensing and soil databases, enabling early warning and spatial prioritisation of interventions.

The gully maps produced for the Abuja Plateau, Idanre Hills, and Ogun–Osun Basin were validated through careful visual cross-checking and overlay comparison with high-resolution Google Earth imagery for the corresponding years (2000 and 2025). The delineations were performed manually from multi-temporal satellite composites (Landsat and Sentinel imagery) to ensure consistency in spatial boundaries and to minimize misclassification of linear erosional features. Given the contextual complexity of Nigeria's terrain and the localized nature of gullies, this approach provided high interpretive accuracy. Although a formal pixel-based accuracy assessment was not performed (as gullies were digitized as vector polygons rather than classified raster layers), the overall spatial reliability of the gully inventories was estimated to exceed 85%, consistent

with previous geomorphological mapping efforts in similar Nigerian environments. The observed temporal changes and areal expansion patterns across the three sites therefore reflect robust and geographically consistent gully evolution trends within the country's humid tropical zone.

Finally, the temporal evidence of rapid gully expansion between 2000 and 2025 reflects a concerning trajectory of land degradation, particularly in lowland basins where human pressure and poor drainage converge. Without targeted management of soil structure and hydrology, gully systems may continue to expand nonlinearly, posing a threat to arable land, infrastructure, and ecosystem stability. Therefore, integrating soil-focused indicators into land-use planning and catchment rehabilitation programs is essential for achieving sustainable erosion mitigation.

## 5. Заключение

В настоящем исследовании представлена комплексная оценка влияния свойств почв на предрасположенность к овражной эрозии на трёх геоморфологических участках в Нигерии: плато Абуджа, холмах Иданре и бассейне Огун-Осун. Все участки характеризуются единым режимом осадков. С использованием модели «случайного леса» (Random Forest, RF) и почвенных переменных, извлечённых исключительно из базы данных SoilGrids, анализ показал: свойства почв играют существенную роль в инициировании и развитии оврагов на территориях с различными литологическими и топографическими условиями.

Среди исследованных переменных наиболее значимыми предикторами наличия оврагов оказались: содержание песка, содержание глины и соотношение песок/глина. За ними следуют: почвенный органический углерод (SOC), плотность сложения почвы и катионообменная способность (CEC). Относительно высокая важность текстурных показателей свидетельствует о том, что гранулометрический состав остаётся ключевым фактором, регулирующим инфильтрацию и сопротивление сдвигу. Эти свойства напрямую влияют на формирование и расширение оврагов. Высокая результативность классификации (общая точность — 0,88, F<sub>1</sub>-мера — 0,88) подтверждает надёжность модели RF в отражении сложных взаимосвязей между свойствами почв и эрозией. Анализ пространственной изменчивости дополнительно показал: степень вариабельности почвенных характеристик соответствует различиям в предрасположенности к оврагообразованию. Так, на плато Абуджа отмечена более высокая неопределенность, обусловленная умеренным разнообразием гранулометрического состава. В то же время на холмах Иданре зафиксированы относительно однородные почвенные условия и меньшая неопределенность.

Полученные результаты подчёркивают: даже при сопоставимых режимах осадков локальная неоднород-

ность почв способна существенно изменять реакцию ландшафта на эрозию. Это подтверждает необходимость учёта динамики почвенных свойств — в первую очередь гранулометрического состава и содержания органического вещества — при моделировании эрозионных рисков и планировании землепользования. С точки зрения управления, меры, направленные на повышение структурной устойчивости почв и обогащение их органическим веществом, могут значительно снизить интенсивность оврагообразования. К таким мерам относятся: внедрение почвозащитной обработки; восстановление растительного покрова, и целевое лесовосстановление на склонах, подверженных эрозии.

Хотя исследование демонстрирует высокую прогностическую способность модели, сохраняются определённые неопределённости. В первую очередь они связаны с пространственным разрешением почвенных наборов данных и ограниченным количеством валидации на конкретных участках. В будущих исследованиях целесообразно интегрировать данные почвенного зондирования высокого разрешения с гидрологическими и геоморфологическими переменными. Это позволит повысить точность прогнозов и расширить возможности их переноса на аналогичные ландшафты. В целом проведённая работа показывает: понимание пространственной изменчивости свойств почв создаёт важнейшую основу для разработки устойчивых, адаптированных к конкретным условиям мер борьбы с эрозией в полувлажных ландшафтах Нигерии.

## 5. Conclusion

This study presents an integrated assessment of the influence of soil properties on gully erosion susceptibility across three geomorphic settings in Nigeria: the Abuja Plateau, the Idanre Hills, and the Ogun-Osun Basin, all of which are located under a uniform rainfall regime. Using a Random Forest (RF) framework and soil variables derived exclusively from the SoilGrids database, the analysis demonstrated that soil attributes play a significant role in determining gully initiation and development across landscapes of varying lithological and topographic conditions.

Among the examined variables, sand content, clay content, and the sand-clay ratio emerged as the most influential predictors of gully occurrence, followed by soil organic carbon (SOC), bulk density, and cation exchange capacity (CEC). The relatively higher feature importance of textural indices suggests that soil texture remains a dominant control on infiltration and shear resistance, which directly affects the formation and expansion of gullies. The high classification performance (overall accuracy of 0.88 and F<sub>1</sub>-score of 0.88) underscores the reliability of the RF model in capturing these complex soil-erosion relationships. Spatial variability analysis further

revealed that the degree of variability in soil properties corresponds with differences in gully susceptibility, with the Abuja Plateau showing higher uncertainty due to moderate textural diversity, while the Idanre Hills exhibited relatively uniform soil conditions and lower uncertainty.

The findings highlight that even under comparable rainfall regimes, local-scale soil heterogeneity can significantly modulate erosion response. This reinforces the importance of considering soil property dynamics, particularly texture and organic matter content, in erosion risk modelling and land-use management. From a management perspective, interventions that promote soil structural stability and organic matter enrichment could substantially mitigate

gully development. This includes the adoption of conservation tillage, vegetative-cover restoration, and targeted reforestation on erosion-prone slopes.

While the study demonstrates strong predictive capacity, some uncertainties remain, particularly regarding the spatial resolution of soil datasets and limited site-specific validation. Future research should integrate high-resolution soil sensing, coupled with hydrological and geomorphological variables, to refine predictive accuracy and enhance transferability across similar landscapes. Overall, this study underscores that understanding the spatial variability of soil properties provides a critical foundation for designing sustainable, site-specific erosion control measures across Nigeria's semi-humid landscapes.

## References

1. Han J, Guzman JA, Chu ML. Gully erosion susceptibility considering spatiotemporal environmental variables: Midwest U.S. region. *J Hydrol Reg Stud.* 2022; 43:101196. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101196>
2. Ionita I, Fullen MA, Zglobicki W, et al. Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Nat Hazards.* 2015;79(Suppl 1):1-5. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1935-z>
3. Chen Y, De Geeter S, Poesen J, et al. Global patterns of gully occurrence and their sensitivity to environmental changes. *Int Soil Water Conserv Res.* 2025. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.09.004>
4. Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena.* 2005;63(2-3):132-153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
5. Falta FF, Liu G, Zhang Q, Shu C. A review of gully erosion in Africa in the 21st century. *J Hydrol.* 2025;662(Pt C):134037. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134037>
6. Zhuang J, Peng J, Li Z, et al. The evolution of gully erosion in the Rift Valley of Kenya over the past 50 years. *J Afr Earth Sci.* 2024; 209:105099. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105099>
7. Olivier G, Van De Wiel MJ, de Clercq WP. Predicting gully erosion susceptibility in South Africa by integrating literature directives with regional spatial data. *Earth Surf Process Landf.* 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5653>
8. Zolezzi G, Bezzi M, Spada D, Bozzarelli E. Urban gully erosion in sub-Saharan Africa: A case study from Uganda. *Land Degrad Dev.* 2017;29(4):1209-1220. <https://doi.org/10.1002/lrd.2865>
9. Fashae O, Obateru R, Olusola A, Dragovich D. Factors controlling gully morphology on the quartzite ridges of Ibadan, Nigeria. *Catena.* 2022; 212:106127. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106127>
10. Fagbohun BJ, Aladejana OO, Okonye IF, Tobore AO. Assessing gully erosion susceptibility dynamics using information value and hazard index methods: A case study of Agulu-Nanka watershed, Southeast Nigeria. *Catena.* 2024; 241:108070. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108070>
11. Obiorah CA, Okeke GN, Esitikot EL, et al. Critical assessment of the menace of gully erosion in Southeastern Nigeria. *Int J Res Sci Innov.* 2025. <https://doi.org/10.51244/IJRSI.2025.12020076>
12. Khan S, Bartley R, Kinsey-Henderson A, Hawdon A. Assessing gully erosion and rehabilitation using multi-temporal LiDAR DEMs: Case study from the Great Barrier Reef catchments, Australia. *Int Soil Water Conserv Res.* 2024;12(1):184-199. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.005>
13. Fernández T, Pérez-García JL, Gómez-López JM, et al. Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves using DEMs obtained with photogrammetry and LiDAR. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2020;9(4):260. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040260>
14. Nzereogu SK, Igwe O, Emeh CO, et al. Comparative analysis of the expansion rate and soil erodibility factor of some gullies in Nnewi and Nnobi, Southeastern Nigeria. *Sci Rep.* 2023; 13:15293. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42320-w>

15. Essien OA, Sam IJ, Udoinyang UC. Gully category, slope position and soil depth studies of ‘Acid Sand’: Effects on soil physical properties in Akwa Ibom State, Southeastern Nigeria. *Asian J Soil Sci Plant Nutr.* 2024;10(4):779-794. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i4449>
16. Okoyeh L, Akpan A, Egboka B, Okeke HI. Assessment of surface and subsurface water dynamics in the development of gullies in Anambra State, Southeastern Nigeria. *Earth Interact.* 2014; 18:1-24. <https://doi.org/10.1175/2012EI000488.1>
17. Hengl T, Mendes de Jesus J, Heuvelink GBM, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS One.* 2017;12(2): e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
18. Poggio L, de Sousa LM, Batjes NH, et al. SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil.* 2021;7(2):217-240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
19. Etuk MN, Igwe O, Egbueri JC. An integrated geoinformatics and hydrogeological approach to delineating groundwater potential zones in Abuja, Nigeria. *Model Earth Syst Environ.* 2023; 9:285-311. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01502-7>
20. Muhammad A. Frequency analysis of rainfall in Abuja using probability distributions [dataset]. Figshare. 2024. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.26236439.v2>
21. Mshelia YS, Onywere SM, Letema S. Modeling spatial dynamics of land cover transitions and vegetation conditions in Abuja city, Nigeria. *Urban Sustain Soc.* 2024;1(1):115-132. <https://doi.org/10.1108/USS-12-2023-0026>
22. Ige A, Adeyemi C, Ogunfolakan B, et al. An inventory of the geological, biological and cultural resources on Ufe-Oke Hill, Idanre, Southwestern Nigeria. *Nat Resour.* 2011;2(3):183-195. <https://doi.org/10.4236/nr.2011.23024>
23. Olutumise A, Oladitan O. Agro-climatic zonation based on rainfall distribution over Ondo State, Southwestern Nigeria. 2023; 22:195-224.
24. Oshinfowokan O, Oke M, Olabomi R, Rasaq. Sustainable development of mountainous and hilly towns in Nigeria: Issues and policy direction. 2023.
25. Ogundolie OI, Olabiysi SO, Ganiyu RA, et al. Assessment of flood vulnerability in Osun River Basin using AHP method. *BMC Environ Sci.* 2024; 1:9. <https://doi.org/10.1186/s44329-024-00009-z>
26. Adekiya AO, Ajayi GA, Adegbite KA, et al. Mineralogical compositions of soils under three geological formations in Ogun State, Nigeria, and their agricultural potential. *Sci Rep.* 2024; 14:6905. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57397-0>
27. Olukanni D, Alatise M. Rainfall-runoff relationships and flow forecasting in Ogun River, Nigeria. *J Environ Hydrol.* 2008; 16:1-12.
28. Ashaolu E, Ifabiyi I. Effect of land use/land cover change on groundwater recharge in Osun Drainage Basin, Nigeria. *J Geol Geogr Geocoll.* 2019; 28:381-394. <https://doi.org/10.15421/111936>
29. Igwe PU, Ajadike JC, Ogbu SO. Spatial variability of soil texture as a determinant of the erodibility variable at gullies in Eastern Nigeria. *J Sustain Environ Manag.* 2024;3(1):36-46. <https://doi.org/10.3126/josem.v3i1.65227>
30. Li H, Jin J, Dong F, et al. Gully erosion susceptibility prediction using high-resolution data: Evaluation, comparison, and improvement of multiple machine learning models. *Remote Sens.* 2024; 16(24):4742. <https://doi.org/10.3390/rs16244742>
31. Bernini A, Bosino A, Botha GA, Maerker M. Evaluation of gully erosion susceptibility using a maximum entropy model in the Upper Mkhomazi River Basin, South Africa. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2021;10(11):729. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110729>
32. Javidan N, Kavian A, Pourghasemi HR, et al. Gully erosion susceptibility mapping using multivariate adaptive regression splines: Replications and sample size scenarios. *Water.* 2019;11(11):2319. <https://doi.org/10.3390/w11112319>
33. Hitouri S, Varasano A, Mohajane M, et al. Hybrid machine learning approach for gully erosion mapping susceptibility at a watershed scale. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2022;11(7):401. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070401>
34. Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, Montanarella L, Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat Commun* 8, 2013 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
35. Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA.* 2005;63(2-3):132-53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
36. Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *CATENA.* 2003;50(2-4):91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
37. Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 2005;124(1-2):3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.

# ИНВАЗИЯ УССУРИЙСКОГО ПОЛИГРАФА КАК ФАКТОР ДЕГРАДАЦИИ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

**С.М. Сультсон, П.В. Михайлов, П.А. Федонова,  
В.В. Попова\*, Н.Н. Кулакова**

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск,  
Россия

\*Эл. почта: Valpx@bk.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2025; принята к печати 31.10.2025

Проанализированы масштабы деградации пихтовых насаждений Красноярского края в результате распространения инвазивного вида полиграф уссурийский (*Polygraphus proximus* Blandford). На основе многолетних данных (2009–2024 годы) представлена динамика поврежденных и погибших насаждений, очагов полиграфа уссурийского. Рассмотрены региональные проблемы существующей системы лесопатологического мониторинга и необходимость изменения методических подходов к назначению санитарно-оздоровительных мероприятий при инвазии насекомых вредителей.

**Ключевые слова:** полиграф уссурийский (*Polygraphus proximus* Blandford), инвазия, пихта сибирская (*Abies sibirica*), государственный лесопатологический мониторинг (ГЛПМ), санитарно-оздоровительные мероприятия (СОМ), лесоуправление.

## INVASION OF THE BARK BEETLE *POLYGRAPHUS PROXIMUS* AS A FACTOR OF DARK CONIFEROUS FORESTS DEGRADATION IN KRASNOYARSK TERRITORY

**S.M. Sultson, P.V. Mikhaylov, P.A. Fedonova, V.V. Popova\*, N.N. Kulakova**

M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

\*Email: Valpx@bk.ru

The scale of fir-tree forest degradation resulting from invasion by the bark beetle *Polygraphus proximus* in Krasnoyarsk Territory is assessed. Based on a long-term (2009–2024) monitoring, the dynamics of damaged and dead forests and invader foci is presented. The regional problems of the current system of forest surveillance are discussed to point out the expediency of modification the approaches to setting measures against pest insects.

**Keywords:** bark beetle *Polygraphus proximus*, invasion, Siberian fir tree, State Forest Surveillance, forest amelioration, forest management

### Введение

В настоящее время одной из масштабных проблем нескольких регионов России в том числе и Красноярского края стало повреждение темнохвойных лесов, в составе которых присутствует пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), инвазивным короедом полиграфом уссурийским (*Polygraphus proximus* Blandford).

Полиграф уссурийский – эндемичный вид дальневосточной энтомофауны [8]. Его естественный ареал охватывает пихтовые и смешанные леса Приморского и Хабаровского краев, Сахалина, а также территории Японии, Корейского полуострова и северо-восточных провинций Китая [1]. В пределах природного

ареала основными кормовыми растениями выступают дальневосточные виды пихты (*Abies nephrolepis* Trautv., *A. holophylla* Maxim., *A. sachalinensis* F.Schmidt и др.), реже ель (*Picea ajanensis* Carriere), лиственница (*Larix*), сосна (*Pinus*), включая кедр корейский (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.). Во вторичном ареале полиграф уссурийский предпочитает селиться на деревьях пихты *Abies sibirica* и *A. balsamea* (L.) Mill. [1], повреждая преимущественно ослабленные древостоя [3]. Ареал уссурийского полиграфа в Средней и Южной Сибири, где пихта сибирская выступает ключевой лесообразующей породой темнохвойной тайги, уже охватывает 4,9 млн. га. Эта площадь составляет почти



**Рис. 1.** Усыхание и гибель древостоев пихты сибирской в очагах полиграфа уссурийского (А – поврежденные насаждения (окрашены в малиновый цвет) вблизи п. Верхняя Бирюса; Б – внешние признаки поражения деревьев пихты)

треть от общего распространения пихты сибирской в регионе [12, 16].

Имеющиеся на сегодняшний день данные указывают на то, что распространение инвазивного вида представляет риски масштабной деградации темнохвойных насаждений [18]. В результате воздействия полиграфа уссурийского происходит деградация пихтовых насаждений [6, 7, 19] (рис. 1), что проявляется в массовой гибели пихты, однако при этом в таких древостоях можно встретить единичные деревья, не подверженные повреждениям вредителя. Отпад стволов пихты в очагах размножения инвайдера может достигать 99,8 % [9, 10, 18]. Массовая гибель пихтовых древостоев, вызванная воздействием полиграфа уссурийского, обусловлена заносом симбионта этого короеда – офиостомового гриба гросманния Аошимы (*Grosmannia aoshimae* (Ohtaka, Masuya & Yamaoka) Masuya & Yamaoka) – в ткани атакованных деревьев, что сопровождается необратимым некрозом проводящих тканей [15].

По прогнозам специалистов лесопатологов Центра защиты леса Красноярского края распространение вредителя продолжится на север и северо-запад региона<sup>1</sup>. Можно предположить, что одним из факторов, способствующим расширению ареала, выступает изменение климата, в частности повышение температуры в зимне-весенний период, что увеличивает шансы выживания инвайдера [13]. За прошедшее время число муниципальных районов Красноярского края, в которых фиксируется вредитель, увеличилось до 34 (из 44 районов края), а площадь повреждённых насаждений

– с 1,9 тыс. га до 561,8 тыс. га [13]. В настоящее время отсутствуют эффективные методы борьбы с полиграфом уссурийским. Энтомофаги играют незначительную роль в регуляции численности полиграфа. В Сибири выявлено около 30 видов таких энтомофагов. Среди них доминирующими являются два вида линочных паразитов из семейства *Pteromalidae* (хальциды *Dinotiscus eupterus* Walker и *Roptrocerus mirus* Walker) и хищник из семейства *Dolichopodidae* (кошедница *Medetera penicillata* Negrobov) [14]. На фоне такого положения дел в перспективе сохраняются риски и неопределенности развития ситуации, требующие новых управлеченческих решений, отличных от стандартных в рамках действующей системы защиты лесов.

Ориентировочно, здоровое жизнеспособное дерево первого яруса гибнет примерно в течение 2–4 лет последовательных попыток поселения [3]. Успешное заселение приводит дерево к быстрому отмиранию. По нашим наблюдениям, на пробных площадях деревья пихты, заселенные полиграфом, перешли из второй и третьей категории состояния в пятую на следующий год, что свидетельствует о быстром ухудшении их состояния под воздействием данного вредителя.

Одной из причин низкой устойчивости пихты сибирской к заселению полиграфом уссурийским и к переносимым им фитопатогенным офиостомовым грибам при сравнении с дальневосточными пихтами является особенность анатомического строения луба (менее плотное расположение склереид), что облегчает как проникновение жуков в луб, так и распространение грибных гифов по проводящей системе дерева [2]. В связи с этим у пихты сибирской в лубе развиваются гораздо более крупные некрозы, способствуя

<sup>1</sup> Российский центр защиты леса «Рослесозащита». Филиал ФБУ «Центр защиты леса Красноярского края». Официальный сайт. — URL: <https://krasnoyarsk.rcfh.ru/>

щие ослаблению дерева и снижению эффективности защитных реакций от полиграфа.

В данной работе проведен анализ динамики площадей очагов уссурийского полиграфа на территории Красноярского края, с целью оценки масштабов повреждения и гибели пихтовых насаждений, выявления основных проблем и тенденций в лесопатологическом состоянии лесов региона.

## Материалы и методы

В исследовании использованы данные из реестра лесных участков, на которых действуют очаги вредных организмов, отнесенных к карантинным объектам, представленные в открытом доступе на сайте Федерального агентства лесного хозяйства России «Рослесхоз»<sup>2</sup> на территории Красноярского края в период с 2009 по 2024 год, а также данные, предоставленные Центром защиты леса Красноярского края<sup>1</sup>.

Формирование реестра государственного лесопатологического мониторинга (ГЛПМ) осуществляется в соответствии с правилами, установленными Приказом Рослесхоза от 31.05.2023 №706 «Об утверждении порядка ведения реестров государственного лесопатологического мониторинга»<sup>3</sup>. Важно отметить, что в конце 2022 года на законодательном уровне произошло изменение подходов к ведению реестров ГЛПМ. При формировании официальной статистики из реестра ГЛПМ были исключены ранее содержащие сведения, которые были получены в результате дешифрирования космических снимков при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ).

## Результаты и обсуждение

Согласно ранее проведенным исследованиям, идентификация очагов инвайдера на территории Западной и Средней Сибири произошла лишь к концу первого десятилетия нынешнего века [5, 7]. С помощью дендрохронологических методов установлено, что проникновение уссурийского полиграфа в леса Красноярского края произошло в 70-х годах прошлого столетия. В течение 30-40 лет популяция полиграфа уссурийского проходила адаптацию к новым условиям, после чего в начале 2000-х годов образовались первые очаги массового размножения [3, 4].

Согласно официальным данным, полиграф уссурийский в Красноярском крае впервые был идентифицирован лишь в 2009 году на территории трех лесничеств: Козульское (724,5 га), Ачинское (753,5 га), и Богоильское (474,6 га). Начиная с 2011 года, площадь

распространения инвайдера постепенно увеличивалась и к 2020 году охватила уже территорию 37 лесничеств<sup>1</sup>.

В настоящее время, согласно данным Центра защиты леса Красноярского края, ареал уссурийского полиграфа охватывает уже территорию 41 лесничества из 61 в крае<sup>2</sup>. Прогнозируется дальнейшее расширение ареала этого опасного вредителя в северные и южные районы края, где сосредоточены наибольшие массивы пихтовых лесов – основной кормовой породы инвайдера<sup>2</sup>.

Динамика площадей поврежденных и погибших насаждений, а также площадей очагов полиграфа уссурийского в период с 2009 по 2024 год представлены на рис. 2.

По состоянию на 2024 год площадь насаждений, поврежденных и погибших от воздействия полиграфа уссурийского, согласно реестрам ГЛПМ, составила 150,5 тыс. га. В то же время, по данным дистанционных наблюдений Центра защиты леса Красноярского края<sup>1</sup>, изменения санитарного и лесопатологического состояния насаждений, повреждения полиграфом уссурийским отмечено на площади свыше 500 тыс. га<sup>1</sup>. Положительная динамика в части сокращения площадей поврежденных насаждений по официальным данным в 2023-2024 гг. (рис. 2) обусловлена исключением участков поврежденных насаждений, выявленных методами ДЗЗ<sup>3</sup>.

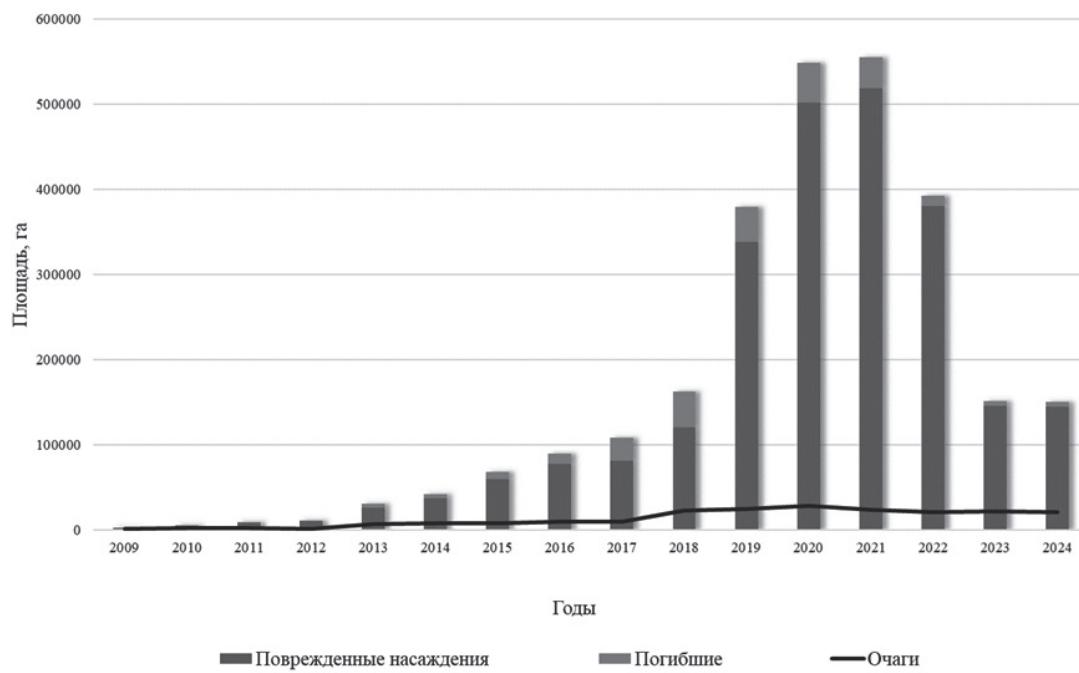
Росту очагов инвазивного вида способствует недостаточный объем или полное отсутствие санитарно-оздоровительных мероприятий (СОМ). Одной из причин недостаточного объема планируемых СОМ является невозможность включения сведений о поврежденных и погибших древостоях по данным ДЗЗ в реестр ГЛПМ. Это приводит к искажению итоговой информации, а также занижению данных по ежегодному объему планирования СОМ, и к недостаточному государственному финансированию. В результате усложняется проблема распространения инвайдера и снижается возможность эффективного контроля за состоянием лесных насаждений на уровне региона.

По данным Центра защиты леса Красноярского края<sup>1</sup>, за последние десять лет санитарные рубки в насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским, осуществлены на площади 79,8 тыс. га, в том числе: сплошные санитарные рубки – 73,0 тыс. га, выборочные санитарные рубки – 6,8 тыс. га. Площадь всех проведенных рубок (за 12 лет) составляет 14,8% от площади поврежденных и погибших насаждений, что свидетельствует о критической недостаточности принимаемых мер для предотвращения распространения вредителя в лесах. Соотношение поврежденных насаждений и проведенных в них санитарно-оздоровительных мероприятий представлено на рисунке 3.

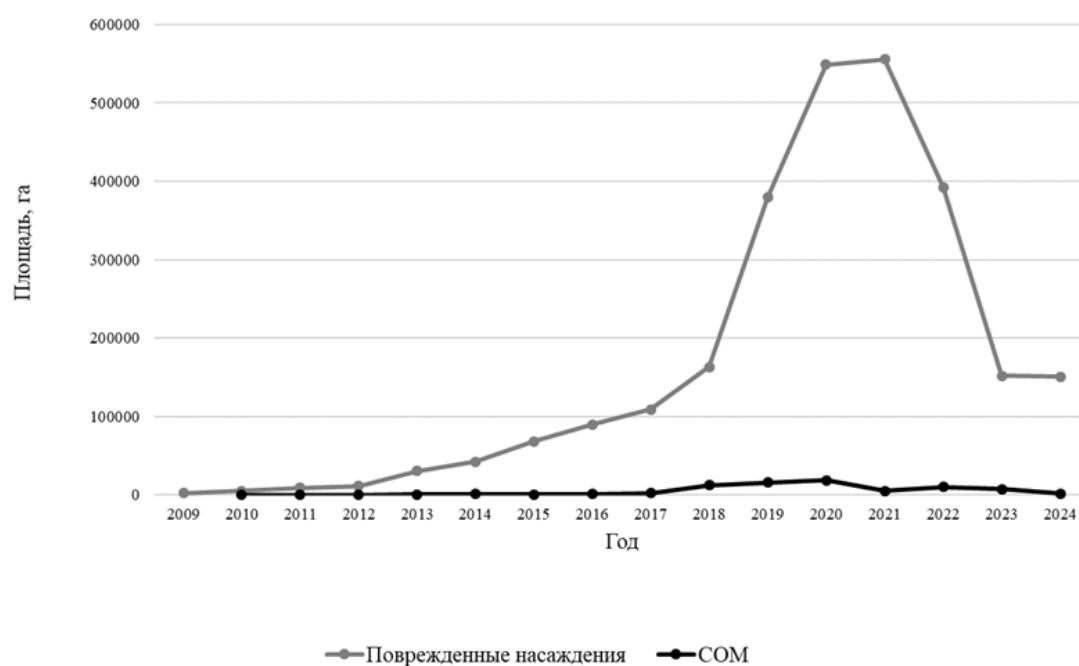
Масштабы распространения полиграфа уссурийского и связанное с ним ежегодное увеличение пло-

<sup>2</sup> Результаты государственного лесопатологического мониторинга. Федеральное агентство лесного хозяйства России «Рослесхоз». – URL: [https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest\\_security\\_and\\_protection/stat](https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest_security_and_protection/stat)

<sup>3</sup> Приказ Федерального агентства лесного хозяйства «Рослесхоз» от 31.05.2023 № 706 «Об утверждении порядка ведения реестров государственного лесопатологического мониторинга». – URL: <https://gog.su/knLw>



**Рис. 2.** Площади повреждённых и погибших насаждений, а также площадь действующих очагов полиграфа уссурийского по годам (по данным Центра защиты леса Красноярского края)



**Рис. 3.** Соотношение повреждённых и вырубленных насаждений с 2009 по 2024 год. (по данным Центра защиты леса Красноярского края)

щадей поврежденных и погибших лесов влекут за собой прямые экономические потери в виде утраты коммерческой древесины и серьезные экологические последствия. Погибшие насаждения способствуют увеличению пожарной опасности лесов региона, так как представляют собой огромный запас легковоспламеняющегося горючего материала. Гибель древостоев приводит к резкому увеличению освещенности почвенного покрова, что стимулирует интенсивное развитие травянистой растительности. Запас фитомассы травяного покрова в этих условиях превышает показатели под пологом здорового леса в 2-2,5 раза [11], формируя дополнительную пожарную нагрузку. Характерной особенностью гарей в массово усохших насаждениях является их высокая склонность к повторным возгораниям [17].

По мнению специалистов в условиях сложившейся ситуации в силу отсутствия эффективных методов борьбы и слабым участием энтомофагов в регуляции численности инвайдера единственным способом защиты лесов от дальнейшего распространения полиграфа является рубка свежезаселенных и поврежденных деревьев. Однако действующая нормативная база в части назначения СОМ<sup>4,5</sup> фактически сводится к проведению уборки уже ослабленных и погибших древостоев, что не позволяет ликвидировать очаги короеда и сдерживать дальнейшее распространение инвазивного вида в таежных лесах сибирских регионов.

## Заключение

Анализ ситуации с распространением инвазии полиграфа уссурийского в условиях сибирской темнохвойной тайги на протяжении более десяти лет показывает значительные риски массовой гибели древостоев

<sup>4</sup> Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 09 ноября 2020 г. N 912 «Об утверждении Правил осуществления мероприятий по предупреждению распространения вредных организмов». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/573116160o567679783>

<sup>5</sup> Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 9 ноября 2020 г. N 913 «Об утверждении Правил ликвидации очагов вредных организмов». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140203>

пищты сибирской в ближайшей перспективе. Причиной тому является низкая устойчивость данной древесной породы к атакам нового короеда и заражению фитопатогенными офиостомовыми грибами. Наблюдаемое быстрое распространение вредителя и значительные площади поврежденных насаждений требуют срочных и эффективных мер защиты лесов. На текущий момент в рамках регламента действующей нормативно-правовой базы решить эту проблему на региональном уровне не представляется возможным.

Для успешного разрешения вопроса в масштабах региона следует признать сложившуюся ситуацию исключительной и внести необходимые изменения, установив возможность назначения и проведения санитарных рубок пищты сибирской независимо от категории санитарного состояния, заселенных полиграфом уссурийским (начиная со второй категории состояния дерева). Одновременно в целях эффективного ведения мониторинга за состоянием лесов учитывая значительные лесные пространства сибирских регионов целесообразно внесение в реестр ГЛПМ сведений о площадях поврежденных и погибших древостоях полученных методами ДДЗ.

Предлагаемые подходы к решению проблемы обеспечивают своевременное назначение и проведение санитарно-оздоровительных мероприятий, что позволит сократить масштабы распространения очагов инвазивного вида, сохранить ресурсный потенциал насаждений и избежать утраты их функциональной устойчивости.

**Благодарности:** Авторы выражают искреннюю благодарность Филиалу ФБУ «Рослесозащита» Центру защиты леса Красноярского края, Министерству природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края за консультации и предоставленную информацию.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-20091, <https://rscf.ru/project/25-16-20091/>

## Литература

1. Акулов ЕН, Кулинич ОА, Пономарев ВЛ. Полиграф уссурийский – новый инвазийный вредитель хвойных лесов России. Защита и карантин растений. 2011;(7):34-35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16441164>
2. Астраханцева НВ, Серая ЛГ, Пашенова НВ, Коженкова АА, Баранчиков ЮН. Анатомические особенности коры как фактор устойчивости видов пищты к заселению уссурийским полиграфом. Сибирский лесной журнал. 2023;(5):43-59. DOI 10.15372/SJFS20230507
3. Баранчиков ЮН, Демидко ДА, Лаптев АВ, Петъко ВМ. Динамика отмирания деревьев пищты сибирской в очаге уссурийского полиграфа. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2014;18(6):132-138. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22648779>
4. Баранчиков ЮН, Демидко ДА, Лаптев АВ, Петъко ВМ. Долг путь к успеху: динамика локальной популяции уссурийского полиграфа в регионе инвазии. Материалы международной

- конференции «VIII чтения памяти О.А. Катаева. Вредители и болезни древесных растений России». Санкт-Петербург; 2014;(1):7–8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26060686>
5. Баранчиков ЮН, Петько ВМ, Астапенко СА, Акулов ЕН, Кривцев СА. Уссурийский полиграф - новый агрессивный вредитель пихты в Сибири. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник.2011;(4):78-81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16540234>
  6. Бисирова ЭМ. Деградация пихтовых древостоев в зоне инвазии уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) на территории Томской области. Материалы международной конференции «Х чтения памяти О.А. Катаева. Санкт-Петербург;2018;1:12-13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36373531>
  7. Бисирова ЭМ. Динамика состояния древостоев пихты сибирской, поврежденных уссурийским полиграфом *Polygraphus proximus* Blandf. в Томской области. Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018;(44):118-40. DOI 10.17223/19988591/44/7
  8. Бисирова ЭМ. Распространение уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Bland. в России. Фитосанитария. Каантин растений. 2024;S1(18):12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65007642>
  9. Керчев ИА. Экология полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera: Scolytidae, Scolytinae) в Западно-Сибирском регионе инвазии. Российский журнал биологических инвазий. 2014;7(2):80-95. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22831720>
  10. Кривец СА. Заметки по экологии уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) в Западной Сибири. Известия СПБЛТА. 2012;(200):94-105. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20539834>
  11. Кривец СА, Бисирова ЭМ, Керчев ИА, Пац ЕН, Чернова НА. Трансформация таёжных экосистем в очаге инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) в Западной Сибири. Российский журнал биологических инвазий. 2015;8(1):41-63. URL: <https://elibrary.ru/TZKLWH>
  12. Кривец СА, Керчев ИА, Бисирова ЭМ, Пац ЕН, Чернова НА, Демидко ДА, Мухортова ЛВ, Пашенова НВ, Петько ВМ, Баранчиков ЮН. Механизмы экспансии и роль уссурийского полиграфа в современных сукцессионных процессах сибирской тайги: итоги 3-летних исследований. Материалы международной конференции «VIII чтения памяти О.А. Катаева. Вредители и болезни древесных растений России». Санкт-Петербург; 2014;1:41-42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26060710>
  13. Кривец СА, Керчев ИА, Бисирова ЭМ, Волкова ЕС, Астапенко СА, Ефременко АА, Косилов АЮ, Кудрявцев ПП, Кузнецова ЮР, Пономарёв ВИ, Потапкин АБ, Тараксин ЕГ, Титова ВВ, Шилоносов АО, Баранчиков ЮН. Обзор современного вторичного ареала Уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации. Российский журнал биологических инвазий. 2024;17,(1):49-69. DOI 10.35885/1996-1499-17-1-49-69
  14. Кривец СА, Керчев ИА, Бисирова ЭМ, Петько ВМ, Пашенова НВ, Баранчиков ЮН, Демидко ДА. Уссурийский полиграф в лесах Сибири (распространение, биология, экология, выявление и обследование поврежденных насаждений). Томск-Красноярск: Умим; 2015. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24734660>
  15. Пашенова НВ, Кононов АВ, Устьянцев КВ, Блинов АГ, Перцовская АА, Баранчиков ЮН. Офиостомовые грибы, ассоциированные с уссурийским полиграфом на территории России. Российский журнал биологических инвазий. 2017;10(4):80-95. URL: <https://elibrary.ru/zwbkug>
  16. Фуряев ИВ, Жила СВ. Изменение пожарной опасности нарушенных темнохвойных насаждений средней и южной Сибири. Интерэкско Гео-Сибирь. 2024;4(2):35-41. DOI 10.33764/2618-981X-2024-4-2-35-41
  17. Харук ВИ, Антамошина ОА. Воздействие сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий. Сибирский экологический журнал. 2017;24(5):647-54. DOI 10.15372/SEJ20170510
  18. Шабалина ОМ, Безкоровайная ИН, Баранчиков ЮН. Изменение нижних ярусов фитоценозов пихтовых лесов в очагах массового размножения уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandf.) на территории Красноярского края. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017;2(356):67-84. DOI 10.17238/issn0536-1036.2017.2.67
  19. Kerchev IA, Bisirova EM, Smirnov NA, Grachev IG, Nikiforov AN, Kalashnikova DA. Effects of an Invasive Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandf. Outbreak on Carbon Pool Dynamics in West Siberian Dark Coniferous Forests. Forests.2024;15(3):542. DOI:10.3390/f15030542



# НЕИНВАЗИВНЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЛЮДЕЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛОСАХ

**Т.Г. Крупнова<sup>1</sup>, О.В. Ракова<sup>1\*</sup>, С.В. Гаврилкина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия

Эл. почта: [rakovaov@susu.ru](mailto:rakovaov@susu.ru)

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; принята к печати 26.10.2025

Исследование посвящено проблемам здоровья населения, проживающего на антропогенно нарушенных территориях, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ). Целью работы является выявление особенностей накопления ТМ (кадмия, меди, железа, марганца, свинца и цинка) в волосах населения Челябинской городской промышленной агломерации и изучение возможности использования волос для оценки загрязнения окружающей среды. Средние концентрации железа и меди в волосах превышали референсные значения. Выявлена значимая корреляция между содержанием ТМ в волосах и в пыли, собранной в помещениях, где проживали добровольцы, а также в картофеле, который употребляли в пищу участники исследования. Это обусловлено тем, что ТМ практически не изменяются в окружающей среде и могут мигрировать от источника загрязнения до организма человека через пыль и продукты питания.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, риски для здоровья, неинвазивные методы, кардиометаболический синдром

## A NON-INVASIVE APPROACH TO ASSESSING ENVIRONMENTAL POLLUTION AND HUMAN HEALTH RISKS BASED ON THE CONTENT OF HEAVY METALS IN HAIR

**T.G. Krupnova<sup>1</sup>, O.V. Rakova<sup>1\*</sup>, S.V. Gavrilkina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>South-Urals State University, Chelyabinsk, Russia; <sup>2</sup>South-Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Russia

E-mail: [rakovaov@susu.ru](mailto:rakovaov@susu.ru)

The present study addresses the health problems of people living in anthropogenically disturbed areas contaminated with heavy metals (HM). The aim of the work is to identify the characteristics of accumulation of HM (cadmium, copper, iron, manganese, lead and zinc) in the hair of people living in the Chelyabinsk urban industrial agglomeration and to assess the possibility of using hair for assessing environmental pollution. Average iron and copper concentrations in hair were above reference values. A significant correlation was found between HM content in hair and in dust collected in rooms where volunteers lived, as well as in potatoes consumed by the participants. This may be due to the fact that TMs are virtually unchanged in the environment and can migrate from pollution sources to humans through dust and food.

**Keywords:** heavy metals, health risks, noninvasive methods, cardiometabolic syndrome

### Введение

Наиболее опасными загрязнителями современных городов являются тяжелые металлы (ТМ), которые считаются потенциально токсичными элементами [7]. Загрязнение окружающей среды ими увеличивает риски болезни Альцгеймера [7], сердечно-сосудистых заболеваний [13, 27, 46, 49], преддиабета, диабета и атеросклероза [19, 43, 44, 51], ведет к увеличению числа случаев аллергии у детей [25]. Описаны случаи окислительного стресса, вызванного ТМ в окружаю-

щей среде [28]. Существуют природные и антропогенные источники ТМ в городской среде [15, 20, 42, 53].

Особенно остро проблема загрязнения окружающей среды ТМ стоит в крупных промышленных городах Российской Федерации, к числу которых относится Челябинск. Согласно комплексному докладу о состоянии окружающей среды (<http://www.mineco174.ru>), превышение гигиенических нормативов в почвах Челябинской области характерно по свинцу, кадмию, никелю, мышьяку, марганцу, меди, хрому трехвалент-

ному и цинку. Инструментальные методы мониторинга состояния городской среды не могут дать полную информацию о воздействии ТМ на экосистемы и здоровье человека. Методы биоиндикации позволяют обнаружить и определить экологически значимые природные и антропогенные нагрузки на основе реакций на них живых организмов непосредственно в среде их обитания и широко используются в мониторинге загрязнения окружающей среды ТМ [10–12, 14, 29, 33, 35, 36, 40, 41].

В настоящее время такие человеческие биосубстраты, как волосы, ногти, а также кровь, моча, слюна, рассматриваются в литературе как биомаркеры [6, 38, 39, 47, 50]. Показано, что содержание ТМ в них коррелирует с загрязнением питьевой воды [38, 47, 50], а также с содержанием потенциально токсичных элементов в пыли [8, 17, 21, 39, 45] и продуктах питания [17, 34]. Кроме того, доказано, что на содержание некоторых ТМ в биосубстратах влияет курение [18, 23, 26, 30], возраст [18], расовые и другие особенности человека [5]. Считается, что кратковременные и значительные по степени отклонения ТМ отражаются в их концентрациях в жидких средах организма, тогда как твердые ткани (волосы, ногти, кости) представляют элементный статус, формирующийся в течение длительного времени (месяцы, годы) [9]. Взаимосвязи между содержанием ТМ в биосубстратах и определенными заболеваниями не вызывают сомнений [31, 32, 37].

Реализуемая в системе социально-гигиенического мониторинга программа оценки влияния загрязнения среды обитания на здоровье населения может включать в себя анализ загрязнения почвы, пыли, волос и продуктов питания. В целом аналитические измерения содержания ТМ в указанных объектах позволяют получить объективную информацию о состоянии окружающей среды, однако анализ и оценка их содержания в биологических средах организма человека существенно дополняет информацию о риске для здоровья. При этом биологический мониторинг может быть и дополнительным инструментом оценки риска для здоровья населения, и рассматриваться в качестве самостоятельной региональной программы социально-гигиенического мониторинга.

Цели данной работы включают изучение загрязнения окружающей среды ТМ с использованием волос как неинвазивного биомаркера, а также изучение связи между содержанием ТМ в волосах и риском кардиозаболеваний. Исследования были проведены на территории Челябинской городской промышленной агломерации. Челябинск был выбран как типичный российский промышленный город, на территории которого расположено большое число крупнейших металлургических предприятий. Подобные исследования на территории Южного Урала были проведены впервые.

## Материалы и методы

В исследовании приняли участие 300 человек (мужчины  $n_m = 121$ ; женщины  $n_w = 179$ ) в возрасте от 18 до 72 лет, проживающие в городе Челябинск, Россия.

Программа исследования была одобрена Этическим комитетом ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения РФ. Все участники исследования заполнили информированное письменное согласие на участие в исследовании в соответствии с кодексом этики Всемирной медицинской ассоциации (Хельсинской декларации) на проведение экспериментов с участием человека и публикацию полученных результатов. Права участников на неприкосновенность частной жизни имели первостепенное значение [48].

Личная информация, касающаяся участников, состояния их здоровья и организации питания собирается с использованием опросника. В опытную группу не брали людей с особенностями питания (вегетарианцы и лица, принимающие биодобавки или не употребляющие картофель). Наличие риска кардиометаболического синдрома (КМС), известного также как метаболический синдром, оценивалось согласно рекомендациям Ивановой и соавт. [22]. Учитывались следующие диагностические критерии: индекс массы тела (ИМТ, кг/м<sup>2</sup>) > 30; артериальное давление (АД, мм рт. ст.): диастолическое ≥ 85, sistолическое ≥ 130; глюкоза натощак (Г, ммоль/л) ≥ 5,6; холестерин (Х, ммоль/л) ≥ 5,2. Достоверным КМС считался при наличии не менее чем трёх критериев.

Для анализа содержания ТМ у участника брали прядь волос у корней с затылка и помещали в пластиковые пакеты, которые маркировали тем же номером, что и опросники. Окрашенные и седые волосы не исключались из выборки исследования, но ставилась соответствующая пометка. Перед тем как начать растворение пробы, обрабатывали волосы ацетоном и промывали дистиллированной водой, высушивали до воздушно-сухого состояния.

Образцы бытовой пыли собирали в местах проживания участников с фильтров пылесосов, просеивали через сито диаметром 63 мкм, помещали в маркированные чистые полиэтиленовые пакеты.

В качестве основного продукта питания был выбран картофель. Часто в предыдущих исследованиях в качестве потенциального источника ТМ выбирали морскую рыбу, однако проведенное нами предварительное анкетирование показало, что жители Челябинска употребляют рыбу реже двух раз в неделю, некоторые вообще не употребляют. Поэтому был выбран картофель, так как большинство участников предварительного анкетирования указали его как наиболее часто употребляемый продукт. Для анализа мы использовали либо картофель, выращенный на собственных садовых участках, либо, если испытуемые покупали

картофель, мы просили купить его в тех торговых точках и те сорта, которые предпочитали добровольцы. Неповрежденные клубни были тщательно промыты в пресной воде, очищены и нарезаны на дольки. Для сушки образцов использовали вакуумную сублимационную установку.

Навески волос, бытовой пыли и пищевого продукта отбирали в мерные чашечки Berghof, сделанные из фторопласта TFM, затем помещали чашечки в автоклавы и растворяли пробы в концентрированной азотной кислоте с помощью микроволновой системы пропаривания SPEEDWAVE FOUR (Berghof Products + Instruments GmbH, Германия) с использованием следующего режима: 5 мин повышение температуры до 200°C, 5 мин выдерживание при 200°C, затем охлаждение до 45°C. Полученные растворы переносили в полипропиленовые пробирки и промывали тефлоновые чашки и крышки трижды деионизированной водой с перенесением смыва в соответствующие пробирки. Далее растворы доводили до объема 15 мл деионизированной водой и тщательно перемешивали путем встряхивания в закрытых пробирках [3]. Концентрацию ТМ в пробах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ICP-MS, Agilent 7700x, Agilent Technologies Inc., США) в Центре коллективного пользования Южно-Уральского научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс) в аккредитованной лаборатории. Градуировку масс-спектрометра проводили с использованием моноэлементных растворов ICP Standards Inorganic Ventures (США). Качество определения контролировали с помощью референсных образцов ГСО 9288-2009 (ФГУП «УНИИМ»), ГСО 10413-2014 (ФГБНУ

«ВНИИ агрохимии»), ГСО 8923-2007 (ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН), ГСО 9570-2010 (Китайский национальный аналитический центр чугуна и стали, Пекин, Китай).

Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью программы IBM SPSS Statistics 27.0.

## Результаты и обсуждение

Статистические параметры распределения содержания элементов в волосах человека на территории Челябинска и референсные значения (по Скальному с соавт. [4]) представлены в таблице 1.

Референсные данные по содержанию ТМ в волосах человека, полученные различными авторами и организациями, сильно отличаются и зависят от региона проживания. В нашем исследовании мы опирались на данные коллектива А.В. Скальнего [4]. Полученные нами средние значения содержания свинца, марганца и кадмия в волосах участников человека оказались в пределах интервалов, задаваемых этими референсными данными (табл. 1). Более низкое содержание найдено для цинка (97% участников имели значения ниже предела, всего лишь у 3% выявлено превышение референсного значения). В организме человека нет «депо» цинка, поэтому он должен постоянно поступать из пищи. Следовательно, дефицит цинка чаще всего связан с недостатком питания. Цинк необходим для физического развития, что подтверждается в исследованиях, где у младенцев с дефицитом данного микроэлемента рост был замедлен [50].

Средние уровни железа и меди в волосах превышают референсные значения, особенно в случае железа

Табл. 1

### Статистические параметры содержания ТМ (мг/кг) в волосах (n=300)

ТМ	Диапазон значений	Среднее	Референсный диапазон (РД) [4]	Доля проб за нижним пределом РД, %	Доля проб за верхним пределом РД, %	Доля проб в пределах РД, %
Fe	4–92	33±16	11–25	4	54	42
Mn	0,10–1,25	0,44±0,31	0,31–1,29	49	0	51
Zn	2–272	28±22	145–206	97	3	0
Cu	1–56	15±8	9–14	8	38	54
Cd	0,01–0,11	0,05±0,03	0,02–0,13	15	0	85
Pb	0,02–1,58	0,50±0,32	0,38–1,67	37	0	63

Табл. 2

### Коэффициенты корреляций Спирмена между содержанием ТМ в волосах, риском КМС, содержанием ТМ в пыли помещений и в картофеле (n=300)

Фактор	Содержание ТМ в волосах					
	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
Риск КМС	0,087	0,099	0,424***	0,352***	0,139*	0,387***
Пыль	0,148*	0,378***	0,397***	0,346***	0,221***	0,243**
Картофель	0,109	0,324***	0,277***	0,114*	0,317***	0,499***

\*p<0,05; \*\*p<0,01; \*\*\*p<0,001

– у 54% участников, у остальных 46% его уровень был в пределах нормы или чуть ниже (табл. 1). Следует иметь в виду, что железо может попадать в волосы не только из внутренних источников, но и извне, например, с водой с высоким содержанием железа. Кроме того, на концентрацию всех микроэлементов в волосах, в том числе и железа, оказывает влияние применение красок, шампуней и других косметических средств. Концентрация железа в волосах не зависит от возраста и пола [50].

Таким образом, люди, проживающие в Челябинске в значительной степени подвержены воздействию таких элементов, как железо и медь.

Для выявления связи между концентрацией ТМ в волосах участников и кардиометаболическим синдромом, а также содержанием ТМ в окружающей среде (бытовой пыли) и продуктах питания (картофель) был проведён корреляционный анализ. Результаты представлены в таблице 2.

Анализ результатов исследования показал статистически значимую связь между риском возникновением КМС и содержанием меди, цинка, кадмия и свинца в волосах человека. В наибольшей степени на риски возникновения группы связанных с КМС состояний, включающих болезни сердца, инсульт и диабет, влияет содержание в волосах цинка, меди и свинца. Токсичность свинца хорошо известна [1]. Установлена его связь с сердечно-сосудистыми заболеваниями (например, гипертонией, атеросклерозом) [43]. То, что она является важным фактором развития КМС, указывает на необходимость мониторинга свинца в городской среде и вызывает настороженность. Микроэлементы медь и цинк необходимы для многих функций организма [52]. Однако в избытке они токсичны [2]. Антропогенное загрязнение в городах в городах может привести к опасному нарушению баланса цинка и меди в организме. Дисбаланс в соотношении Zn/Cu приводит к сердечно-сосудистому риску [24].

Уровни всех металлов в волосах значимо коррелируют с их содержанием в пыли. Это говорит о высокой биодоступности металлов, содержащихся в пыли помещений города Челябинска и о ее опасности. Также для всех металлов, кроме железа, обнаружена значимая корреляция между содержанием в волосах и картофеле, т. есть прямая связь между содержанием ТМ в

волосах и в продуктах питания. Полученные данные свидетельствуют о том, что на кардиометаболическое здоровье городского населения негативно влияет хроническое, кумулятивное воздействие ТМ, поступающих из непосредственного окружения людей (воздух/пыль и продукты питания). Интересно, что железо в этом смысле является исключением, возможно потому, что уровень железа в организме регулируется более жестко (например, путем контроля всасывания в кишечнике) по сравнению с другими металлами [16]. Поэтому потребление железа с пищей оказывает меньшее прямое влияние на состояние волос. В целом прослеживается путь от загрязнения окружающей среды (пыль и почва как потенциальный источник металлов в картофеле) до воздействия на организм человека (при вдыхании и употреблении с пищей), что приводит к негативным последствиям для здоровья. Исследование показало возможность использовать анализ ТМ в волосах в качестве инструмента мониторинга загрязнения окружающей среды и оценки рисков для общественного здоровья.

## Заключение

Показано, что анализ волос человека является практическим способом оценки воздействия тяжёлых металлов на здоровье людей, проживающих на антропогенно нарушенных территориях, каковым является крупный промышленный центр. В волосах людей, проживающих в городе Челябинске, были обнаружены повышенные концентрации ТМ, таких как медь и железо, превышающие установленные референсные значения. Корреляционный анализ выявил статистически значимые связи между риском возникновением КМС и содержанием некоторых ТМ в волосах, а также между содержанием ТМ в пыли и картофеле и в волосах участников. Это можно объяснить тем, что токсичные металлы сохраняются в окружающей среде и могут мигрировать от источника в организм человека. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности изучения уровней ТМ в других биосубстратах, например в ногтях.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00030, <https://rscf.ru/project/25-27-00030>

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Григорьева АА, Миронова ГЕ. Токсическое воздействие свинца на организм человека (обзор литературы). Гигиена и санитария. 2025;104(6):778-80.
2. Копач АЕ, Федорив ОЕ, Мельник НА. Эффекты влияния меди и цинка на живые организмы (обзор литературы). Гигиена и санитария. 2021;100(2):172-7.

3. Рафикова ЮС, Семенова ИН, Хасанова РФ, Суюндуков ЯТ. Уровни содержания кадмия и свинца в волосах населения Зауральской зоны Республики Башкортостан. Экология человека. 2020;1:17-24.
4. Скальный АВ. Референсные значения концентрации химических элементов в волосах, полученные методом ИСПАЭС (АНО Центр биотической медицины). Микроэлементы в медицине. 2003;4(1):55-6.
5. Скальный АВ, Скальная МГ, Лакарова ЕВ, Ломакин ЮВ, Шарипов МВ. Методы исследования элементного состава организма: теоретические и прикладные аспекты. Микроэлементы в медицине. 2012;13(3):14-8.
6. Шилов ВВ, Маркова ОЛ, Кузнецова АВ. Биомониторинг воздействия вредных химических веществ на основе современных биомаркеров. Обзор литературы. Гигиена и санитария. 2019;98(6):591-6.
8. Ali MU, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Abbas Q, Munir MAM, Irshad S. Biomonitoring and health risks assessment of trace elements in various age- and gender-groups exposed to road dust in habitable urban-industrial areas of Hefei, China. Environ Poll. 2019;244:809-17.
9. Alissa EM, Ferns GA. Heavy metal poisoning and cardiovascular disease. J Toxicol. 2011;870125. doi: 10.1155/2011/870125.
10. Amini H, Hoodaji M, Najafi P. Evaluation of some tree species for heavy metal biomonitoring and pollution tolerance index in Isfahan urban zone. Afr J Biotechnol. 2011;10(84):19547-50.
11. Aničić Urošević M, Vuković G, Vasić P, Jakšić T, Nikolić D, Krivanj S, Popović A. Environmental implication indices from elemental characterisations of collocated topsoil and moss samples. Ecol Indic. 2018;90:529-39.
12. Bargagli R, Monaci F, Borghini F, Bravi F, Agnorelli C. Mosses and lichens as biomonitor of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy. Environ Poll. 2022;116(2):279-87.
13. Bell DSH. Riceabetes: Is the association of type 2 diabetes with rice intake due to a high carbohydrate intake or due to exposure to excess inorganic arsenic? J Postgrad Med. 2015;127(8):781-2.
14. Bolshunova T, Rikhvanov L, Mezhibor A, Zhorniyak L, Baranovskaya N, Eremina E. Biogeochemical characteristics of epiphytic lichen *lobaria pulmonaria* of the Barguzin nature reserve (The republic of Buryatia, Russia). J Environ Eng Landsc Manag. 2018;26(2):120-7.
15. Chen X, Xia X, Zhao Y, Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. J Hazard Mater. 2010;181(1-3):640-6.
16. Ems T, St Lucia K, Huecker MR. Biochemistry of Iron Absorption. StatPearls Publishing; 2022.
17. Eqani SAMAS, Tanveer ZI, Qiaoqiao C, Cincelili A, Saqib Z, Mulla SI, Ali N, Katsoyiannis IA, Shafqat MN, Shen H. Occurrence of selected elements (Ti, Sr, Ba, V, Ga, Sn, Tl, and Sb) in deposited dust and human hair samples: implications for human health in Pakistan. Environ Sci Poll Res, 2018;25(13):12234-45.
18. Franceschini N, Fry RC, Balakrishnan P, Navas-Acien A, Oliver-Williams C, Howard AG, Cole SA, Haack K, Lange EM, Howard BV, Best LG, Francesconi KA, Goessler W, Umans JG, Tellez-Plaza M. Cadmium body burden and increased blood pressure in middle-aged American Indians: the Strong Heart Study. J Hum Hypertens. 2017;31(3):225-30.
19. Grau-Perez M, Zhao J, Pierce B, Francesconi KA, Goessler W, Zhu Y, An Q, Umans J, Best L, Cole

**Общий список литературы / Reference List**

1. Grigorieva AA, Mironova GE. [Toxic effects of lead on the human body (literature review)]. Hygiene and Sanitation. 2025;104(6):778–780. (In Russ).
2. Kopach AYe, Fedoriv OYe, Melnyk NA. [Effects of the influence of copper and zinc on living organisms (literature review)]. Gigiyena i Sanitariya. 2021;100(2):172-7. (In Russ).
3. Rafikova YuS., Semenova IN, Khasanova RF, Suyundukov YaT. [Cadmium and lead concentrations in human hair in the Trans-Urals Region of Bashkortostan Republic]. Ekologiya Cheloveka. 2020;1:17-24. (In Russ).
4. Skalny AV. [Reference values of the concentrations of chemical elements in hair obtained by the ICP-AES method (ANO Center for Biotic Medicine)]. Mikroenementy v Meditsyne. 2003;4(1):55-6. (In Russ).
5. Skalny AV, Skalnaya MG, Lakarova YeV, Lomakin YuV, Sharipov MV. [Methods of studying the elemental composition of an organism: theoretical and applied aspects]. Mikroenementy v Meditsyne. 2012;13(3):14-8. (In Russ).
6. Shilov VV, Markova OL, Kuznetsov AV. [Biomonitoring of the influence of harmful chemicals using modern biomarkers. Literature review]. Gigiyena i Sanitariya. 2019;98(6):591-6. (In Russ).
7. Ali MU, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Abbas Q, Munir MA. A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. Environ Geochem Health. 2019;41:1131-62.
1. Grigorieva AA, Mironova GE. [Toxic effects of lead on the human body (literature review)]. Hygiene and Sanitation. 2025;104(6):778–780. (In Russ).
2. Kopach AYe, Fedoriv OYe, Melnyk NA. [Effects of the influence of copper and zinc on living organisms (literature review)]. Gigiyena i Sanitariya. 2021;100(2):172-7. (In Russ).
3. Rafikova YuS., Semenova IN, Khasanova RF, Suyundukov YaT. [Cadmium and lead concentrations in human hair in the Trans-Urals Region of Bashkortostan Republic]. Ekologiya Cheloveka. 2020;1:17-24. (In Russ).
4. Skalny AV. [Reference values of the concentrations of chemical elements in hair obtained by the ICP-AES method (ANO Center for Biotic Medicine)]. Mikroenementy v Meditsyne. 2003;4(1):55-6. (In Russ).
5. Skalny AV, Skalnaya MG, Lakarova YeV, Lomakin YuV, Sharipov MV. [Methods of studying the elemental composition of an organism: theoretical and applied aspects]. Mikroenementy v Meditsyne. 2012;13(3):14-8. (In Russ).
6. Shilov VV, Markova OL, Kuznetsov AV. [Biomonitoring of the influence of harmful chemicals using modern biomarkers. Literature review]. Gigiyena i Sanitariya. 2019;98(6):591-6. (In Russ).
7. Ali MU, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Abbas Q, Munir MA. A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. Environ Geochem Health. 2019;41:1131-62.
8. Ali MU, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Abbas Q, Munir MAM, Irshad S. Biomonitoring and health risks assessment of trace elements in various age- and gender-groups exposed to road dust in habitable urban-industrial areas of Hefei, China. Environ Poll. 2019;244:809-17.
9. Alissa EM, Ferns GA. Heavy metal poisoning and cardiovascular disease. J Toxicol. 2011;870125. doi: 10.1155/2011/870125.
10. Amini H, Hoodaji M, Najafi P. Evaluation of some tree species for heavy metal biomonitoring and pollution tolerance index in Isfahan urban zone. Afr J Biotechnol. 2011;10(84):19547-50.
11. Aničić Urošević M, Vuković G, Vasić P, Jakšić T, Nikolić D, Krivanj S, Popović A. Environmental implication indices from elemental characterisations of collocated topsoil and moss samples. Ecol Indic. 2018;90:529-39.
12. Bargagli R, Monaci F, Borghini F, Bravi F, Agnorelli C. Mosses and lichens as biomonitor of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy. Environ Poll. 2022;116(2):279-87.
13. Bell DSH. Riceabetes: Is the association of type 2 diabetes with rice intake due to a high carbohydrate intake or due to exposure to excess inorganic arsenic? J Postgrad Med. 2015;127(8):781-2.
14. Bolshunova T, Rikhvanov L, Mezhibor A, Zhorniyak L, Baranovskaya N, Eremina E. Biogeochemical characteristics of epiphytic lichen *lobaria pulmonaria* of the Barguzin nature reserve (The republic of Buryatia, Russia). J Environ Eng Landsc Manag. 2018;26(2):120-7.
15. Chen X, Xia X, Zhao Y, Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. J Hazard Mater. 2010;181(1-3):640-6.
16. Ems T, St Lucia K, Huecker MR. Biochemistry of Iron Absorption. StatPearls Publishing; 2022.
17. Eqani SAMAS, Tanveer ZI, Qiaoqiao C, Cincelili A, Saqib Z, Mulla SI, Ali N, Katsoyiannis IA, Shafqat MN, Shen H. Occurrence of selected elements (Ti, Sr, Ba, V, Ga, Sn, Tl, and Sb) in deposited dust and human hair samples: implications for human health in Pakistan. Environ Sci Poll Res, 2018;25(13):12234-45.
18. Franceschini N, Fry RC, Balakrishnan P, Navas-Acien A, Oliver-Williams C, Howard AG, Cole SA, Haack K, Lange EM, Howard BV, Best LG, Francesconi KA, Goessler W, Umans JG, Tellez-Plaza M. Cadmium body burden and increased blood pressure in middle-aged American Indians: the Strong Heart Study. J Hum Hypertens. 2017;31(3):225-30.
19. Grau-Perez M, Zhao J, Pierce B, Francesconi KA, Goessler W, Zhu Y, An Q, Umans J, Best L, Cole

- SA, Navas-Acien A, Tellez-Plaza M. Urinary metals and leukocyte telomere length in American Indian communities: The Strong Heart and the Strong Heart Family Study. *Environ Pollut.* 2019;246:311-8.
20. Hou S, Zheng N, Tang L, Ji X, Li Y, Hua X. Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018. *Environ Int.* 2019;128:430-7.
  21. Huang L, Liu L, Zhang T, Zhao D, Li H, Sun H, Kinney PL, Pitiranggon M, Chillrud S, Ma LQ, Navas-Acien A, Bi J, Yan B. An interventional study of rice for reducing cadmium exposure in a Chinese industrial town. *Environ Int.* 2019;122:301-9.
  22. Ivanova ES, Shuvalova OP, Eltsova LS, Komov VT, Kornilova AI. Cardiometabolic risk factors and mercury content in hair of women from a territory distant from mercury-rich geochemical zones (Cherepovets city, Northwest Russia). *Environ Geochem Health.* 2021;43(11):4589-99.
  23. Kaplan B, Sussan T, Rule A, Moon K, Grau-Perez M, Olmedo P, Chen R, Carkoglu A, Levshin V, Wang L, Watson C, Blount B, Calafat AM, Jarrett J, Caldwell K, Wang Y, Breysse P, Strickland P, Cohen J, Biswal S, Navas-Acien A. Waterpipe tobacco smoke: Characterization of toxicants and exposure biomarkers in a cross-sectional study of waterpipe employees. *Environ Int.* 2019;127:495-502.
  24. Kerkadi A, Raïq H, Prince MS, Bader L, Soltani A, Agouni A. A cross-sectional analysis of zinc and copper levels and their relationship to cardiovascular disease risk markers in Qatar biobank participants. *Front Cardiovasc Med.* 2024;10:1305588. doi:10.3389/fcvm.2023.1305588.
  25. Lee J, Lee S, Bae G. A review of the association between air pollutant exposure and allergic diseases in children. *Atmos. Pollut Res.* 2014;5:616-29.
  26. Lewington S, Clarke R, Qizilbash N, Peto R, Collins R. Age-specific relevance of usual blood pressure to vascular mortality: A meta-analysis of individual data for one million adults in 61 prospective studies. *Lancet.* 2002;360(9349):1903-13.
  27. Longnecker MP, Daniels JL. Environmental contaminants as etiologic factors for diabetes. *Environ Health Perspect.* 2001;109(6):871-6.
  28. Ma M, Li S, Jin H, Zhang Y, Xu J, Chen D, Kuimin C, Yuan Z, Xiao C. Characteristics and oxidative stress on rats and traffic policemen of ambient fine particulate matter from Shenyang. *Sci Total Environ.* 2015;526:110-5.
  29. Mazur Z, Radziemska M, Fronczyk J, Jeznach J. Heavy metal accumulation in bioindicators of pollution in urban areas of northeastern Poland. *Fresenius Environ Bull.* 2015;24(1A):16-223.
  30. Memon ZM, Yilmaz E, Shah AM, Sahin U, Kazi TG, Devrajani BR, Soylak M. Trace elements in blood samples of smoker and nonsmoker active pulmonary tuberculosis patients from Jamshoro, Pakistan. *Environ Sci Poll Res.* 2017;24(34):26513-20.
  31. Mordukhovich I, Wright RO, Hu H, Amarasinghe C, Baccarelli A, Litonjua A, Sparrow D, Vokonas P, Schwartz J. Associations of toenail arsenic, cadmium, mercury, manganese, and lead with blood pressure in the normative aging study. *Environ Health Perspect.* 2012;120(1):98-104.
  32. Olmedo P, Grau-Perez M, Fretts A, Tellez-Plaza M, Gil F, Yeh F, Umans JG, Francesconi KA, Goessler W, Franceschini N, Lee ET, Best LG, Cole SA, Howard BV, Navas-Acien A. Dietary determinants of cadmium exposure in the Strong Heart Family Study. *Food Chem Toxicol.* 2017;100:239-46.
  33. Pajak M, Halecki W, Gaśiorek M. Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach. *Chemosphere.* 2017;168:851-9.
  34. Pappas RS. Toxic elements in tobacco and in cigarette smoke: Inflammation and sensitization. *Metallomics.* 2011;3(11):1181-98.
  35. Pata IMC, Bălan CD, Pata SM, Macoveanu M. Passive biomonitoring of atmospheric pollution with heavy metals using native epigeic moss. *Environ Eng Manag J.* 2009;8(5):1281-6.
  36. Pata IMC, Pata SM, Macoveanu M. Biomonitoring of atmospheric pollution of Fe and Zn using native epigeic mosses. *Environ Eng Manag J.* 2010;9(9):1217-25.
  37. Peters JL, Perlstein TS, Perry MJ, McNeely E, Weuve J. Cadmium exposure in association with history of stroke and heart failure. *Environ Res.* 2010;110(2):199-206.
  38. Rehman U, Khan S, Muhammad S. Associations of potentially toxic elements (PTEs) in drinking water and human biomarkers: a case study from five districts of Pakistan. *Environ Sci Poll Res.* 2018;25(28):27912-23.
  39. Rodrigues JLG, Bandeira MJ, Araújo CFS, Dos Santos NR, Anjos ALS, Koin NL, Pereira LC, Oliveira SSP, Mergler D, Menezes-Filho JA. Manganese and lead levels in settled dust in elementary schools are correlated with biomarkers of exposure in school-aged children. *Environ Poll.* 2018;236:1004-13.
  40. Safari M, Ramavandi B, Sanati AM, Sorial GA, Hashemi S, Tahmasebi S. Potential of trees leaf/bark to control atmospheric metals in a gas and petrochemical zone. *J Environ Manag.* 2018;222:12-20.

41. Sawidis T, Breuste J, Mitrovic M, Pavlovic P, Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environ Poll.* 2011;159(12):3560-70.
42. Shukla S, Mbingwa G, Khanna S, Dalal J, Sankhyan D, Malik A, Badhwar N. Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environ Nanotechnol Monit Manag.* 2023;20:100857. doi:10.1016/j.enmm.2023.100857.
43. Tellez-Plaza M, Guallar E, Navas-Acien A. Environmental metals and cardiovascular disease. *Brit Med J.* 2018;362:3435. doi:10.1136/bmj.k3435.
44. Tibuakuu M, Jones MR, Navas-Acien A, Zhao D, Guallar E, Gassett AJ, Sheppard L, Budoff MJ, Kaufman JD, Michos ED. Exposure to ambient air pollution and calcification of the mitral annulus and aortic valve: The multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA). *Environ Health.* 2017;16(1):133. doi:10.1186/s12940-017-0346-x.
45. Ubaid Ali M, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Irshad S, Ahmed R, Hussain M, Rashid A. Evaluation of floor-wise pollution status and deposition behavior of potentially toxic elements and nanoparticles in air conditioner dust during urbanistic development. *J Hazard Mater.* 2019;365:186-95.
46. Velmurugan G, Swaminathan K, Veerasekar G, Purnell JQ, Mohanraj S, Dhivakar M, Avula AK, Cherian M, Palaniswami NG, Alexander T, Pradeep T. Metals in urine in relation to the prevalence of pre-diabetes, diabetes and atherosclerosis in rural India. *Occup Environ Med.* 2018;75(9):661-7.
47. Welch B, Smit E, Cardenas A, Hystad P, Kile ML. Trends in urinary arsenic among the U.S. population by drinking water source: Results from the National Health and Nutritional Examinations Survey 2003–2014. *Environ Res.* 2018;162:8-17.
48. Williams JR. *Medical Ethics Manual.* 3rd ed. Ferney-Voltaire (France): World Medical Association; 2015.
49. Yang YW, Liou SH, Hsueh YM, Lyu WS, Liu CS, Liu HJ, Chung MC, Hung PH, Chung CJ. Risk of Alzheimer's disease with metal concentrations in whole blood and urine: A case-control study using propensity score matching. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2018;356:8-14.
50. Zhang T, Ruan J, Zhang B, Lu S, Gao C, Huang L, Bai X, Xie L, Gui M, Qiu RL. Heavy metals in human urine, foods and drinking water from an e-waste dismantling area: Identification of exposure sources and metal-induced health risk. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;169:707-13.
51. Zhang Y, Xu C, Fu Z, Shu Y, Zhang J, Lu C, Mo X. Associations between total mercury and methyl mercury exposure and cardiovascular risk factors in US adolescents. *Environ Sci Pollut Res.* 2018;25(7):6265-72.
52. Zhang Z, Zhao S, Wu H, Qin W, Zhang T, Wang Y, Tang Y, Qi S, Cao Y, Gao X. Cross-sectional study: Relationship between serum trace elements and hypertension. *J Trace Elem Med Biol.* 2022;69:126893. doi:10.1016/j.jtemb.2021.126893.
53. Zhao LS, Hu GR, Yan Y, Yu RL, Cui JY, Wang XM, Yan Y. Source apportionment of heavy metals in urban road dust in a continental city of eastern China: Using Pb and Sr isotopes combined with multivariate statistical analysis. *Atmos Environ.* 2019;201:201-11.



&gt;





Подписано в печать 17.12.2025.

Дата выхода в свет 23.12.2025.

Отпечатано в ООО «Типография Лесник»

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

Тел.: +7 (812) 649-73-14.

Тираж 700 экз.

Цена свободная

Адрес издателя и редакции:

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

Учредитель: Фонд научных исследований "XXI век"

Главный редактор: Розенберг Геннадий Самуилович