



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



<http://ecopri.ru>

<http://petsu.ru>

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 4 (58). Декабрь, 2025

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugotek
А. В. Сони́на

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



Содержание № 4. 2025

От редакции

Итоги 2025

3

Аналитический обзор

Сырчина Н. В.,
Пилип Л. В.

Стратегия использования защитных лесных насаждений для эффективного рассеивания запаха от животноводческих комплексов (обзор)

4–18

Оригинальные исследования

Горбунов Р. П.

*Особенности локальной морфометрической изменчивости личинок хирономид на примере *Einfeldia ragana* (Meigen, 1838) (Diptera: Chironomidae)*

19–30

Жаркова Н. Н.,
Болтовская А. С.

Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани и печени различных видов промысловых рыб реки Иртыш (Омская область)

31–42

Ивичева К. Н.,
Филоненко И. В.,
Комарова А. С.

Оценка качества вод притоков реки Сухоны (Вологодская область) по показателям зообентоса

43–56

Киселёва А. Г.,
Пшеничникова Н. Ф.,
Родникова И. М.,
Юрченко С. Г.

Геоэкологическое состояние экотропы «Седанка» (г. Владивосток)

57–68

Коновалов Д. С.

Сезонная динамика структуры пелагического зоопланктона Кондопожского залива Онежского озера

69–81

Королёв А. Н.

Агроэкологические особенности поведения ртуты и мышьяка в системе «почва – растение» в результате применения органических удобрений

82–96

Штефуряк А. В.,
Михалап С. Г.,
Васильева Е. С.

Оценка площади зарастания гелофитами крупных заливов озера Ильмень с использованием данных дистанционного зондирования Земли

97–111

Методы экологических исследований

Марфицына Н. А.,
Коросов А. В.

Использование библиотеки Keras для дешифрования местообитаний животных методами глубокого обучения

112–129

Синописис

Коросов А. В.

Специальные методы биометрии

130



Выпуск № 4

От редакции

ИТОГИ 2025

Уважаемые коллеги!

Настроение в уходящем году определяют два события.

Ушел из жизни выдающийся биолог, чл.-корр. РАН, Эрнест Викторович Ивантер – вдохновитель, организатор и член редакции нашего журнала. Поскольку многие члены редколлегии – ученики Эрнеста Викторовича, журнал будет стремиться сохранить заложенные им традиции экологической школы высокого уровня.

Журнал вошел в «[Белый список](#)». Продолжаем работу.

География публикаций остается широкой; в этом году мы опубликовали статьи авторов из 24 городов России и ближнего зарубежья: Ашгабат (Туркменистан), п. Борок (Ярославская обл.), Вологда, Владивосток, Казань, Киров, Кострома, Красновишерск, Махачкала, Москва, Мурманск, Нижний Новгород, Новосибирск, Обнинск, Петрозаводск, Псков, Самара, с. Бахилова Поляна (Самарская обл.), Санкт-Петербург, Сыктывкар, Томск, Тюмень, Тольятти, Уссурийск, Хабаровск, Челябинск, Южно-Сахалинск, Ярославль.

Для оценки этих статей мы приглашали специалистов, работающих в российских научных учреждениях из 33 городов: Апатиты, Астрахань, Барнаул, п. Борок (Ярославская обл.), Воронеж, Волгоград, п. Вяткино (Владимирская обл.), Екатеринбург, Ижевск, Йошкар-Ола, Казань, Киров, Краснодар, Красноярск, Мурманск, Нальчик, Нижний Новгород, Новосибирск, Пермь, Петрозаводск, Ростов-на-Дону, п. Садовый (Татарстан), Самара, Саратов, Санкт-Петербург, Сочи, Сыктывкар, Тамбов, Тюмень, Уфа, Уссурийск, Хабаровск, Чита.

Мы искренне признательны нашими рецензентам за большой объем работы, добровольно выполненной ими, который, в конечном итоге, и определяет статус нашего журнала. В этом году нам помогали 68 специалистов (кроме членов редколлегии): Безматерных Д.М., Бондарева В.В., Бородулина Г.С., Вершинин В.Л., Воскресенская О.Л., Воякина Е.Ю., Ганшук С.В., Гапонов С.П., Головатюк Л.В., Горбач В.В., Гулий О.И., Данилов Р.Ю., Денисов Д.Б., Деревенская О.Ю., Дуленин А.А., Ермолаева О.Ю., Ершова Т.С., Жукова Е.А., Загайнова А.В., Зайцев Г.А., Зобков М.Б., Ивин В.В., Идрисов И.Р., Коваль Е.В., Кремнева О.Ю., Криксунов Е.А., Кубрина Л.В., Куклин А.П., Кулагина В.И., Кутенков А.П., Кутявина Т.И., Лада Г.А., Литвинская С.А., Лотиев К.Ю., Ляпков С.М., Макаева А.Р., Марковская Е.Ф., Марковский А.В., Мацишина Н.В., Могилевская И.В., Моисеева Т.А., Мотылева С.М., Новиков М.А., Околелова А.А., Павлов А.В., Петров К.М., Поздеев И.В., Попова И.С., Прохоренко Н.Б., Равкин Ю.С., Русакова И.В., Сазанова М.Л., Сидорова Н.А., Скворцов В.В., Соловьев С.А., Тамахина А.Я., Тарасова О.В., Ткаченко О.В., Толстиков А.В., Трофимов А.Г., Холмогорова Н.В., Цхай Ж.Р., Черлин В.А., Четанов Н.А., Шаров А.Н., Шихов А.Н., Шишкина Д.Ю., Шурганова Г.В., Яныгина Л.В.

Всех авторов, рецензентов и читателей мы поздравляем с Новым годом и желаем добиваться новых научных достижений, в том числе с помощью нашего журнала!

*С неизменной готовностью к сотрудничеству,
редколлегия электронного журнала «Принципы экологии»*



УДК 579.64:676.034.81

СТРАТЕГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАССЕИВАНИЯ ЗАПАХА ОТ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ (ОБЗОР)

СЫРЧИНА
Надежда Викторовна

кандидат химических наук, ФГБОУ ВО Вятский государственный университет, г. Киров, ул. Московская, 36, nvms1956@mail.ru

ПИЛИП
Лариса Валентиновна

кандидат ветеринарных наук, ФГБОУ ВО Вятский государственный агротехнологический университет, г. Киров, Октябрьский проспект, 133, pilip_larisa@mail.ru

Ключевые слова:
защитные лесные
насаждения
животноводческие
комплексы
запах
контроль запахового
загрязнения
рассеивание запаха
стратегия борьбы с
запахом

Аннотация: Запаховое загрязнение окружающей среды представляет одну из наиболее актуальных проблем качества воздуха при ведении интенсивного животноводства. На сегодняшний день существует несколько стратегий борьбы с неприятными запахами. Для поиска информации применяли сервисы eLIBRARY, КиберЛенинка, Scopus, Google Scholar, Web of Science, Академия Google, «Scholar.ru». Основу лингвистического моделирования предметного поля составляли с использованием ключевых слов. Эффективное управление запахами от животноводческих комплексов может быть достигнуто за счет внедрения технологии использования лесных защитных насаждений (искусственно созданных массивов из деревьев и кустарников, предназначенных для защиты сельскохозяйственных земель и объектов инфраструктуры от неблагоприятных воздействий, в том числе запаховой нагрузки). Лесные защитные насаждения в этом случае действуют как барьеры, уменьшающие скорость и изменяющие направление ветра, что приводит к эффективному рассеиванию (дисперсии) запаха. Это происходит благодаря физическому перехвату и улавливанию газов и аэрозольных частиц; разбавлению концентрированного запаха с подветренной стороны; осаждению на землю пыли и других аэрозолей из-за снижения скорости ветра; биологическому поглощению (ассимиляции) химических компонентов запаха после перехвата; улучшению эстетического восприятия объектов животноводства и сельских ландшафтов. Проектирование лесных защитных полос должно соответствовать почвенно-климатическим условиям района и наличию посадочного материала, а кроме того, имеет ряд особенностей, акцентируемых в этой работе применительно к животноводческим объектам.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Е. В. Коваль

Рецензент: М. Л. Сазанова

Получена: 07 февраля 2025 года

Подписана к печати: 27 декабря 2025 года

Введение

Защита воздуха от загрязнения, т. е. предотвращение попадания в атмосферу соединений, способных причинить вред здоровью и окружающей среде, является важнейшим условием сохранения природных экосистем и обеспечения активного долголетия населения. В настоящее время перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны атмосферного воздуха РФ, включает 293 наименования (Распоряжение Правительства РФ..., 2023). Для многих из этих веществ характерен специфический неприятный запах (Сао et al., 2023; Сырчина и др., 2024). Неприятные запахи вызывают чувство дискомфорта, отвращения и раздражения. У людей, проживающих вблизи источников запаха, чаще регистрируются различные эмоциональные и соматические нарушения, в т. ч. астма, атопический дерматит, неврологические расстройства (Гошин и др., 2020; Иванова и др., 2020; Parada-Ulloa et al., 2024; Piccardo et al., 2022). Для минимизации негативных последствий запахового загрязнения необходимо внедрение комплекса мер, направленных на ограничение выбросов загрязняющих веществ промышленными, сельскохозяйственными и коммунальными предприятиями (Пилип, Сырчина, 2018; Сырчина, Пилип, 2021; Колеватых и др., 2022; Сырчина и др., 2023). Согласно данным Агентства по охране окружающей среды США (EPA), выгоды, полученные от реализации мероприятий по защите воздуха от загрязнения, превышают затраты в 30 раз (Benefits, 2011).

Высокий уровень эмиссии широкого спектра запахообразующих веществ (ЗОВ) характерен для животноводческих предприятий (Терентьев и др., 2019; Пилип, Сырчина, 2023). Источником неприятного запаха служат сами животные, корма, а также побочные продукты животноводства – навоз, навозные стоки, птичий помет (Пилип, Ашихмина, 2017; Пилип, 2020; Богданова, 2023). В процессе микробиологической деструкции побочных продуктов животноводства образуются H_2S , NH_3 , короткоцепочечные жирные кислоты, тиоспирты, тиозфиры, биогенные амины, спирты, фенолы, крезолы и многие другие соединения с весьма неприятным запахом (Hanajima et al., 2010; Ni et al., 2012; Marszałek et al., 2018; Woodbury, 2023). По имеющимся оценкам, объемы выбросов летучих органических соединений, NH_3 и H_2S

из свиноводческих комплексов достигают 0.4, 2.8 и 0.1 кг/год на одну свинью соответственно (Liu et al., 2014). От каждой коровы в год в атмосферу поступает примерно 8.6 кг NH_3 и 77 г H_2S (Shi et al., 2023). Ежегодное образование NH_3 в птичниках в среднем составляет 47 г на одну курицу (Bist et al., 2023). Соответствующие объемы выбросов вызывают существенное загрязнение окружающей среды. Согласно экспериментальным данным, содержания NH_3 в атмосферном воздухе на расстоянии 2 км от коровника на 320 скотомест достигает 0.55 мг/м³, H_2S – 0.10 мг/м³ (Второй и др., 2022), что значительно выше среднегодовых нормативов, установленных в СанПиН 1.2.3685-21 (0.04 мг/м³ для NH_3 и 0.002 мг/м³ для H_2S).

В настоящее время ведется активный поиск способов уменьшения концентрации ЗОВ в атмосферном воздухе вблизи животноводческих предприятий. Достижение необходимого результата может быть обеспечено за счет снижения эмиссии ЗОВ или за счет повышения эффективности их рассеивания (дисперсии) в нижних слоях атмосферы. Первое направление предполагает использование химических реагентов, сорбентов, биопрепаратов, кормовых добавок, способствующих иммобилизации ЗОВ или ограничивающих микробиологические процессы деструкции компонентов побочных продуктов животноводства. Второе направление ориентировано на устройство барьеров на пути ламинарного движения загрязненных потоков воздуха и создание турбулентности, приводящей к эффективному разбавлению загрязненного воздуха чистым. Хороший барьерный эффект и эффективную дисперсию ЗОВ могут обеспечить правильно организованные защитные лесные насаждения (ЗЛН). Технология обустройства ЗЛН для снижения запаховой нагрузки на окружающую среду отличается высокой экологичностью и полностью соответствует принципам зеленой экономики, однако в РФ данной технологии уделяется недостаточно внимания.

Цель работы – систематизировать и обобщить опубликованные данные, посвященные вопросам проектирования и обустройства защитных лесных насаждений на территориях животноводческих предприятий для снижения запаховой нагрузки на окружающую среду.

Аналитический обзор

Статья содержит обзор научной информации, посвященной проблеме обустрой-

ства ЗЛН для рассеивания запаха, источником которого являются животноводческие предприятия. В обзор включены результаты научных исследований, опубликованные в период с 1982 по 2025 г. в рецензируемых научных изданиях, материалах конференций, сборниках научных трудов, а также нормативные документы, устанавливающие общие принципы, правила и характеристики в сфере защиты атмосферного воздуха от загрязнения.

Для поиска информации применяли сервисы eLIBRARY, КиберЛенинка, Scopus, Google Scholar, Web of Science, Академия Google, «Scholar.ru». Основу лингвистического моделирования предметного поля составляли следующие ключевые слова: животноводство, побочные продукты животноводства, запах, дисперсия запаха, защитные лесные насаждения, а также ключевые слова из научных статей близкой тематики. Основное внимание в обзоре уделено таким вопросам, как перспективы применения ЗЛН для снижения запаховой нагрузки на окружающую среду, механизмы дисперсии запаха и технология обустройства ЗЛН.

Контроль запаха на предприятиях животноводства

Борьба с запаховым загрязнением окружающей среды предприятиями животноводства представляет весьма сложную задачу, что обусловлено высоким содержанием загрязняющих веществ в воздухе помещений для животных и на прилегающих территориях. Интенсивная эмиссия ЗОВ в основном обусловлена процессами микробиологической деструкции побочных продуктов животноводства, объемы образования которых значительно превосходят объемы выхода основной животноводческой продукции (Jayathilakan et al., 2012; Kostic et al., 2020).

Ужесточение нормативных требований к качеству атмосферного воздуха и низкая толерантность населения к наличию неприятных запахов повышают интерес к поиску технологических решений, позволяющих снизить концентрацию ЗОВ в приповерхностном слое тропосферы. Определенные положительные результаты удастся получить за счет оптимизации рациона животных; обработки побочных продуктов животноводства химическими реагентами, сорбентами, биопрепаратами; очистки отработанного воздуха от загрязняющих веществ; изоляции мест хранения и обработки побочных продуктов животноводства (например, обустройство

крытых лагун); повышения эффективности рассеивания ЗОВ в нижних слоях атмосферы; изменения гедонистического тона (маскировки) запаха (Hamilton, Ogejo, 2017; Cao et al., 2023; Park et al., 2024).

При выборе вариантов контроля запаха учитываются такие факторы, как особенности источника ЗОВ (места хранения побочных продуктов животноводства, помещения для животных, объекты землепользования), организация производства в условиях конкретного хозяйства, территориальное расположение предприятия и ландшафт, баланс затрат и экономической выгоды от внедрения технологии в практику. Некоторые представления о практической ценности тех или иных способов контроля запахового загрязнения позволяет получить анализ информации, характеризующий отношение американских производителей свинины к различным методам контроля запаха (таблица) (Kliebenstein et al., 2003).

Согласно результатам опросов, чаще всего животноводы отказывались от использования химических методов снижения эмиссии ЗОВ (озонирование, обработка навоза реагентами, использование кормовых добавок). Самые низкие доли неудовлетворенности достигаемым результатом и отказ от применения в практической деятельности получил метод обустройства ветроломных полос и сооружений.

В США разработана веб-программа планирования и проектирования растительных экологических буферов под названием VEB-Econ. Программа позволяет пользователям выбрать оптимальный видовой состав и местоположение рядов деревьев, оценивает общие годовые затраты на посадку деревьев и долгосрочное управление, а также любые альтернативные издержки и факторы в распределении затрат (Tyndall et al., 2018).

В РФ целесообразность создания ЗЛН на предприятиях животноводства обоснована в рекомендациях по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета (Мишуров, 2018).

Преимущества и недостатки защитных лесных насаждений для контроля запаха

Согласно ГОСТ 26462-85, защитное лесное насаждение представляет собой естественное или искусственное лесное насаждение для защиты природных, сельскохозяйственных, промышленных, коммунальных и транспортных объектов от неблагоприятно-

Удовлетворенность производителей свинины различными методами контроля запаха

Метод контроля запаха	Доля от числа опрошенных, %				
	Применяют или применяли метод	Удовлетворены	Безразличны	Не удовлетворены	Отказались от применения
Ветроломные (windbreaks) полосы и сооружения*	38.14	63.64	35.45	0.91	0.95
Подстилка	36.12	59.00	34.10	6.90	15.76
Глубокие навозные ямы	77.05	76.60	20.48	2.93	1.39
Лагуны	8.54	45.16	41.94	12.90	4.17
Сепарация	4.09	60.00	35.00	5.00	8.70
Компостирование навоза	20.28	65.69	26.47	7.84	13.16
Обработка навоза реагентами	42.70	23.36	44.39	32.24	54.17
Озонирование	1.78	0.00	62.50	37.50	70.00
Кормовые добавки	27.05	37.96	43.80	18.25	30.92
Внесение НС в почву	69.40	88.32	10.83	0.85	7.18

Примечание. Термины «Ветроломные полосы» (англ. windbreaks) и «защитные лесные насаждения» в контексте настоящей статьи используются как синонимы.

го воздействия природных и антропогенных факторов. Для искусственного ЗЛН в виде ленты рекомендовано название «лесная полоса» (ЛП). Полноценная ЛП представляет собой сложную биогеоценоотическую систему, выполняющую комплекс функций: ветроломную, снегораспределительную, стокорегулирующую, противоэрозионную, почвозащитную, эстетическую оздоровительную, рекреационную (Кулик, 2018; Nowak, 2002; Lin et al., 2007).

К основным преимуществам технологии создания ЗЛН (растительных экологических буферов) для поглощения и дисперсии ЗОВ можно отнести экологичность и экономичность (Hernandez et al., 2012; Mume, Workalemahu, 2021; Weninger et al., 2021). Хорошо известно, что ЗЛН действуют как барьеры, уменьшающие скорость и изменяющие направление ветра, что приводит к разбавлению (дисперсии) запаха. Лесные полосы обеспечивают визуальную изоляцию источников запаха, активно улавливают пыль, рассеивают и частично поглощают ЗОВ и парниковые газы, улучшают качество почвы и экологическую обстановку на территории размещения животноводческих предприятий (Patterson, Adizal, 2005; Kulshreshtha, Kort, 2009; Tyndall, Larsen, 2013; Ajami et al., 2019).

Большое влияние на функциональные характеристики ЛП оказывает ее структура (Wang et al., 2001; Zhou et al., 2005). Поскольку источники запаха (лагуны, компостные площадки, одноэтажные помещения для

животных) находятся вблизи поверхности почвы, а шлейф запаха имеет тенденцию распространяться в приповерхностном слое воздуха, ЛП даже небольшой высоты (6–12 м) могут быть эффективными для перехвата, разрушения и разбавления шлейфа. Достижимый результат существенно зависит от видового состава растений, а также высоты, пористости и ориентации ЛП по отношению к источнику запаха и розе ветров. Правильно спроектированные ЗЛН могут быть основным и даже единственным технологическим подходом к эффективному устранению запахов.

К недостаткам технологии создания ЗЛН следует отнести (Mize et al., 2008):

- значительный период времени для достижения растениями необходимых размеров. Деревьям должно быть не менее 3–5 лет, прежде чем будет замечен выраженный эффект;

- для размещения посадок необходимо значительное свободное пространство;

- за растениями в ЗЛН необходим квалифицированный уход (особенно в первые годы после посадки растений).

Следует отметить, что растения в насаждениях вокруг животноводческих ферм или комплексов часто не выдерживают нагрузки загрязняющих веществ и гибнут (Макарова, 2016).

Механизмы снижения запаха защитными лесными насаждениями

Анализ опубликованных работ позволяет выделить пять основных взаимосвязанных

факторов, с помощью которых ЗЛН могут смягчить неприятные запахи от животноводческих предприятий.

Физический перехват и улавливание газов, пыли и других аэрозольных частиц. Закрытые помещения для содержания животных (свиней, птиц и др.) обычно оборудованы мощными вентиляционными системами. Удаляемый из помещений отработанный воздух содержит значительное количество пыли, микроорганизмов и несвойственных чистому атмосферному воздуху газов (Богданова, 2023; Косимов, 2024). Пылевидные частицы являются сорбентами и переносчиками различных ЗОВ. Загрязненный воздух в большинстве случаев выбрасывается в атмосферу без предварительной очистки. В зависимости от складывающихся климатических условий «шлейфы» запаха могут перемещаться на значительные расстояния.

Растения, входящие в состав ЗЛН, благодаря веткам и развитой листовой поверхности, активно фильтруют потоки воздуха, удаляя часть пыли, газов и микроорганизмов. Наиболее эффективно улавливают пыль растения, имеющие сложную структуру поверхности, например, хвойные или деревья с покрытыми волосками или шероховатыми листьями (вяз, ольха, липа). Растения с кожистыми и гладкими листьями (например, тополь, клен, сирень) улавливают пыль менее эффективно. Нелистопадные хвойные породы, в отличие от листопадных деревьев и кустарников, способны улавливать пыль круглый год. Более молодые и небольшие деревья, благодаря большей плотности листвы, более эффективно удаляют твердые пылевидные частицы по сравнению с более крупными зрелыми экземплярами (Nowak, 2002; Liu et al., 2012; Radhapriya et al., 2012; Sharma et al., 2017).

Разбавление и рассеивание запаха с подветренной стороны защитной лесной полосы. Известно, что запах усиливается в стабильных атмосферных ночных условиях при скорости ветра от низкой до умеренной, когда приповерхностный воздух, загрязненный ЗОВ, не поднимается вверх, а остается у поверхности и распространяется почти ламинарным потоком над местностью в соответствии с ее рельефом. Большинство случаев возникновения запаха регистрируется в промежутках между 5–7 и 19–22 часами, что связано с относительно высокой активностью в жилых помещениях и стабильными атмосферными условиями (Jacobson et al., 2001).

Важную роль в распространении запаха играет и температура воздуха. При более высоких температурах улучшаются условия для анаэробного разложения органических отходов, при этом многие ЗОВ переходят в газообразное состояние. Сочетание теплой погоды и стабильных погодных условий в вечерние и утренние часы приводит к тому, что шлейф запаха может распространяться на расстояние более 3 км (National Pork..., 1995).

Защитные полосы способны поднимать часть шлейфа запаха над поверхностью, способствуя процессам разбавления и рассеивания. Когда ветер приближается к ряду деревьев, часть воздушного потока проходит сквозь растительность, часть – вокруг нее, а оставшаяся часть поднимается вверх и над растительностью. Подъем начинается на некотором расстоянии с наветренной стороны, обычно на расстоянии равном 2–5-кратной высоте защитной полосы. Чем выше барьер, тем выше подъем воздуха. Смешивание загрязненного воздуха с чистым приводит к снижению концентрации ЗОВ и уменьшению интенсивности запаха. Согласно расчетам, высокие барьеры вокруг навозных лагун могут сократить выбросы ЗОВ с подветренной стороны на 26–92 % для диапазона отношения расстояния между барьерами к высоте от 8 до 0.6 (Liu et al., 1996). Соответствующее сокращение во многом обусловлено предотвращением прохождения пылевидных частиц, способных сорбировать ЗОВ, над поверхностью лагуны. Благодаря этому снижаются риски переноса выделяемых из лагун ЗОВ с пылью в окружающую среду.

В результате выполненных в Канаде экспериментальных исследований (Lin et al., 2006) было установлено, что:

- лесные полосы с низкой оптической пористостью ($\approx 35\%$) создают более выраженный эффект снижения запаха (оптическая пористость является двумерной мерой пористости);

- ряд хвойных деревьев на расстоянии 15 м от источника запаха обеспечивает большую дисперсию запаха, чем ряд лиственных деревьев на том же расстоянии;

- ряд деревьев, расположенный ближе к источнику запаха, способствует более выраженной дисперсии запаха, чем ряд деревьев, расположенный дальше по ветру.

Осаждение на землю пыли и других аэрозолей из-за снижения скорости ветра. Изменения турбулентности воздуха и снижение скорости ветра создают условия,

при которых переносимые ветром частицы осаждаются ближе к источнику запаха, чем это было бы без ЗЛН. Характер турбулентности воздушных потоков вокруг ЛП является предметом многочисленных исследований. Установлено, что слишком плотные ЛП создают в подветренной зоне эффект стены, что снижает степень дисперсии. Более пористый барьер лучше рассеивает потоки воздуха. Эффект защиты от переноса пылевидных частиц достигает максимальных значений при пористости ЗЛН от 40 до 60 % (Torshizi et al., 2020; Chang et al., 2021).

Биосорбция запахообразующих веществ растениями. Биосорбция загрязняющих веществ растениями возможна путем диффузии газообразных или растворенных в воде веществ через открытые устьица или клеточные стенки растительных тканей. Согласно опубликованным данным, скорость биосорбции некоторых загрязняющих веществ (в частности SO_2) у хвойных растений выше, чем у лиственных (Elkiey et al., 1982).

Сорбции летучих органических веществ способствует липофильная кутикула листьев. Установлено, что особенно эффективно кутикула сорбирует летучие азотсодержащие соединения. Интенсивность сорбции усиливается при повышении относительной влажности воздуха и снижении давления паров вещества (Matyssek et al., 1995; Asman et al., 1998). Оба эти явления обычно происходят в подветренной тихой зоне ЗЛН. В зависимости от пористости ЛП относительная влажность в защищенных зонах обычно на 2–4 % выше, чем на открытых площадках. Температура в таких зонах также на несколько градусов выше, чем на открытой местности, что способствует процессам биосорбции. Активная биосорбция загрязняющих веществ характерна и для многочисленных групп микроорганизмов, обитающих на поверхности растений. Механизмы и эффективность биосорбционных процессов различных загрязняющих веществ в настоящее время активно изучаются (Gadd, 2009; Brazesh et al., 2021; Meena et al., 2021).

Анализ опубликованных данных дает основания сделать следующие обобщения (Tyndall et al., 2007):

- скорость биосорбции повышается по мере увеличения растворимости загрязняющих веществ в воде. На влажной поверхности растений скорость их удаления может увеличиваться в 10 раз;
- стрессовые состояния растений, обусловленные недостатком влаги и солнечного

света, препятствуют поглощению загрязняющих веществ;

- наиболее интенсивное поглощение загрязняющих веществ лиственной поверхностью наблюдается вблизи поверхности полого;

- скорость удаления загрязняющих веществ может линейно возрастать по мере увеличения их концентрации.

Улучшение эстетического восприятия объектов животноводства и сельских ландшафтов. Защитные лесные полосы разнообразят внешний вид сельскохозяйственных ландшафтов и делают сельскохозяйственные угодья визуально более привлекательными. Скрытые деревьями источники запаха меньше раздражают население, чем источники, находящиеся на виду (Grala et al., 2010; Tyndall, Larsen, 2013).

Оценка дисперсии запаха по ветру от естественной лесной полосы методом моделирования показала, что ЛП действительно изменила величину и направление скорости ветра, создав тем самым скачок давления по всей ее ширине. Этот скачок давления создает сильную турбулентность по ветру, образуя слой смешивания, способный усилить рассеивание запаха (Lin et al., 2009).

Проектирование лесных полос вблизи объектов животноводства

Создание ЛП является важным мероприятием в общем оздоровлении нарушенных природных комплексов, включая земли сельскохозяйственного назначения. Кроны деревьев задерживают и рассеивают осадки, подстилка защищает почву от разрушения, корни растений укрепляют грунт (Белюченко, 2020).

При проектировании ЛП следует учитывать почвенно-климатические условия региона и ассортимент доступного посадочного материала. Предпочтение отдается устойчивым к неблагоприятным факторам среды долгоживущим древесным породам, способным сформировать стабильные и долговечные насаждения (Семенютина, Терешкин, 2016). Состав лесных культур подбирают исходя из лесорастительных условий обустраиваемой территории и целевого назначения ЗЛН (Чернышов, 2015).

Большое значение имеют особенности корневой системы деревьев, поскольку расходящиеся в стороны корни могут повредить защитное покрытие внутренней поверхности лагун. Необходимо учитывать размеры зрелой растительности, чтобы выросшие деревья или кустарники не стали опасными.

Длина ЛП не должна быть меньше ширины источника неприятного запаха, поскольку шлейфы запаха в начале образования соответствуют ширине источника выбросов и могут расширяться по мере удаления от источника в зависимости от погоды и ландшафтных условий.

Важное значение для улавливания ЗОВ имеет обеспечение оптимальной плотности (пористости) ЛП. Уровень пористости должен обеспечивать такую интенсивность потока воздуха через ЛП, чтобы пылевидные частицы имели возможность контактировать с поверхностью растений и создавать внутреннюю турбулентность. Чрезмерно плотная полоса выталкивает основную часть воздушного потока вверх и через полосу, что снижает эффективность улавливания частиц (Ucar, Hall, 2001).

Общее осаждение частиц в ЛП определяется компромиссом между уровнем пористости, способствующей сквозному потоку воздуха, содержащего пылевидные частицы, и достаточной плотностью, способствующей контакту частиц с поверхностью деревьев. Имеются данные о том, что оптимальная пористость для улавливания пыли должна составлять 40–50 %. Следует отметить, что эти данные касаются только улавливания грубодисперсных частиц (пыли, капель). Для дисперсии содержащихся в воздухе молекул ЗОВ требуется обеспечивать более низкую пористость ЛП. В исследованиях (Lin et al., 2007) показано, что более плотные ЛП оказали большее влияние на снижение длины шлейфа запаха, чем менее плотные. Лесные полосы с оптической пористостью 0.55 не оказывали существенного влияния на распространение запаха. Необходимый уровень пористости может быть достигнут за счет регулирования ширины ЛП, видового состава и количества рядов древесной растительности.

Для обеспечения оптимального разбавления шлейфа запаха большое значение имеет не только пористость ЛП, но и ее высота, а также расстояние от источника запаха. Моделирование распространения запаха показывает, что эффективность дисперсии повышается при сокращении расстояния между источником и ЛП (Suzelle et al., 2011). Оптимальное расстояние между ЛП и источником запаха следует рассчитывать с учетом ландшафта конкретного участка, почвенно-

климатических условий, вида высаживаемых деревьев и/или кустарников.

Некоторые виды деревьев, которые не слишком эффективно улавливают пылевидные частицы, но быстро растут (например, тополь), могут быть весьма подходящими в качестве деревьев-нянь – деревьев, которые могут обеспечить быстрый набор высоты на время подрастания хвойных пород.

Имеются ограниченные эмпирические данные, свидетельствующие о том, что клиновидный пояс (например, несколько рядов деревьев и кустарников разной высоты), в котором самый низкий ряд обращен к преобладающему ветру, может «направлять» (выталкивать) воздушные потоки выше в атмосферу.

Заключение

Создание лесных насаждений для защиты атмосферного воздуха от запахового загрязнения является важным элементом в общей системе мероприятий, направленных на оздоровление экологической обстановки на территориях размещения животноводческих комплексов.

Такие вопросы, как оценка эффективности, дизайн и технологии обустройства защитных лесных насаждений для снижения запахового загрязнения окружающей среды, активно изучаются за рубежом. В публикациях отечественных ученых проблема обустройства защитных лесных насаждений для дисперсии запаха не находит должного отражения, что существенно затрудняет возможность их эффективного проектирования в почвенно-климатических условиях конкретных регионов РФ.

При обустройстве защитных лесных насаждений на территориях складирования и обработки побочных продуктов животноводства могут возникнуть определенные сложности, обусловленные ограниченностью площади участков, пригодных для их размещения, существенным загрязнением почвы, изменением естественных характеристик грунтов под влиянием антропогенного воздействия, ограниченным видовым составом древесной растительности, пригодной для создания защитных лесных насаждений в суровых почвенно-климатических условиях на нарушенных техногенно участках. Данные аспекты проблемы требуют целенаправленного изучения и комплексной оценки.

Библиография

- Белюченко И. С. Лесные полосы и их функционирование в аграрном ландшафте // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2020. Т. 16, № 2. С. 30–36.
- Богданова В. В. Проблемы свиноводческой деятельности, которые необходимо учитывать при проектировании и строительстве свинарников // Вестник науки. 2023. Т. 4, № 1 (58). С. 259–263.
- Второй В. Ф., Второй С. В., Базыкин В. И. Результаты исследований концентраций климатически активных газов в коровнике с беспривязным содержанием // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 4 (113). С. 114–120. DOI: 24412/2713-2641-2022-4113-114-120
- Гошин М. Е., Бударина О. В., Ингель Ф. И. Запахи в атмосферном воздухе: анализ связи с состоянием здоровья и качеством жизни взрослого населения города с развитой пищевой промышленностью // Гигиена и санитария. 2020. № 99 (12). С. 1339. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1339-1345
- Иванова С. В., Сковронская С. А., Гошин М. Е., Бударина О. В., Куликова А. З. Влияние запаха на физиологические, эмоциональные и когнитивные аспекты здоровья человека в экспериментальных условиях (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2020. № 99 (12). С. 1370. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1370-1375
- Кулик К. Н. Защитные лесные насаждения – основа экологического каркаса агротерриторий // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 4. С. 18–21.
- Колеватых Е. П., Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Трансформация микробиоты отходов животноводства под влиянием химических реагентов для устранения запаха // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 159–165. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165
- Қосимов Х. О. Загрязнения окружающей среды отходами сельскохозяйственных животных // Tadqiqotlar. 2024. Т. 30, № 1. С. 182–187.
- Макарова Н. М. Лесные мелиорации прифермских территорий и санитарные показатели атмосферного воздуха // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 4 (94). С. 191–195.
- Мишуров Н. П. Рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета // Техника и технологии в животноводстве. 2018. № 4 (32). С. 44–56.
- Пилип Л. В. Анализ экологических рисков отрасли свиноводства в Кировской области // Вестник Вятской ГСХА. 2020. № 1 (3). С. 1.
- Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Отходы свиноводческих комплексов – проблемы, пути решения // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XV Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. Книга 2. Киров: Вятский государственный университет, 2017. С. 180–183.
- Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Новые подходы к дезодорации свиного навоза // Иппология и ветеринария. 2018. № 4 (30). С. 99–106.
- Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Роль аммонификаторов в эмиссии аммиака из свиных навозных стоков // Известия КГТУ. 2023. № 68. С. 46–54. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-46-54
- Распоряжение Правительства РФ от 20 октября 2023 г. № 2909-р МОСКВА . URL: <http://static.government.ru/media/files/rlxcxWobSKewpJxZ7mdor2MXYlLukkdA.pdf> (дата обращения: 05.02.2025).
- Семенютина А. В., Терешкин А. В. Защитные лесные насаждения: анализ видового состава и научные основы повышения биоразнообразия дендрофлоры // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 99–104.
- Сырчина Н. В., Пилип Л. В. Влияние подкисления на эмиссию сероводорода в органических отходах свинокомплексов // Проблемы региональной экологии. 2021. № 4. С. 102–106. DOI: 10.24412/1728-323X-2021-4-102-106
- Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Основные подходы к снижению запахового загрязнения окружающей среды предприятиями животноводства (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 6–19. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-006-019
- Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Колеватых Е. П. Влияние гипохлорита натрия на микробиоту и запах навозных стоков // Поволжский экологический журнал. 2023. № 1. С. 107–116. DOI: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116
- Терентьев Ю. Н., Сырчина Н. В., Ашихмина Т. Я., Пилип Л. В. Снижение эмиссии запахообразующих веществ в условиях промышленных свиноводческих предприятий // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 113–120. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-113-120
- Чернышов М. П. Требования к искусственному лесовосстановлению в защитных лесах лесостепной зоны европейской части Российской Федерации // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2–1 (13–1). С. 153–157.
- Ajami A., Sanjay B. Shah, Lingjuan Wang-Li, Praveen Kolar. Windbreak Wall-Vegetative Strip System to

- Reduce Air Emissions from Mechanically Ventilated Livestock Barns: Part 2. Swine House Evaluation // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2019. Vol. 230. P. 1–28. DOI: 1007/s11270-019-4335-2
- Asman W. A. H., Sutton M. A., Schjorring J. K. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition // *New Phytologist*. 1998. Vol. 139, № 1. P. 27–48.
- Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990–2020. Report Documents and Graphics. EPA. Environmental Protection Agency, 2011. URL: <https://hepg.hks.harvard.edu/publications/benefits-and-costs-clean-air-act-1990-2020-report-documents-and-graphics> (дата обращения: 05.02.2025).
- Bist R. B., Subedi S., Chai L., Yang X. Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review // *Journal of Environmental Management*. 2023. № 328. Article № 116919. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116919
- Brazesh B., Mousavi S. M., Zarei M., Ghaedi M., Bahrani S., Hashemi S. A. Biosorption // *Interface Science and Technology*. Elsevier. 2021. Vol. 33. P. 587–628. DOI: 10.1016/B978-0-12-818805-7.00003-5
- Cao T., Zheng Y., Dong H. Control of odor emissions from livestock farms: A review // *Environmental Research*. 2023. Vol. 225. Article № 115545. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115545
- Chang X., Sun L., Yu X., Liu Z., Jia G., Wang Y., Zhu X. Windbreak efficiency in controlling wind erosion and particulate matter concentrations from farmlands // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021. Vol. 308. Article № 107269. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107269
- Elkiey T., Ormrod D. P., Marie B. Foliar sorption of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, and ozone by ornamental plants atmospheric pollutants // *Horticult Science*. 1982. Vol. 17, № 3. P. 358–360. DOI: 10.1016/0011-1839(82)90035-8
- Gadd G. M. Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*. 2009. Vol. 84, № 1. P. 13–28. DOI: 10.1002/jctb.1999
- Grala R. K., Tyndall J. C., Mize C. W. Impact of field windbreaks on visual appearance of agricultural lands // *Agroforestry systems*. 2010. Vol. 80. P. 411–422. DOI: 10.1007/s10457-010-9335-6
- Hamilton D. W., Ogejo J. A. Strategies to control farmstead odors // *Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University*. 2017. URL: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/print-publications/bae/strategies-to-control-farmstead-odors-bae-2905.pdf> (дата обращения: 12.09.2024).
- Hanajima D., Kuroda K., Morishita K. et al. Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting // *Bioresource technology*. 2010. Vol. 101, № 7. P. 2306–2310. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.026
- Hernandez G., Trabue S., Sauer T., Pfeiffer R., Tyndall J. Odor mitigation with tree buffers: Swine production case study // *Agriculture, ecosystems & environment*. 2012. Vol. P. 154–163. DOI: 10.1016/j.agee.2011.12.002
- Jacobson L. D., Guo H., Schmidt D. R., Nicolai R. E. Influence of weather condition on field evaluation of odor dispersions from animal production sites // *Livestock environment VI: Proceedings of the 6th International Symposium*. Louisville, Kentucky, USA, 2001. P. 679–686.
- Jayathilakan K., Sultana K., Radhakrishna K., Bawa A. S. Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review // *Journal of food science and technology*. 2012. Vol. 49, № 3. P. 278–293. DOI: 10.1007/s13197-011-0290-7
- Kostic B., Stevanovic G., Lutovac M., Lutovac B., Ketin S., Biocanin R. Animal manure and environment // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2020. Vol. 29, № 3. P. 1289–1296.
- Kliebenstein J. B., Loromer J., Larson B. Odor Control Methods Used by Iowa Pork Producers. Iowa State University. Department of Economics, 2003. URL: https://www.researchgate.net/profile/James-Kliebenstein/publication/5130904_ODOR_CONTROL_METHODS_USED_BY_IOWA_PORK_PRODUCERS/links/0912f5123aba20e4e8000000/ODOR-CONTROL-METHODS-USED-BY-IOWA-PORK-PRODUCERS.pdf (дата обращения: 12.09.2024).
- Kulshreshtha S., Kort J. External economic benefits and social goods from prairie shelterbelts // *Agroforestry Systems*. 2009. Vol. 75, № 1. P. 39–47. DOI: 10.1007/s10457-008-9126-5
- Lin X. J., Barrington S., Nicell J., Choiniere D., Vezina A. Influence of windbreaks on livestock odour dispersion plume in the field // *Agriculture, ecosystems & environment*. 2006. Vol. 116 (3). № 34. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.agee.2006.02.014
- Lin X. J., Barrington S., Nicell J. A., Choiniere D. Livestock Odour Dispersion as Affected by Natural Windbreaks // *Water Air and Soil Pollution*. 2007. Vol. 182, № 1. P. 263–273. DOI: 10.1007/s11270-007-9337-9
- Lin X. J., Barrington S., Gong G., Choiniere D. Simulation of odour dispersion downwind from natural windbreaks using the computational fluid dynamics standard k-ε model // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2009. Vol. 36, № 5. P. 895–910. DOI: 10.1139/S08-057
- Liu L., Guan D., Peart M. R. The morphological structure of leaves and the dust-retaining capability of afforested plants in urban Guangzhou, South China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2012. Vol. 19. P. 3440–3449.
- Liu Q., Bundy D. S., Hoff S. J. The effectiveness of using tall barriers to reduce odor emission // *Proceedings*

- of the International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations, Midwest Plan Service, Ames, Ia., 1996. P. 403–407.
- Liu Z., Powers W., Mukhtar S. A review of practices and technologies for odor control in swine production facilities // *Applied Engineering in Agriculture*. 2014. Vol. 30, № 3. P. 477–492.
- Marszałek M., Kowalski Z., Makara A. Emission of greenhouse gases and odorants from pig slurry-effect on the environment and methods of its reduction // *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2018. Vol. 25, № 3. P. 383–394.
- Matyssek R., Reich P., Oren R., Winner W. E. Response mechanisms of conifers to air pollutants // *Ecophysiology of coniferous forests*. Academic Press. 1995. P. 255–308. DOI: 10.1016/B978-0-08-092593-6.50014-1
- Meena M., Sonigra P., Yadav G. Biological-based methods for the removal of volatile organic compounds (VOCs) and heavy metals // *Environmental science and pollution research*. 2021. Vol. 28, № 3. P. 2485–2508.
- Mize C. W., Brandle J. R., Schoeneberger M. M., Bentrup G. Ecological development and function of shelterbelts in temperate North America // *Toward agroforestry design: An ecological approach*. 2008. P. 27–54.
- Mume I. D., Workalemahu S. Review on windbreaks agroforestry as a climate smart agriculture practices // *American Journal of Agriculture and Forestry*. 2021. Vol. 9, № 6. P. 342–347. DOI: 10.11648/j.ajaf.20210906.12
- National Pork Producers Council An executive summary: a review of literature on nature and control of odors from pork production facilities: a report prepared by Bioresource Engineering Department Oregon State University for the subcommittee of the National Pork Producers Council. 1995. URL: <http://www.mtcnet.net/~jdhogg/ozone/odor/odorlitreview.html> (дата обращения: 05.02.2025).
- Ni J. Q., Robarge W. P., Xiao C., Heber A. J. Volatile organic compounds at swine facilities: A critical review // *Chemosphere*. 2012. Vol. 89, № 7. P. 769–788.
- Nowak D. J. The effects of urban trees on air quality // *USDA forest service*. 2002. P. 96–102.
- Parada-Ulloa M., Bozo Marambio, Moreno-Leiva G., Vasquez-Burgos K. Social representations of odors: case study in the Ñuble region, Chile (2019–2023) // *Frontiers in Social Psychology*. 2024. Vol. 2. Article 1396536. DOI: 10.3389/frsps.2024.1396536
- Park M. K., Hwang T. K., Kim W., Jo Y. J., Park Y.J. Probiotic feed additives mitigate odor emission in cattle farms through microbial community changes // *Fermentation*. 2024. Vol. 10, № 9. Article № 473.
- Patterson P. H., Adrizal A. Management strategies to reduce air emissions: emphasis–dust and ammonia // *Journal of Applied Poultry Research*. 2005. Vol. 14, № 3. P. 638–650.
- Piccardo M. T., Geretto M., Pulliero A., Izzotti A. Odor emissions: A public health concern for health risk perception // *Environmental Research*. 2022. Vol. 204 (2). Article № 112121. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112121
- Radhapriya, Navaneetha Gopalakrishnan A., Malini P., Ramachandran A. Assessment of air pollution tolerance levels of selected plants around cement industry, Coimbatore, India // *Journal of Environmental Biology*. 2012. Vol. 33 (3). P. 635–641.
- Sharma B., Sharma S., Bhardwaj S. K. Plant-pollutant interactions with a special mention of dust accumulation by plants-A Review // *Nature Environment & Pollution Technology*. 2017. Vol. 16, № 2. P. 375–384.
- Shi Z., Xi L., Zhao X. Measurement of ammonia and hydrogen sulfide emission from three typical dairy barns and estimation of total ammonia emission for the chinese dairy industry // *Animals*. 2023. Vol. 13, № 14. Article № 2301. DOI: 10.3390/ani13142301
- Suzelle B., Jun L. X., Denis C. Simulating odour dispersion about natural windbreaks // *Comput. Fluid Dyn. Technol. Appl*. 2011. Vol. 181. P. 182–215. DOI: 10.5772/19084
- Torshizi M. R., Miri A., Shahriari A., Dong Z., Davidson-Arnott R. The effectiveness of a multi-row Tamarix windbreak in reducing aeolian erosion and sediment flux, Niatakarea, Iran // *Journal of environmental management*. 2020. Vol. 265. Article № 110486. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110486
- Tyndall J., Colletti J. Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: a review // *Agroforestry system*. 2007. Vol. 69, № 1. P. 45–65. DOI: 10.1007/s10457-006-9017-6
- Tyndall J. C., Larsen G. L. Drake Vegetative environmental buffers for odor mitigation // *Pork Information Gateway*. 2013. URL: <https://porkgateway.org/wp-content/uploads/2015/07/vegetative-environmental-buffers-for-odor-mitigationpdf> (дата обращения: 05.02.2025).
- Tyndall J. C., Randell J., VanDyk J. VEB-econ: An outreach tool for designing vegetative environmental buffers // *Journal of Extension*. Vol. 56, № 7. P. 45–65. DOI: 10.34068/joe.56.07.06
- Ucar T., Hall F. R. Windbreaks as a pesticide drift mitigation strategy: a review // *Pest Manage Science*. 2001. Vol. 57 (8). P. 663–675. DOI: 10.1002/ps.341
- Wang H., Takle E., Shen J. Shelterbelts and windbreaks: Mathematical modeling and computer simulation of turbulent flows // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2001. № 33 (1). P. 549–586. DOI: 10.1146/annurev.fluid.33.1.549

- Weninger T., Scheper S., Lackóová L., Kitzler B., Gartner K., King N. W., Cornelis W., Strauss P., Michel K. Ecosystem services of tree windbreaks in rural landscapes—a systematic review // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16, № 10. Article № 103002. DOI: 10.1088/1748-9326/ac1d0d
- Woodbury B. L. Emission of volatile organic compounds from land-applied beef cattle manure as affected by application method, diet, and soil water condition // *Journal of the ASABE*. 2022. № 65 (1). P. 123–133. DOI: 10.13031/ja.14587
- Zhou X., Brandle J., Mize C., Takle E. Three-dimensional aerodynamic structure of a tree shelterbelt: definition, characterization and working models // *Agroforestry Systems*. 2005. № 63 (2). P. 133–147. DOI: 10.1007/s10457-004-3147-5

STRATEGY OF USING PROTECTIVE FOREST STANDS TO EFFECTIVELY DISPERSE ODORS FROM LIVESTOCK COMPLEXES (REVIEW)

SYRCHINA
Nadezhda Viktorovna

*PhD, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Kirov region, Russia,
nvms1956@mail.ru*

PILIP
Larisa Valentinovna

*PhD, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Vyatka State Agrotechnological University, 133, Oktyabrsky Ave., Kirov,
Kirov region, Russia, pilip_larisa@mail.ru*

Key words:

protective forest
stands
livestock farms
odor
odor pollution control
odor dispersion
an odor control
strategy

Summary: Odor pollution of the environment is one of the most pressing air quality issues in intensive stock farming. To date, there are several strategies for combating unpleasant odors. To search for information, we used the following services: eLIBRARY, CyberLeninka, Scopus, Google Scholar, Web of Science, Google Academy, and Scholar.ru. The linguistic modeling of the subject field was based on keywords. Effective management of odors from livestock complexes can be achieved through the introduction of technology for the use of protective forest stands, i.e. artificially created arrays of trees and shrubs designed to protect agricultural lands and infrastructure from adverse effects, including odor load. In this case, protective forest stands act as barriers that reduce the speed and change the direction of the wind, which leads to effective dispersion of the odor. This occurs through physical interception and capture of gases and aerosol particles, dilution of concentrated odor from the downwind side, deposition of dust and other aerosols on the ground due to a decrease in wind speed, biological absorption (assimilation) of chemical components of the smell after interception. This helps to improve the aesthetic perception of livestock facilities and rural landscapes. The design of protective forest stands should correspond to the soil and climatic conditions of the region and the availability of planting material. In addition, it has a number of features emphasized in this work in relation to livestock facilities.

Reviewer: E. V. Koval
M. L. Sazonova

Received on: 07 February 2025

Published on: 27 December 2025

References

- Ajami A., Sanjay B. Shah, Lingjuan Wang-Li, Praveen Kolar. Windbreak Wall-Vegetative Strip System to Reduce Air Emissions from Mechanically Ventilated Livestock Barns: Part 2. Swine House Evaluation, Water, Air, & Soil Pollution. 2019. Vol. 230. P. 1–28. DOI: 1007/s11270-019-4335-2
- Asman W. A. H., Sutton M. A., Schjorring J. K. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition, New Phytologist. 1998. Vol. 139, No. 1. R. 27–48.
- Belyuchenko I. S. Forest belts and their functioning in agrarian landscape, Ekologicheskii Vestnik Severnogo Kavkaza. 2020. T. 16, No. 2. P. 30–36.
- Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990–2020. Report Documents and Graphics. EPA. Environmental Protection Agency, 2011. URL: <https://hepg.hks.harvard.edu/publications/benefits-and-costs-clean-air-act-1990-2020-report-documents-and-graphics> (data obrascheniya: 05.02.2025).
- Bist R. B., Subedi S., Chai L., Yang X. Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review, Journal of Environmental Management. 2023. No. 328. Article No. 116919. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116919
- Bogdanova V. V. The problems of pig farming that must be taken into account when designing and building pigsties, Vestnik nauki. 2023. T. 4, No. 1 (58). P. 259–263.
- Brazesh B., Mousavi S. M., Zarei M., Ghaedi M., Bahrani S., Hashemi S. A. Biosorption, Interface Science and Technology. Elsevier. 2021. Vol. 33. P. 587–628. DOI: 10.1016/B978-0-12-818805-7.00003-5
- Cao T., Zheng Y., Dong N. Control of odor emissions from livestock farms: A review, Environmental Research. 2023. Vol. 225. Article No. 115545. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115545
- Chang X., Sun L., Yu X., Liu Z., Jia G., Wang Y., Zhu X. Windbreak efficiency in controlling wind erosion and

- particulate matter concentrations from farmlands, *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021. Vol. 308. Article No. 107269. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107269
- Chernyshov M. P. Requirements for artificial reforestation in protective forests of the forest-steppe zone of the European part of the Russian Federation, *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2015. T. 3, No. 2–1 (13–1). P. 153–157.
- Decree of the Government of the Russian Federation dated October 20, 2023 No. 2909-r MOSCOW. URL: <http://static.government.ru/media/files/r1xcxWobSKewpJxZ7mdor2MXyLlukkdA.pdf> (data obrascheniya: 05.02.2025).
- Elkiey T., Ormrod D. P., Marie B. Foliar sorption of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, and ozone by ornamental plants atmospheric pollutants, *Horticult Science*. 1982. Vol. 17, No. 3. R. 358–360. DOI: 21273/HORTSCI.17.3.358
- Environmental pollution from farm animal waste, *Tadqiqotlar*. 2024. T. 30, No. 1. P. 182–187.
- Gadd G. M. Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*. 2009. Vol. 84, No. 1. P. 13–28. DOI: 10.1002/jctb.1999
- Goshin M. E. Budarina O. V. Ingel' F. I. Odors in ambient air: an analysis of the relationship with health status and quality of life of the adult population of a city with a developed food industry, *Gigiena i sanitariya*. 2020. No. 99 (12). P. 1339. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1339-1345
- Grala R. K., Tyndall J. C., Mize C. W. Impact of field windbreaks on visual appearance of agricultural lands, *Agroforestry systems*. 2010. Vol. 80. P. 411–422. DOI: 10.1007/s10457-010-9335-6
- Hamilton D. W., Ogejo J. A. Strategies to control farmstead odors, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University. 2017. URL: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/print-publications/bae/strategies-to-control-farmstead-odors-bae-2905.pdf> (data obrascheniya: 12.09.2024).
- Hanajima D., Kuroda K., Morishita K. et al. Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting, *Bioresource technology*. 2010. Vol. 101, No. 7. R. 2306–2310. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.026
- Hernandez G., Trabue S., Sauer T., Pfeiffer R., Tyndall J. Odor mitigation with tree buffers: Swine production case study, *Agriculture, ecosystems & environment*. 2012. Vol. P. 154–163. DOI: 10.1016/j.agee.2011.12.002
- Ivanova S. V. Skovronskaya S. A. Goshin M. E. Budarina O. V. Kulikova A. Z. The influence of odor on physiological, emotional and cognitive aspects of human health in experimental conditions (literature review), *Gigiena i sanitariya*. 2020. No. 99 (12). P. 1370. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1370-1375
- Jacobson L. D., Guo H., Schmidt D. R., Nicolai R. E. Influence of weather condition on field evaluation of odor dispersions from animal production sites, *Livestock environment VI: Proceedings of the 6th International Symposium*. Louisville, Kentucky, USA, 2001. R. 679–686.
- Jayathilakan K., Sultana K., Radhakrishna K., Bawa A. S. Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review, *Journal of food science and technology*. 2012. Vol. 49, No. 3. P. 278–293. DOI: 10.1007/s13197-011-0290-7
- Kliebenstein J. B., Loromer J., Larson B. Odor Control Methods Used by Iowa Pork Producers. Iowa State University. Department of Economics, 2003. URL: https://www.researchgate.net/profile/James-Kliebenstein/publication/5130904_ODOR_CONTROL_METHODS_USED_BY_IOWA_PORK_PRODUCERS/links/0912f5123aba20e4e8000000/ODOR-CONTROL-METHODS-USED-BY-IOWA-PORK-PRODUCERS.pdf (data obrascheniya: 12.09.2024).
- Kolevatyh E. P. Pilip L. V. Syrchina N. V. Transformation of the microbiota of animal waste under the influence of chemical reagents for odor elimination, *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2022. No. 4. P. 159–165. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165
- Kostic B., Stevanovic G., Lutovac M., Lutovac B., Ketin S., Biocanin R. Animal manure and environment, *Fresenius Environmental Bulletin*. 2020. Vol. 29, No. 3. P. 1289–1296.
- Kulik K. N. Protective Forest plantations are the basis of the ecological framework of agricultural territories, *Vestnik Rossiyskoy sel'skohozyaystvennoy nauki*. 2018. No. 4. P. 18–21.
- Kulshreshtha S., Kort J. External economic benefits and social goods from prairie shelterbelts, *Agroforestry Systems*. 2009. Vol. 75, No. 1. R. 39–47. DOI: 10.1007/s10457-008-9126-5
- Lin X. J., Barrington S., Gong G., Choiniere D. Simulation of odour dispersion downwind from natural windbreaks using the computational fluid dynamics standard k-ε model, *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2009. Vol. 36, No. 5. P. 895–910. DOI: 10.1139/S08-057
- Lin X. J., Barrington S., Nicell J. A., Choiniere D. Livestock Odour Dispersion as Affected by Natural Windbreaks, *Water Air and Soil Pollution*. 2007. Vol. 182, No. 1. P. 263–273. DOI: 10.1007/s11270-007-9337-9
- Lin X. J., Barrington S., Nicell J., Choiniere D., Vezina A. Influence of windbreaks on livestock odour

- dispersion plume in the field, *Agriculture, ecosystems & environment*. 2006. Vol. 116 (3). No. 34. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.agee.2006.02.014
- Liu L., Guan D., Peart M. R. The morphological structure of leaves and the dust-retaining capability of afforested plants in urban Guangzhou, South China, *Environmental Science and Pollution Research*. 2012. Vol. 19. R. 3440–3449.
- Liu Q., Bundy D. S., Hoff S. J. The effectiveness of using tall barriers to reduce odor emission, *Proceedings of the International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations*, Midwest Plan Service, Ames, Ia., 1996. R. 403–407.
- Liu Z., Powers W., Mukhtar S. A review of practices and technologies for odor control in swine production facilities, *Applied Engineering in Agriculture*. 2014. Vol. 30, No. 3. R. 477–492.
- Makarova N. M. Forest melioration of farmland areas and sanitary indicators of atmospheric air, *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya*. 2016. No. 4 (94). P. 191–195.
- Marszałek M., Kowalski Z., Makara A. Emission of greenhouse gases and odorants from pig slurry-effect on the environment and methods of its reduction, *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2018. Vol. 25, No. 3. R. 383–394.
- Matyssek R., Reich P., Oren R., Winner W. E. Response mechanisms of conifers to air pollutants, *Ecophysiology of coniferous forests*. Academic Press. 1995. R. 255–308. DOI: 10.1016/B978-0-08-092593-6.50014-1
- Meena M., Sonigra P., Yadav G. Biological-based methods for the removal of volatile organic compounds (VOCs) and heavy metals, *Environmental science and pollution research*. 2021. Vol. 28, No. 3. P. 2485–2508.
- Mishurov N. P. Recommendations for the technological design of systems for the removal and preparation of manure and litter for use, *Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve*. 2018. No. 4 (32). P. 44–56.
- Mize C. W., Brandle J. R., Schoeneberger M. M., Bentrup G. Ecological development and function of shelterbelts in temperate North America, *Toward agroforestry design: An ecological approach*. 2008. P. 27–54.
- Mume I. D., Workalemahu S. Review on windbreaks agroforestry as a climate smart agriculture practices, *American Journal of Agriculture and Forestry*. 2021. Vol. 9, No. 6. P. 342–347. DOI: 10.11648/j.ajaf.20210906.12
- National Pork Producers Council An executive summary: a review of literature on nature and control of odors from pork production facilities: a report prepared by Bioresource Engineering Department Oregon State University for the subcommittee of the National Pork Producers Council. 1995. URL: <http://www.mtcnet.net/~jdhogg/ozone/odor/odorlitreview.html> (data obrascheniya: 05.02.2025).
- Ni J. Q., Robarge W. P., Xiao C., Heber A. J. Volatile organic compounds at swine facilities: A critical review, *Chemosphere*. 2012. Vol. 89, No. 7. R. 769–788.
- Nowak D. J. The effects of urban trees on air quality, *USDA forest service*. 2002. P. 96–102.
- Parada-Ulloa M., Bozo Marambio, Moreno-Leiva G., Vasquez-Burgos K. Social representations of odors: case study in the Ñuble region, Chile (2019–2023), *Frontiers in Social Psychology*. 2024. Vol. 2. Article 1396536. DOI: 10.3389/frsps.2024.1396536
- Park M. K., Hwang T. K., Kim W., Jo Y. J., Park Y.J. Probiotic feed additives mitigate odor emission in cattle farms through microbial community changes, *Fermentation*. 2024. Vol. 10, No. 9. Article No. 473.
- Patterson P. H., Adrizal A. Management strategies to reduce air emissions: emphasis–dust and ammonia, *Journal of Applied Poultry Research*. 2005. Vol. 14, No. 3. R. 638–650.
- Piccardo M. T., Geretto M., Pulliero A., Izzotti A. Odor emissions: A public health concern for health risk perception, *Environmental Research*. 2022. Vol. 204 (2). Article No. 112121. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112121
- Pilip L. V. Ashihmina T. Ya. Waste from pig farms – problems and solutions, *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnih i prirodno-tehnogennyh sistem: Materialy HV Vserop. nauchno-prakt. konf. c mezhdunar. uchastiem*. Kniga 2. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2017. P. 180–183.
- Pilip L. V. Syrchina N. V. New approaches to deodorization of pig manure, *Ippologiya i veterinariya*. 2018. No. 4 (30). P. 99–106.
- Pilip L. V. Syrchina N. V. The role of ammonifiers in ammonia emissions from pig manure effluents, *Izvestiya KGTU*. 2023. No. 68. P. 46–54. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-46-54
- Pilip L. V. Analysis of environmental risks in the pig farming industry in the Kirov region, *Vestnik Vyatskoy GSHA*. 2020. No. 1 (3). P. 1.
- Radhapriya, Navaneetha Gopalakrishnan A., Malini P., Ramachandran A. Assessment of air pollution tolerance levels of selected plants around cement industry, Coimbatore, India, *Journal of Environmental Biology*. 2012. Vol. 33 (3). R. 635–641.
- Semenyutina A. V. Tereshkin A. V. Protective forest plantations: analysis of species composition and scientific basis for increasing the biodiversity of dendroflora, *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016. No. 4. P. 99–104.

- Sharma B., Sharma S., Bhardwaj S. K. Plant-pollutant interactions with a special mention of dust accumulation by plants-A Review, *Nature Environment & Pollution Technology*. 2017. Vol. 16, No. 2. R. 375–384.
- Shi Z., Xi L., Zhao X. Measurement of ammonia and hydrogen sulfide emission from three typical dairy barns and estimation of total ammonia emission for the chinese dairy industry, *Animals*. 2023. Vol. 13, No. 14. Article No. 2301. DOI: 10.3390/ani13142301
- Suzelle B., Jun L. X., Denis C. Simulating odour dispersion about natural windbreaks, *Comput. Fluid Dyn. Technol. Appl.* 2011. Vol. 181. P. 182–215. DOI: 10.5772/19084
- Syrchina N. V. Pilip L. V. Ashihmina T. Ya. Basic approaches to reducing odor pollution of the environment by livestock farms (review), *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2024. No. 3. P. 6–19. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-006-019
- Syrchina N. V. Pilip L. V. The effect of acidification on the sulfide hydrogen emissions in the organic waste of pig farms, *Problemy regional'noy ekologii*. 2021. No. 4. P. 102–106. DOI: 10.24412/1728-323X-2021-4-102-106
- Syrchina N.V. Pilip L. V. Kolevatyh E. P. The effect of sodium hypochlorite on the microbiota and odor of manure effluents, *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2023. No. 1. P. 107–116. DOI: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116
- Terent'ev Yu. N. Syrchina N. V. Ashihmina T. Ya. Pilip L. V. Reducing the emission of odor-forming substances in industrial pig farms, *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2019. No. 2. P. 113–120. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-113-120
- Torshizi M. R., Miri A., Shahriari A., Dong Z., Davidson-Arnott R. The effectiveness of a multi-row Tamarix windbreak in reducing aeolian erosion and sediment flux, Niatak area, Iran, *Journal of environmental management*. 2020. Vol. 265. Article No. 110486. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110486
- Tyndall J. C., Larsen G. L. Drake Vegetative environmental buffers for odor mitigation, *Pork Information Gateway*. 2013. URL: <https://porkgateway.org/wp-content/uploads/2015/07/vegetative-environmental-buffers-for-odor-mitigationpdf> (data obrascheniya: 05.02.2025).
- Tyndall J. C., Randell J., VanDyk J. VEB-econ: An outreach tool for designing vegetative environmental buffers, *Journal of Extension*. Vol. 56, No. 7. R. 45–65. DOI: 10.34068/joe.56.07.06
- Tyndall J., Colletti J. Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: a review, *Agroforestry system*. 2007. Vol. 69, No. 1. R. 45–65. DOI: 10.1007/s10457-006-9017-6
- Ucar T., Hall F. R. Windbreaks as a pesticide drift mitigation strategy: a review, *Pest Manage Science*. 2001. Vol. 57 (8). R. 663–675. DOI: 10.1002/ps.341
- Vtoryy V. F. Vtoryy S. V. Bazykin V. I. The results of studies of concentrations of climatically active gases in a barn with a loose content, *AgroEkolnzheneriya*. 2022. No. 4 (113). P. 114–120. DOI: 24412/2713-2641-2022-4113-114-120
- Wang H., Takle E., Shen J. Shelterbelts and windbreaks: Mathematical modeling and computer simulation of turbulent flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2001. No. 33 (1). R. 549–586. DOI: 10.1146/annurev.fluid.33.1.549
- Weninger T., Scheper S., Lackóová L., Kitzler B., Gartner K., King N. W., Cornelis W., Strauss P., Michel K. Ecosystem services of tree windbreaks in rural landscapes—a systematic review, *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16, No. 10. Article No. 103002. DOI: 10.1088/1748-9326/ac1d0d
- Woodbury B. L. Emission of volatile organic compounds from land-applied beef cattle manure as affected by application method, diet, and soil water condition, *Journal of the ASABE*. 2022. No. 65 (1). R. 123–133. DOI: 10.13031/ja.14587
- Zhou X., Brandle J., Mize C., Takle E. Three-dimensional aerodynamic structure of a tree shelterbelt: definition, characterization and working models, *Agroforestry Systems*. 2005. No. 63 (2). R. 133–147. DOI: 10.1007/s10457-004-3147-5



УДК 574.24

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ МОРФОМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛИЧИНОК ХИРОНОМИД НА ПРИМЕРЕ *EINFELDIA PAGANA* (MEIGEN, 1838) (DIPTERA: CHIRONOMIDAE)

ГОРБУНОВ
Роман Павлович

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, г.
Казань, 420087, ул. Даурская, 28, xobglor@gmail.com

Ключевые слова:
Einfeldia pagana
морфометрия
Chironomidae

Аннотация: На данный момент существует нехватка морфометрических исследований биотопических различий личинок комаров-звонцов на видовом уровне, несмотря на обширные исследования по этому направлению в других группах беспозвоночных. Такие работы помогут определить направления изменчивости организмов в изменяющихся условиях среды. В статье представлены результаты исследования локальной морфометрической изменчивости личинок комаров-звонцов вида *Einfeldia pagana* в зависимости от глубины обитания в водоеме. Актуальность работы обусловлена важностью понимания направления морфологических изменений хирономид как ключевых компонентов макрозообентоса, участвующих в процессах самоочищения водоемов и пищевых цепях. Цель исследования заключается в оценке морфометрических различий личинок *Einfeldia pagana* из разных биотопов озера Комсомольское (г. Казань). В ходе работы проведен анализ 26 морфометрических признаков личинок IV возраста, включая 18 параметров головной капсулы и 8 характеристик задней части тела. Промеры морфологических структур проводились под биноклем и световым микроскопом с использованием окуляр-микрометра. Статистическая обработка данных проводилась с применением методов оценки достоверности различий, включая бутстрэп-анализ, MANOVA и апостериорный тест Тьюки. Результаты показали наличие достоверных морфометрических различий между выборками: различаются размеры органов головной капсулы и анальных жабр. Выявлено 12 признаков со статистически значимыми отличиями. Полученные результаты могут быть использованы для развития методов биомониторинга и прогнозирования изменений видового состава хирономид в водоемах, а также служить основой для дальнейших исследований морфологической изменчивости хирономид в различных экологических условиях.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 23 июня 2025 года

Подписана к печати: 17 декабря 2025 года

Введение

Экологические исследования, затрагивающие изменения морфологии личинок хирономид, чаще всего освещают деформацию органов под влиянием токсических веществ (Arambourou et al., 2012; Grebenjuk, Tomilina, 2014; Montaño-Campaz et al., 2019)

или сосредотачиваются на экологических признаках (так называемые «Эльтонианские признаки» – Eltonian traits) и проводятся на надвидовом уровне (Serra et al., 2017; Rossaro et al., 2022; Kamburska et al., 2023). Эти исследования выявляют важные экосистемные характеристики сообществ хироно-

мид в целом, оставляя в стороне популяционные сдвиги морфологических признаков у видов, переживающих изменения внешних факторов. Тем не менее морфометрические исследования личинок комаров-звонцов на уровне вида также проводились, однако значимые исследования относятся лишь к 80-м гг. XX в. Одна из немногочисленных примечательных работ принадлежит Атчли и Хилбурну (Atchley, Hilburn, 1979), в которой была выявлена достоверная взаимосвязь между такими признаками личинок, как ширина лба, длина и ширина первого сегмента антенн, и такими характеристиками среды, как широта, долгота, количество органики и pH.

Поскольку на размеры личинок из разных районов может влиять сложный комплекс факторов и межпопуляционные различия, эффект определенных условий наиболее легко отследить в пределах одного водоема. В данном случае для морфометрических исследований был выбран вид *Einfeldia pagana* (Meigen, 1838), обитающий в оз. Комсомольском г. Казани на различных глубинах. Данный вид хорошо идентифицируется на стадии личинки и может служить модельным объектом для определения морфометрических различий в разных экологических условиях. *E. pagana* – бивольтинный вид, в условиях недостатка кислорода – унивольтинный (Learner, Potter, 1974), вылет происходит в середине июля и конце августа (Демина и др., 2013). Вид характерен для стоячих и медленно текучих водоемов, толерантен к небольшой солености, пеллофил, фитодегритрофаг, фильтратор-грунтоед-собирающий (Wiederholm, 1983; Moubayed, Langton, 2025).

Цель исследования – выявить наличие и характер морфометрических различий между выборками личинок *E. pagana* из двух разных биотопов одного озера с различной глубиной (2 и 4 м) и, как следствие, различными условиями обитания. Поставленные задачи: 1) выявить наиболее подходящие для морфометрических исследований признаки личинок хирономид; 2) оценить морфометрические различия между двумя выборками и их достоверность.

Согласно общей теории стресса (Sibly, Calow, 1989), в стрессовых условиях организм тратит дополнительные ресурсы для поддержания биохимического равновесия, вследствие чего на постройку тела расходуется меньшее количество ресурсов и организм вырастает, имея меньшие размеры.

В связи с этим сформулирована нулевая гипотеза: в биотопах на разных глубинах личинки не будут отличаться по размерам органов и уровню стресса.

Материалы

Озеро Комсомольское (N55.8573, E49.2271), расположенное в микрорайоне Дербышки г. Казани, имеет искусственное происхождение (1950 г.), площадь зеркала 1.76 га, длина около 340 м, максимальная ширина 85 м, глубина достигает 4.5 м. По химическому составу вода относится к сульфатно-кальциевому классу с высоким уровнем минерализации 0.88–0.95 г/дм³ и жесткостью 15–20 °Ж (Токинова и др., 2019), что создает условия, благоприятные для обитания личинок *E. pagana*.

Пробы были отобраны дночерпателем Петерсена (два черпания на пробу) на двух станциях:

1) Глубина 2–2.5 м. 24.10.2019. Грунт: глинистый ил, на дне присутствуют редкие харовые водоросли. Количество растворенного кислорода: 6.8 ± 0.7 мг/дм³, химическое потребление кислорода: 6.9 ± 2.1 мг/дм³, 1 проба;

2) Глубина 4 м. 16.10.2020. Грунт: глинисто-песчаный ил, макрофитов нет. Количество растворенного кислорода: 4.9 ± 0.2 мг/дм³, химическое потребление кислорода: 11.8 ± 2.8 мг/дм³, 1 проба.

Методы

После отбора, в 2019 и 2020 гг., пробы были зафиксированы в 70 % спирте. В январе 2025 г. из проб были отобраны и промерены по 35 экземпляров личинок 4-го возраста, всего 70 личинок.

Возраст личинок определялся исходя из данных о размерах личинок 4-го возраста (McCauley, 1974; Wiederholm, 1983) и экстраполяции описанных закономерностей возрастных изменений личинок комаров-звонцов с учетом длины личинки, ширины головной капсулы и индекса усика (Панкратова, 1977). В пробах также присутствовали личинки более ранних (2–3-го) возрастов, позволявшие удостовериться в правильности определения возраста.

Промеры (табл. 1, рис. 1) проводились по двум группам параметров: относящиеся к головной капсуле и относящиеся к сегментам тела, так как для насекомых характерны более стабильные размеры у сильно хитинизированных частей тела, которые изменяются только после линьки, в то время как

слабее хитинизированные части тела могут изменяться и между линьками под влиянием внешних факторов, в частности, для анальных жабр отмечены различия в росте

в условиях различного уровня солености (Clarke, 1957; Nguyen, Donini, 2010). Терминология по Панкратовой (1977) и Кикнадзе с соавторами (1991).

Таблица 1. Перечень использованных в работе промеров личинок *E. pagana*

Голова	Длина* и ширина*
Ментум	Длина срединного зуба, ширина срединного зуба, длина первого бокового зуба, длина второго бокового зуба
Вентроментальные пластинки	Высота, ширина
Мандибулы	Длина, ширина, длина апикального зуба, ширина внутренних зубов
Ротовые органы	Длина щупика максиллы, расстояние между щетинками SII (как аппроксимация ширины клипеуса)*
Антенны	Длина жгутика (2–5-й членики), длина сенсиллы, длина лаутерборновых органов**, диаметр кольцевого органа
Тело	Длина*
Задняя часть тела	Длина задних подталкивателей, длина и ширина вентральных отростков, длина и ширина первых анальных жабр, длина и ширина вторых анальных жабр.

Примечание. * – признак, не являющийся билатеральным, ** – билатеральный орган на каждой антенне: 4 промера на личинку.

Суммарно измерялось 18 признаков головной капсулы, промеров – 33; задней части тела: 8 признаков, промеров – 14. Также были вычислены производные признаки: площадь и объем вентральных отростков, площадь и объем анальных жабр, квадратные и кубические корни из этих значений соответственно, а также суммы корней из объемов или площадей органов по отдельности. Поскольку целью работы не было вычислить абсолютные значения размеров, степени искажения в размерах органов в результате фиксации и приготовления препаратов принимались одинаковыми для всех экземпляров и игнорировались в расчетах.

Промеры проводились под бинокуляром и на временных глицериновых препаратах, накрытых покровным стеклом, под световым микроскопом с помощью окуляр-микрометра. Головные капсулы выдерживались в 10 % растворе едкого калия (KOH) для осветления.

Проводились измерения высоты ментума, длины и ширины передних подталкивателей, но полученные значения имели слишком большой разброс в связи с особенностями формы и расположения этих органов, поэтому они не участвовали в анализе.

Для проверки нормальности распределения проводился тест Шапиро – Уилка. Для проверки гомогенности дисперсий сравниваемых выборок использовался тест Леве-

на. В случае нормального распределения и равенства дисперсий для оценки достоверности отличий использовался стандартный критерий Стьюдента, при неравенстве дисперсий – критерий Стьюдента с поправкой Уэлча. В случае отклонения от нормального распределения для оценки достоверности отличий между выборками использовались U-критерий Манна – Уитни – Уилкоксона и бутстрэп-анализ (1000 итераций). В связи с тем, что размер выборки небольшой, допустимый p-level для оценки достоверности различий принят < 0.01. Для определения достоверности суммарных различий между морфометрическими признаками личинок использовался однофакторный многомерный дисперсионный анализ (MANOVA), для оценки направления различий – апостериорный тест Тьюки. Для нормализации данных перед дисперсионным анализом была применена z-стандартизация, при которой математическое ожидание переменной приравнивается к 0, а каждое значение выражается в единицах стандартных отклонений от среднего (Мелник, 1983).

Вычисления производились в среде программирования R (R Core Team, 2025) с использованием библиотек «car» (Fox, Weisberg, 2019), «boot» (Canty, Ripley, 2022), «tidyverse» (Wickham et al., 2019), «emmeans» (Lenth, 2025).

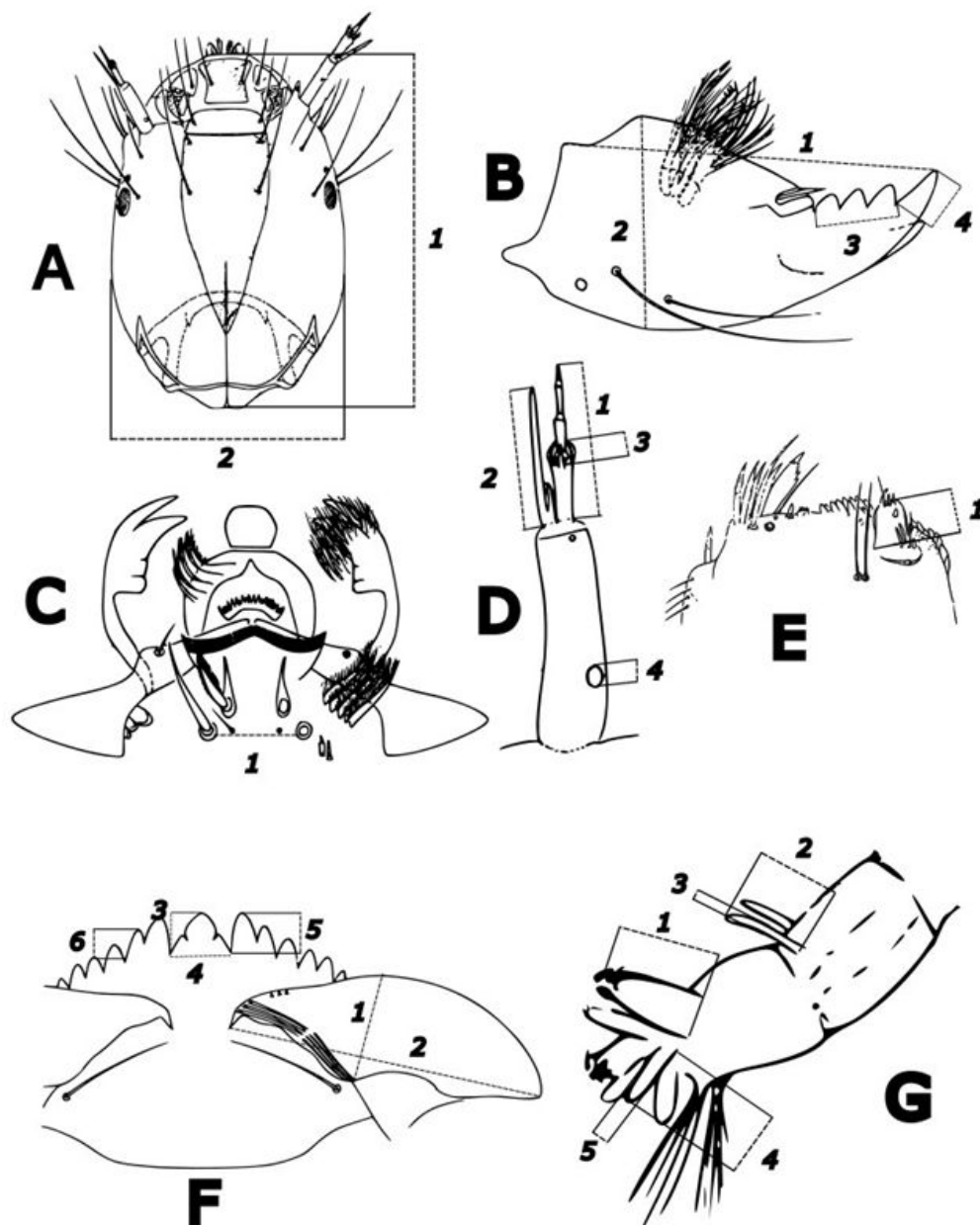


Рис. 1. Схематическая иллюстрация промеров органов личинок комаров-звонцов (рис. по: Wiederholm, 1983). А. Головная капсула. 1 – длина, 2 – ширина. В. Мандибула. 1 – длина, 2 – ширина, 3 – ширина внутренних зубов мандибулы, 4 – длина апикального зуба. С. Верхняя губа. 1 – расстояние между щетинками SII. D. Антенна. 1 – длина жгутика (2–5 членик), 2 – длина сенсиллы, 3 – длина лаутерборновых органов, 4 – диаметр кольцевого органа. Е. Максилла. 1 – длина щупика максиллы. F. Ментум. 1 – высота вентроментальной пластинки, 2 – ширина вентроментальной пластинки, 3 – длина срединного зуба, 4 – ширина срединного зуба, 5 – длина первого бокового зуба, 6 – длина второго бокового зуба. G. Задняя часть тела личинки. 1 – длина задних подталкивателей, 2 – длина вентральных отростков, 3 – ширина (диаметр) вентральных отростков, 4 – длина анальных жабр, 5 – ширина (диаметр) анальных жабр

Fig. 1. Schematic illustration of organ measurements of larvae Chironomidae (based on Wiederholm, 1983). A. The head Capsule : 1 – length, 2 – width. B. Mandible : 1 – length, 2 – width, 3 – the width of the internal teeth of the mandible, 4 – the length of the apical tooth. C. Labrum : 1 – the distance between SII setae. D. Antenna : 1 – the length of the flagellum (segments 2–5), 2 – the length of the sensilla, 3 – the length of the Lauterborn organs, 4 – the diameter of the ring organ. E. Maxilla : 1 – the length of the maxillary palp. F. Mentum : 1 – the height of the ventromental plate, 2 – the width of the ventromental plate, 3 – the length of the median tooth, 4 – the width of the median tooth, 5 – the length of the first lateral tooth, 6 – the length of the second lateral tooth. G. Posterior Larval Body : 1 – the length of the posterior parapods, 2 – the length of the ventral processes, 3 – the width (diameter) of the ventral processes, 4 – the length of the anal gills, 5 – the width (diameter) of the anal gills

Флуктуирующая асимметрия (ФА) билатеральных признаков и коэффициент вариации использовались для оценки уровня стресса организмов в популяции (напр.: Алиева и др., 2013; Ахметкиреева и др., 2014). Флуктуирующая асимметрия вычислялась по формуле $FA = \sum |l - r| / n$, где l и r – величина значения левого и правого признаков соответственно, n – количество особей (Захаров, 1987). Коэффициент вариации (CV) вычислялся по формуле $\mu / \sigma \cdot 100 \%$, где μ – среднее арифметическое, σ – стандартное отклонение.

Для вычислений использовались следующие признаки: ширина и высота вентроментальных пластинок, длина и ширина мандибул, ширина внутренних зубов мандибул. Данные признаки были выбраны потому, что они билатерально-симметричные, достаточно крупные для фиксации тонкой варибельности и слабо подвержены прижизненному деформирующему и модифицирующему влиянию среды вроде стачивания зубов ментума.

Результаты

Средние значения, стандартное отклонение и коэффициент вариации признаков приведены в табл. 2. Коэффициент вариации (CV) большинства признаков находится в пределах 4–12 %. Наибольшая варибельность наблюдается у лаутерборновых органов (CV до 20.48 %), кольцевого органа (CV до 13.6 %), вентральных отростков (CV до 19.43 %).

У личинок выявлено 12 признаков с достоверными отличиями (рис. 2, 3). Для промеров головной капсулы все достоверно отличающиеся признаки больше у личинок на глубине 2 м. Для промеров задней части тела задние подталкиватели длиннее у личинок на глубине 4 м, а анальные жаберы – на глубине 2 м. Ширина вентральных отростков имела большие значения у личинок на глубине 4 м, однако с уровнем достоверности только 0.05 для бутстрэп-анализа и 0.157 для U-теста.

Для суммарной оценки достоверности различий между двумя выборками был проведен однофакторный многомерный дисперсионный анализ (MANOVA) нормально распределенных признаков по фактору «глубина». В дисперсионном анализе использовались следующие признаки: длина личинки, длина головы, ширина срединного зуба ментума, длина сенсиллы и кубический корень из суммарного объема вентральных

отростков и анальных жабр как нормально распределенный интегральный признак, характеризующий размеры дыхательных органов. Коэффициенты корреляции признаков не превышали 0.57. Результаты MANOVA и апостериорного теста Тьюки по z-стандартизованным данным представлены в табл. 3.

Дисперсионный анализ показал достоверные морфометрические различия между двумя выборками. Согласно тесту Тьюки, разница между группами составляет 0.3 стандартных отклонения в нормализованном пространстве с более высокими значениями в выборке с глубины 2 м. Этот эффект можно классифицировать как умеренный по величине (Gallardo-Gómez, 2024).

Наибольшие значения коэффициентов вариации и флуктуирующей асимметрии у органов, выбранных для оценки стресса, принадлежат ширине мандибул у личинок с 4 м: 11.36 % и 0.039 соответственно. Кроме ширины мандибул, значения CV и ФА находятся в пределах небольших значений (2.9–7.24 для CV и 0.01–0.023 для ФА) и варьируют слабо, однако во всех случаях большие значения относятся к личинкам с глубины 4 м.

Обсуждение

Сравнение морфометрических признаков личинок *E. pagana* из двух биотопов с разными глубинами показало достоверные отличия по 12 признакам из 26. Признаки имеют меньшие значения на глубине 4 м за исключением задних подталкивателей. Ширина вентроментальных пластинок, по видимому, отражает ширину головной капсулы. Дисперсионный анализ, даже с использованием признаков, не имевших достоверных различий, выявил умеренное значимое влияние фактора на размеры личинок.

Функционально отличающиеся органы головной капсулы связаны в первую очередь с размерами мандибул и лаутерборновых органов, что могло бы говорить о проявлении небольших различий в способе питания и ориентации в пространстве, дающих небольшие преимущества в соответствующих биотопах: на фоне меньших размеров головной капсулы и антенн на 4 м такие органы, как ментум, сенсилла и кольцевой орган, оказываются относительно крупнее, а различия только в ширине вентроментальных пластинок можно трактовать как небольшую разницу в форме: на меньшей глубине они несколько более вытянуты в ширину.

Таблица 2. Основные параметры исследованных признаков личинок *E. pagana*

Признак (сокращения)	2 м			4 м		
	Среднее (мкм)	σ (мкм)	CV (%)	Среднее (мкм)	σ (мкм)	CV (%)
Длина тела	8581.43 ± 122.37	723.97	8.44	8356.94 ± 160.82	964.89	11.55
Ширина головы (Hw)	456.07 ± 3.71	21.94	4.81	436.5 ± 3.46	20.47	4.69
Длина головы	725.86 ± 10.05	59.44	8.19	666.67 ± 7.28	43.67	6.55
Ширина вентроментальных пластинок (VPw)	190.92 ± 0.81	6.76	3.54	183.8 ± 1.84	15.28	8.31
Высота вентроментальных пластинок	80.71 ± 0.43	3.6	4.46	80.16 ± 0.57	4.75	5.92
Длина срединного зуба ментума	25.34 ± 0.36	2.12	8.36	25.13 ± 0.43	2.58	10.26
Ширина срединного зуба ментума	38.52 ± 0.44	2.63	6.83	38.51 ± 0.47	2.84	7.37
Длина первого бокового зуба ментума	24.46 ± 0.3	2.5	10.2	24.22 ± 0.31	2.64	10.89
Длина второго бокового зуба ментума	19.55 ± 0.27	2.23	11.39	20.01 ± 0.21	1.75	8.77
Длина щупика максиллы (MP)	38.35 ± 0.33	2.79	7.28	36.71 ± 0.44	3.71	10.09
Длина мандибулы (MI)	225.15 ± 1.32	10.86	4.82	213.82 ± 2.27	18.61	8.7
Ширина мандибулы	93.31 ± 1.1	8.84	9.47	96.01 ± 1.39	10.91	11.36
Длина апикального зуба мандибулы (AT)	33 ± 0.38	2.84	8.62	30.95 ± 0.32	2.46	7.95
Ширина внутренних зубов мандибулы	42.57 ± 0.37	3.08	7.24	41.68 ± 0.41	3.19	7.64
Расстояние между щетинками SII	61.36 ± 0.78	4.59	7.48	60.74 ± 0.62	3.74	6.16
Длина жгутика антенны: 2–5-й членики (AF)	76.64 ± 0.5	3.95	5.16	73.52 ± 0.7	5.49	7.47
Длина сенсиллы	66.73 ± 0.59	4.59	6.87	65.29 ± 0.74	5.32	8.15
Длина лаутерборновых органов (LO)	8.98 ± 0.14	1.49	16.6	7.92 ± 0.14	1.62	20.48
Диаметр кольцевого органа	10.01 ± 0.19	1.36	13.6	10.65 ± 0.14	1	9.39
Длина задних подталкивателей (PPI)	365.59 ± 5.03	41.44	11.34	390.98 ± 7.34	58.22	14.89
Длина вентральных отростков	727.39 ± 11.77	97.73	13.44	703.81 ± 16.34	136.75	19.43
Ширина вентральных отростков	83.12 ± 1.76	14.63	17.6	87.4 ± 1.9	15.56	17.81
Длина первых анальных жабр	290.03 ± 4.92	39.98	13.79	281.89 ± 4.4	36.8	13.06
Длина вторых анальных жабр (2AGI)	272.4 ± 3.78	31.16	11.44	232.82 ± 4.15	30.76	13.21
Ширина первых анальных жабр (1AGw)	89 ± 2.57	21.18	23.8	80.93 ± 1.41	11.78	14.56
Ширина вторых анальных жабр (2AGw)	100.01 ± 1.87	15.45	15.45	87.95 ± 1.49	11.72	13.33

Примечание. σ – стандартное отклонение, CV – коэффициент вариации.

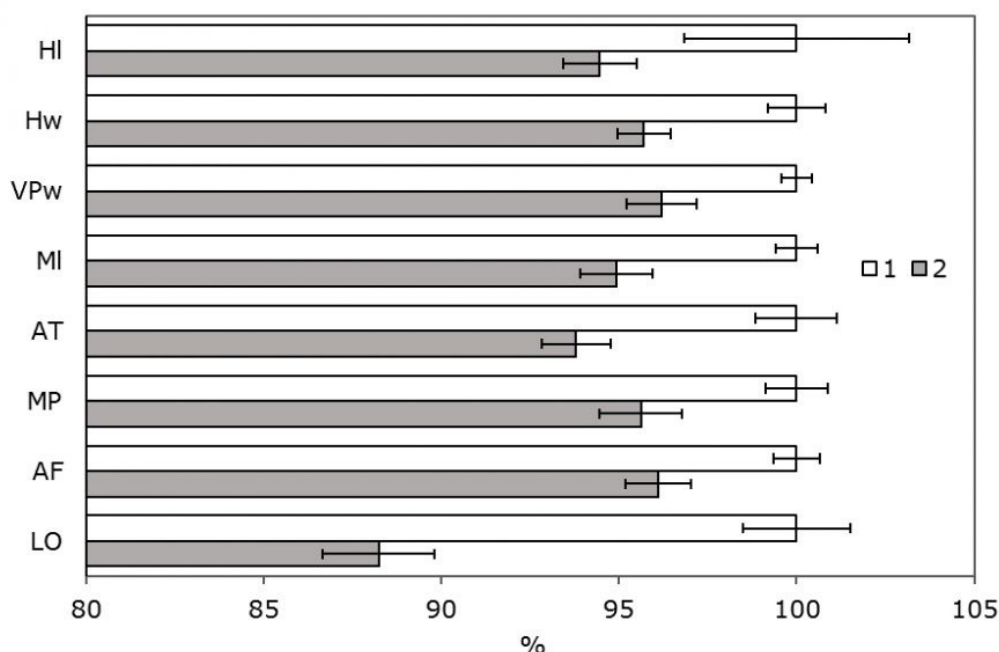


Рис. 2. Сравнение размеров органов головной капсулы личинок *E. pagana* на глубине 2 и 4 м (% от размера измеряемого органа у личинки с глубины 2 м, $p < 0.01$) и ошибка среднего значения: 1 – глубина 2 м, 2 – глубина 4 м. HI – длина головы; Hw – ширина головы; VPw – ширина вентроментальной пластинки; MI – длина мандибулы; AT – длина апикального зуба мандибулы; MP – длина щупика максиллы; AF – длина жгутика антенны; LO – длина лаутерборнового органа

Fig. 2. Comparison of the sizes of the organs of the head capsule of larvae *E. pagana* at a depth of 2 and 4 m (% of the size of the measured organ in larvae at a depth of 2 m, $p < 0.01$) and average value error : 1 is a depth of 2 m, 2 is a depth of 4 m. HI - the length of the head; Hw - the width of the head; VPw - the width of the ventromental plate; MI - the length of the -mandible; AT - the length of the apical tooth of the mandible; MP - the length of the maxilla tentacle; AF - the length of the antenna flagellum; LO - the length of the Lauterborn organ.

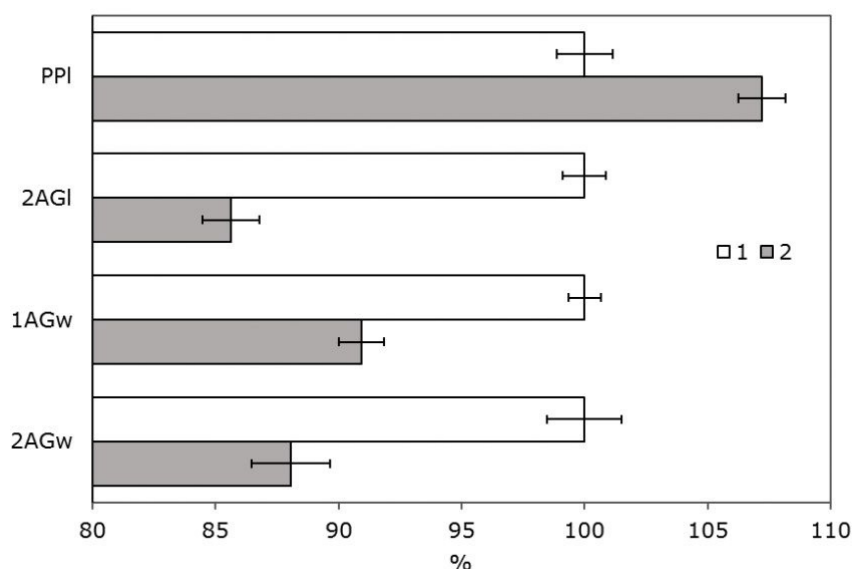


Рис. 3. Сравнение размеров органов задней части тела личинок *E. pagana* на глубине 2 и 4 м (% от размера измеряемого органа у личинки с глубины 2 м, $p < 0.01$) и ошибка среднего значения: 1 – глубина 2 м, 2 – глубина 4 м. PPI – длина заднего подталкивателя; 2AGl – длина вторых анальных жабр; 1AGw – ширина первых анальных жабр; 2AGw – ширина вторых анальных жабр

Fig. 3. Comparison of the sizes of the organs of the posterior part of the body of *E. pagana* larvae at a depth of 2 and 4 m (% of the size of the measured organ in the larva from a depth of 2 m, $p < 0.01$) and the error of the average value: 1 – a depth of 2 m, 2 – a depth of 4 m. PPI – the length of the posterior pusher; 2AGl – the length of the second anal gills; 1AGw – the width of the first anal gills; 2AGw – the width of the second anal gills.

Таблица 3. Результаты однофакторного многомерного дисперсионного анализа и апостериорного теста Тьюки по фактору «глубина»

Однофакторный многомерный дисперсионный анализ (MANOVA)			
Тест Пиллаи (Pillai's Trace)	F-статистика	Уровень значимости p	Уровень значимости (p) теста Шапиро – Уилка для остатков
0.22	3.20	0.013	0.65
Апостериорный Тест Тьюки для MANOVA			
Оценка (estimate)	Стандартная ошибка (SE)	t -статистика	Уровень значимости p
0.377	0.136	2.777	0.007

Известно (Nguyen, Donini, 2010; Kefford et al., 2011; Hildebrandt et al., 2018), что анальные жабры хирономид и другие мягкие органы пресноводных беспозвоночных могут менять свой размер под влиянием внешних факторов среды как у сформировавшихся личинок, так и в процессе онтогенеза, показывая различные скорости роста органа. В данном случае уменьшение размеров анальных жабр и увеличение вентральных отростков на большей глубине может объясняться меньшими уровнями кислорода, однако конкретные механизмы изменений требуют дальнейших исследований.

Коэффициент вариации и флуктуирующая асимметрия как индикаторы уровня стресса в целом не показали высоких значений на обеих глубинах, тем не менее значения на глубине 4 м в большинстве случаев несколько выше, особенно для промеров мандибул. Таким образом, нулевая гипотеза о меньших размерах личинок на большей глубине в связи с большим уровнем стресса опровергается, но частично: различия имеются, но не по всем признакам, а влияние стресса слабо. Тем не менее исследованный градиент в 2 м глубины не отражает сильного перепада условий. На основе полученных данных можно предполагать континуальное распределение размерных характеристик организмов в популяциях личинок хирономид в пределах одного водоема внутри вида.

Заключение

Исследование показало, что локальные выборки личинок комаров-звонцов из разных биотопов могут иметь достоверные морфометрические отличия в органах головной капсулы и задней части тела и статистически значимо различаться по комплексу признаков. В данном случае личинки с большей глубины имеют меньшие размеры по

следующим признакам: размеры головной капсулы, ширина вентроментальных пластинок, длина мандибул и апикального зуба, длина щупика максиллы, длина жгутика и лаутерборновых органов антенны, размеры анальных жабр. Предположительно, это связано с менее благоприятными условиями обитания, включая меньшее количество кислорода и больший уровень органического загрязнения. Ожидается, что аналогичная закономерность будет отмечена и для других лимно-пелофильных представителей комаров-звонцов.

Данная работа носит исследовательский характер: объект исследования имеет небольшую выборку, а в процессе исследования были выявлены признаки более и менее подходящие для анализа. В частности, такие органы, как ментум, передние подталкиватели, кольцевой орган, менее подходят для сравнения, в то время как размеры головной капсулы, мандибул и дыхательные органы являются более показательными.

Полученные данные могут быть использованы для продолжения исследований *E. pagana*, а также других лимно-пелофильных видов семейства Chironomidae. Методика может быть экстраполирована для других экологических градиентов и служить основой для биомониторинга по ключевым морфометрическим признакам и более детального анализа ископаемых остатков головных капсул хирономид.

В дальнейшем данный алгоритм будет использован на выборках большего размера и других видах, чтобы осветить закономерности, характерные для семейства в целом. Так, исследование представителей подсемейства Tanypodinae, которые не имеют вентральных отростков и у которых другая форма анальных жабр, может представлять интерес для сравнения.

Библиография

- Алиева З. М., Самедова Н. Х., Юсуфов А. Г. Реакция растений на стрессы на начальных этапах онтогенеза // Аридные экосистемы. 2013. Т. 1, № 1. С. 59–66.
- Ахметкиреева Т. Т., Беньковская Г. В., Китаев К. А., Долматова И. Ю. Комнатная муха как объект экологической генетики: структура лабораторной популяции и устойчивость к стрессовым воздействиям // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (31). С. 34–37.
- Демина И. В., Ермохин М. В., Полуконова Н. В. Фенология вылета и соотношение полов в популяциях гетеротопных насекомых пойменных озер долины реки Волги // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13, вып. 2. С. 89–95.
- Захаров В. М. Асимметрия животных (популяционно-феногенетический подход). М.: Наука, 1987. 216 с.
- Кикнадзе И. И., Шилова А. И., Керкис И. Е., Шобанов Н. А., Зеленцов Н. И., Гребенюк Л. П., Истомина А. Г., Прасолов В. А. Кариотипы и морфология личинок хирономид трибы Chironomini: Атлас. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 114 с.
- Мелник М. Основы прикладной статистики. М.: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.
- Панкратова В. Я. Личинки и куколки комаров подсемейств Podonominae и Tanypodinae фауны СССР (Diptera, Chironomidae Tendipedidae). Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 154 с.
- Токинова Р. П., Любарский Д. С., Буторова Л. Е. Особенности населения макрофитов и фитофильной фауны в озере Комсомольское (г. Казань) в зимний период // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Междунар. конф. / Под ред. Р. Р. Шагидуллина, Н. Н. Филатова, Ш. Р. Позднякова, Д. В. Иванова. Казань: Изд-во АН РТ, 2019. Ч. 2. С. 341–345.
- Arambourou H., Beisel J. N., Branchu P., Debat V. Patterns of fluctuating asymmetry and shape variation in *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) exposed to nonylphenol or lead // PloS one. 2012. Vol. 7, No 11. e48844. DOI: 1371/journal.pone.0048844
- Atchley W. R., Hilburn L. R. Morphometric variability in larvae of the Antarctic fly, *Belgica antarctica* (Diptera: Chironomidae) // Canadian Journal of Zoology. 1979. Vol. 57, No 12. P. 2311–2318. DOI: 10.1139/z79-300
- URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3500252>
- Clarke K. U. On the increase in linear size during growth in *Locusta migratoria* L. // Proceedings of the Royal Entomological Society of London. 1957. Vol. 32, No 1–3. P. 35–39.
- Gallardo-Gómez D., Richardson R., Dwan K. Standardized mean differences in meta-analysis: A tutorial // Cochrane Evidence Synthesis and Methods. 2024. Vol. 2, No 3. e12047. DOI: 10.1002/cesm.12047
- Fox J., Weisberg S. An R Companion to Applied Regression. Third edition. Sage, Thousand Oaks CA, 2019. URL: <https://www.john-fox.ca/Companion/>
- Grebenjuk L. P., Tomilina I. I. Morphological deformations of hard-chitinized mouthpart structures in larvae of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae) as the index of organic pollution in freshwater ecosystems // Inland water biology. 2014. Vol. 7. 273. DOI: 10.1134/S1995082914030092
- Hildebrandt J. P., Wiesenthal A. A., Müller C. Phenotypic plasticity in animals exposed to osmotic stress—is it always adaptive? // BioEssays. 2018. Vol. 40, No 11. 1800069. DOI: 10.1002/bies.201800069
- Kamburska L., Zaupa S., Boggero A. Size-pattern and larval-length–mass relationships for the most common Chironomid taxa in the deep subalpine Lake Maggiore // Water. 2023. Vol. 15, No 15. 2730. DOI: 3390/w15152730
- Kefford B. J., Reddy-Lopata K., Clay C., Hagen T., Parkanyi O., Nuggeoda D. Size of anal papillae in chironomids: Does it indicate their salinity stress? // Limnologia. 2011. Vol. 41, No 2. P. 96–106. DOI: 10.1016/j.limno.2010.09.004
- Learner M. A., Potter D. W. B. The seasonal periodicity of emergence of insects from two ponds in Hertfordshire, England, with special reference to the Chironomidae (Diptera: Nematocera) // Hydrobiologia. 1974. Vol. 44. P. 495–510.
- Lenth R. _emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. 2025. DOI: 10.32614/CRAN.package.emmeans, R package version 1.11.2-8. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- McCauley V. J. E. Instar differentiation in larval Chironomidae (Diptera) // The Canadian Entomologist. 1974. Vol. 106, No 2. P. 179–200. DOI: 10.4039/Ent106179-2
- Montaño-Campaz M. L., Gomes-Dias L., Toro Restrepo B. E., García-Merchán V. H. Incidence of deformities and variation in shape of mentum and wing of *Chironomus columbiensis* (Diptera, Chironomidae) as tools to assess aquatic contamination // PloS one. 2019. Vol. 14, No 1. e0210348. DOI: 1371/journal.pone.0210348
- Moubayed J., Langton P. H. On the genus *Einfeldia* Kieffer from France. Description of *aberlencii* sp. n. from French Guiana with emendation of four recently described species from continental France (Diptera, Chironomidae) // Ephemera. 2025. Vol. 26. P. 1–9.

- Nguyen H., Donini A. Larvae of the midge *Chironomus riparius* possess two distinct mechanisms for ionoregulation in response to ion-poor conditions // American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology. 2010. Vol. 299, No 3. P. R762–773. DOI: 10.1152/ajpregu.00745.2009
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R. Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2025. URL: <https://www.R-project.org/>
- Rossaro B., Marziali L., Boggero A. Response of chironomids to key environmental factors: perspective for biomonitoring // Insects. 2022. Vol. 13, No 10. 911. DOI: 3390/insects13100911
- Serra S. R., Graca M. A., Doledec S., Feio M. J. Discriminating permanent from temporary rivers with traits of chironomid genera // Annales de Limnologie-International Journal of Limnology. 2017. Vol. 53. P. 161–174.
- Sibly R. M., Calow P. A life-cycle theory of responses to stress // Biological Journal of the Linnean Society. 1989. Vol. 37, No 1-2. P. 101–116. DOI: 10.1111/j.1095-8312.1989.tb02007.x
- Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L. D., François R., Grolemund G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T. L., Miller E., Bache S. M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D. P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H. Welcome to the tidyverse // Journal of Open Source Software. 2019. Vol. 4, No 43. 1686. DOI: 10.21105/joss.01686.
- Wiederholm T. Chironomidae of the Holarctic Region. Part 1. Larvae // Entomologica Scandinavica Supplement. 1983. Vol. 19. P. 149–291.

Благодарности

Автор выражает благодарность Л. Е. Буторовой за предоставление бентосных проб, использованных в данном исследовании.

FEATURES OF LOCAL MORPHOMETRIC VARIABILITY OF LARVAE CHIRONOMIDAE ON THE EXAMPLE OF *EINFELDIA PAGANA* (MEIGEN, 1838) (DIPTERA: CHIRONOMIDAE)

GORBUNOV
Roman Pavlovich

Institute for problem of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, xobglor@gmail.com

Key words:

Einfeldia pagana
morphometry
Chironomidae

Summary: Currently, there is a lack of morphometric studies of biotopic differences between the larvae of mosquitoes Chironomidae at the species level, despite extensive research in this area on other groups of invertebrates. Such studies will help determine the directions of organism variability in changing environmental conditions. This article presents the results of a study of the local morphometric variability of larvae of mosquitoes Chironomidae, the species *Einfeldia pagana*, depending on the depth of habitat in the water body. The relevance of the work is due to the importance of understanding the directions of morphological changes in mosquitoes Chironomidae as key components of macrozoobenthos involved in the processes of self-purification of water bodies and food chains. The aim of the study was to assess the morphometric differences of larvae *Einfeldia pagana* from different biotopes of Lake Komsomolskoe (Kazan). The analysis involved 26 morphometric features of larvae of age IV, including 18 parameters of the head capsule and 8 characteristics of the posterior part of the body. Measurements of morphological structures were carried out using a binocular and a light microscope using micrometer eyepiece scale. Statistical data processing was performed using methods for assessing the validity of differences, including bootstrap analysis, MANOVA, and a posterior Tukey test. The results showed significant morphometric differences between the samples: the sizes of the head capsule organs and anal gills differ. Twelve traits with statistically significant differences were identified. The obtained results can be used to develop biomonitoring methods and predict changes in species composition of Chironomidae in water bodies, as well as serve as a basis for further studies of the morphological variability of Chironomidae in various ecological conditions.

Received on: 23 June 2025

Published on: 17 December 2025

References

- Ahmetkireeva T. T. Ben'kovskaya G. V. Kitaev K. A. Dolmatova I. Yu. Housefly as an object of ecological genetics: structure of the laboratory population and resistance to stress factors, Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. No. 3 (31). P. 34–37.
- Alieva Z. M. Samedova N. H. Yusufov A. G. Plant responses to stresses at the early stages of ontogenesis, Aridnye ekosistemy. 2013. T. 1, No. 1. C. 59–66.
- Arambourou H., Beisel J. N., Branchu P., Debat V. Patterns of fluctuating asymmetry and shape variation in *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) exposed to nonylphenol or lead, PloS one. 2012. Vol. 7, No 11. e48844. DOI: 1371/journal.pone.0048844
- Atchley W. R., Hilburn L. R. Morphometric variability in larvae of the Antarctic fly, *Belgica antarctica* (Diptera: Chironomidae), Canadian Journal of Zoology. 1979. Vol. 57, No 12. P. 2311–2318. DOI: 10.1139/z79-300
- Clarke K. U. On the increase in linear size during growth in *Locusta migratoria* L., Proceedings of the Royal Entomological Society of London. 1957. Vol. 32, No 1–3. P. 35–39.
- Demina I. V. Ermohin M. V. Polukonova N. V. Phenology of emergence and sex ratio in populations of heterotopic insects in the floodplain lakes of the Volga River valley, Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Ser. Himiya. Biologiya. Ekologiya. 2013. T. 13, vyp. 2. P. 89–95.
- Fox J., Weisberg S. An R Companion to Applied Regression. Third edition. Sage, Thousand Oaks CA, 2019. URL: <https://www.john-fox.ca/Companion/>
- Gallardo-Gómez D., Richardson R., Dwan K. Standardized mean differences in meta-analysis: A tutorial, Cochrane Evidence Synthesis and Methods. 2024. Vol. 2, No 3. e12047. DOI: 10.1002/cesm.12047
- Grebenjuk L. P., Tomilina I. I. Morphological deformations of hard-chitinized mouthpart structures in larvae

- of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae) as the index of organic pollution in freshwater ecosystems, *Inland water biology*. 2014. Vol. 7. 273. DOI: 10.1134/S1995082914030092
- Hildebrandt J. P., Wiesenthal A. A., Müller C. Phenotypic plasticity in animals exposed to osmotic stress—is it always adaptive?, *BioEssays*. 2018. Vol. 40, No 11. 1800069. DOI: 10.1002/bies.201800069
- Kamburska L., Zaupa S., Boggero A. Size-pattern and larval-length–mass relationships for the most common Chironomid taxa in the deep subalpine Lake Maggiore, *Water*. 2023. Vol. 15, No 15. 2730. DOI: 3390/w15152730
- Kefford B. J., Reddy-Lopata K., Clay C., Hagen T., Parkanyi O., Nuggeoda D. Size of anal papillae in chironomids: Does it indicate their salinity stress?, *Limnologia*. 2011. Vol. 41, No 2. P. 96–106. DOI: 10.1016/j.limno.2010.09.004
- Kiknadze I. I. Shilova A. I. Kerkis I. E. Shobanov N. A. Zelencov N. I. Grebenyuk L. P. Istomina A. G. Prasolov V. A. Karyotypes and morphology of Chironomid larvae of the tribe Chironomini: Atlas. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1991. 114 p.
- Learner M. A., Potter D. W. B. The seasonal periodicity of emergence of insects from two ponds in Hertfordshire, England, with special reference to the Chironomidae (Diptera: Nematocera), *Hydrobiologia*. 1974. Vol. 44. P. 495–510.
- Lenth R. _emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. 2025. DOI: 10.32614/CRAN.package.emmeans, R package version 1.11.2-8. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- McCauley V. J. E. Instar differentiation in larval Chironomidae (Diptera), *The Canadian Entomologist*. 1974. Vol. 106, No 2. P. 179–200. DOI: 10.4039/Ent106179-2
- Melnik M. Principles of applied statistics. M.: Energoatomizdat, 1983. 416 p.
- Montaño-Campaz M. L., Gomes-Dias L., Toro Restrepo B. E., García-Merchán V. H. Incidence of deformities and variation in shape of mentum and wing of *Chironomus columbiensis* (Diptera, Chironomidae) as tools to assess aquatic contamination, *PloS one*. 2019. Vol. 14, No 1. e0210348. DOI: 1371/journal.pone.0210348
- Moubayed J., Langton P. H. On the genus *Einfeldia* Kieffer from France. Description of *aberrantii* sp. n. from French Guiana with emendation of four recently described species from continental France (Diptera, Chironomidae), *Ephemera*. 2025. Vol. 26. P. 1–9.
- Nguyen H., Donini A. Larvae of the midge *Chironomus riparius* possess two distinct mechanisms for ionoregulation in response to ion-poor conditions, *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2010. Vol. 299, No 3. P. R762–773. DOI: 10.1152/ajpregu.00745.2009
- Pankratova V. Ya. Larvae and pupae of mosquitoes from the subfamilies Podonominae and Tanypodinae of the USSR fauna (Diptera, Chironomidae, Tendipedidae). L.: Nauka. Leningr. otd-nie, 1977. 154 p.
- R Core Team. _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R. Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2025. URL: <https://www.R-project.org/>
- Rossaro B., Marziali L., Boggero A. Response of chironomids to key environmental factors: perspective for biomonitoring, *Insects*. 2022. Vol. 13, No 10. 911. DOI: 3390/insects13100911
- Serra S. R., Graca M. A., Doledéc S., Feio M. J. Discriminating permanent from temporary rivers with traits of chironomid genera, *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*. 2017. Vol. 53. P. 161–174.
- Sibly R. M., Calow P. A life-cycle theory of responses to stress, *Biological Journal of the Linnean Society*. 1989. Vol. 37, No 1-2. P. 101–116. DOI: 10.1111/j.1095-8312.1989.tb02007.x
- Tokinova R. P. Lyubarskiy D. S. Butorova L. E. Features of the structure of macrophytes and associated fauna in Komsomol'skoye lake (Kazan) in winter, *Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya: Materialy II Mezhdunar. konf., Pod red. R. R. Shagidullina, N. N. Filatova, Sh. R. Pozdnyakova, D. V. Ivanova. Kazan': Izd-vo AN RT, 2019. Ch. 2. P. 341–345.*
- URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3500252>
- Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L. D., François R., Grolemond G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T. L., Miller E., Bache S. M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D. P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H. Welcome to the tidyverse, *Journal of Open Source Software*. 2019. Vol. 4, No 43. 1686. DOI: 10.21105/joss.01686.
- Wiederholm T. Chironomidae of the Holarctic Region. Part 1. Larvae, *Entomologica Scandinavica Supplement*. 1983. Vol. 19. P. 149–291.
- Zaharov V. M. Animal asymmetry (population-phenogenetic approach). M.: Nauka, 1987. 216 p.



УДК 597.2/5-574.2

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ И ПЕЧЕНИ РАЗЛИЧ- НЫХ ВИДОВ ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ РЕКИ ИРТЫШ (ОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

ЖАРКОВА
Наталья Николаевна

доктор сельскохозяйственных наук, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 644008, г. Омск, Институтская площадь, 1, nn.zharkova@omgau.org

БОЛТОВСКАЯ
Алена Сергеевна

Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 644008, г. Омск, Институтская площадь, 1, as.kravets2025@omgau.org

Ключевые слова:
тяжелые металлы
промысловые рыбы
мышечная ткань
печень
река Иртыш
Омская область

Аннотация: В статье рассмотрено современное содержание Zn, Cu, Cd, Pb, As и Hg в мышечной ткани и печени различных видов промысловых рыб: обыкновенный лещ (*Abramis brama*), карась серебряный (*Carassius gibelio*), обыкновенная плотва (*Rutilus rutilus*), отобранных в реке Иртыш в границах Омской области в 2024 г. Всего было исследовано 45 половозрастных, примерно одноразмерных особей, по 15 каждого вида рыб, без разделения по полу. Показано различие в уровнях содержания микроэлементов в мышечной ткани и печени рыб в зависимости от их типа питания. Так, в мышечной ткани леща обыкновенного выше концентрация Hg, в печени – Cu, по сравнению с другими видами мирных рыб (плотва обыкновенная, карась серебряный). Установлено, что максимальные концентрации Cu, Pb и Cd характерны для печени рыб, независимо от их видовой принадлежности. Мышцы рыб имели относительно низкие концентрации этих микроэлементов. Обратная ситуация складывалась по Zn, Hg и As – наибольшие концентрации данных элементов отмечены в мышцах рыб. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани и печени исследуемых видов рыб реки Иртыш не превышало установленных предельно допустимых уровней. Однако в мышечной ткани леща обыкновенного зафиксировано повышенное содержание Hg – 0.232 мг/кг при ПДК 0.3 мг/кг.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 21 августа 2025 года

Подписана к печати: 10 декабря 2025 года

Введение

Иртыш – одна из крупнейших рек, расположенных на территории Западной Сибири (Глушков, 2016). Она является главным источником хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, рыбного промысла, основной артерией судоходных путей (Жаркова и др., 2024), обладает богатыми водными биологическими ресурсами. По литературным данным, ихтиофауна Иртыша в Омской области включает 31 вид рыб,

среди которых преобладают представители семейства карповых (Cyprinidae). Наиболее активно из карповых добываются серебряный карась, язь и лещ (в среднем – 68.3 % от общего улова). В любительском промысле местного населения существенную долю также составляют плотва и елец (в среднем 20.8 %) (Промоторова, 2019).

Рыбы занимают в биоценозах водных экосистем верхний трофический уровень и обладают ярко выраженной способностью

накапливать тяжелые металлы (Артамонов, 2016; Вундцеттель, Кузнецова, 2013; Горбунов и др., 2023; Лопарева и др., 2016), поэтому их часто используют в биомониторинге в качестве биоиндикаторов загрязнения поверхностных вод (Лобанова, 2008). Являясь мигрирующими организмами, они дают интегрированную характеристику загрязнения водного объекта (Эйрих и др., 2024). Повышенное содержание в организме рыб тяжелых металлов свидетельствует об их значительной концентрации в водной среде, возможном функциональном нарушении во всех звеньях экосистемы (Вундцеттель, 2013). Поэтому на сегодняшний день важно при оценке качества промысловых рыб принимать во внимание не только органолептические показатели (внешний вид, цвет, вкус, запах), результаты физико-химических, биологических, паразитологических исследований, но и химико-токсикологических анализов (Ефимова и др., 2018), включающих определение содержания эссенциальных (цинк, медь) и неэссенциальных (свинец, мышьяк, кадмий, ртуть) микроэлементов.

Сведения о содержании тяжелых металлов в органах и тканях рыб среднего течения р. Иртыш немногочисленны (Эйрих, 2024), лучше изучены рыбы нижнего течения Иртыша (Артамонов, 2016; Артамонов и др., 2023; Чемагин и др., 2019). При этом в последнее время наблюдается тенденция увеличения загрязнения р. Иртыш тяжелыми металлами (Жаркова и др., 2025; Макарова, 2009), которые, перемещаясь по трофической цепи, способны аккумулироваться в различных живых организмах в существенно большем количестве, чем в среде обитания (Цеханович и др., 2017; Попов, Андросова, 2014). В связи с этим оценка уровня содержания тяжелых металлов в органах и тканях промысловых рыб является важной задачей, поскольку они могут накапливаться в рыбе и представлять опасность для здоровья человека при употреблении в пищу, вызывая так называемые экологически обусловленные заболевания (Теплая и др., 2024).

Цель работы – оценить содержание тяжелых металлов в мышечной ткани и печени различных видов промысловых рыб р. Иртыш в границах Омской области.

Материалы

В статье использованы материалы анализа содержания тяжелых металлов в образцах тканей и печени промысловых видов рыб, выловленных в среднем течении р. Иртыш

на территории Омской области. Отбор проб гидробионтов проводился с конца августа по сентябрь 2024 г. в трех створах наблюдений на р. Иртыш: выше г. Омска (д. Ольховка, Черлакский район, граница с Республикой Казахстан), в пределах г. Омска и ниже г. Омска (г. Тара, Тарский район) (рис. 1).

В качестве объектов исследования были выбраны: обыкновенный лещ (*Abramis brama*, Linnaeus, 1758), карась серебряный (*Carassius gibelio*, Bloch, 1782), обыкновенная плотва (*Rutilus rutilus*, Linnaeus, 1758), – как наиболее распространенные виды мирных рыб, обитающие на территории Омской области. Все изучаемые гидробионты относятся к семейству карповых (Cyprinidae). По типу питания обыкновенный лещ является бентофагом, а обыкновенная плотва и карась серебряный – эврифагами.

Всего для исследования отобрано 45 половозрастных, примерно одноразмерных особей, по 15 каждого вида рыб, без разделения по полу. Биоматериалом для исследования послужили пробы мышечной ткани, которые отбирали со спинной части тела, и печени рыб.

В каждой отдельно взятой пробе определяли содержание цинка (Zn), меди (Cu), кадмия (Cd), свинца (Pb), мышьяка (As) и ртути (Hg).

Методы

Отлов рыбы осуществляли собственноручно с помощью удочек (поплавочная, спиннинг). Частично недостаток количества рыбы для исследования восполняли покупкой у рыбаков на р. Иртыш.

Образцы очищали от внешних загрязнений, промывали дистиллированной водой, помещали в полиэтиленовые пакеты и замораживали. В таких условиях хранили до определения содержания микроэлементов. При подготовке к анализу рыбу весом от 100 до 400 г размораживали, после этого вырезали мышечную ткань, начиная от спинного плавника до начала ребер вдоль тела, далее извлекали печень. Таким образом, вес одной пробы мышечной ткани составлял 0.5 кг, а вес одной пробы печени – до 3 г.

Пробоподготовку биологического материала проводили согласно ГОСТ 26929-94 «Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов» (2010). Предварительная подготовка проб включала высушивание при температуре 60 °С до постоянной массы, затем проведение мо-



Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб рыбы на р. Иртыш, 2024 г.
Fig. 1. Map of fish sampling sites on the Irtysh River, 2024

крой минерализации с концентрированной азотной кислотой в сочетании с перекисью водорода с последующим термическим разложением. Для определения содержания мышьяка минерализацию проб проводили с добавлением оксида магния и спиртового раствора азотнокислого магния. Подготовку проб для определения ртути в образцах осуществляли методом кислотной минерализации в соответствии с МУК 4.1.1472-03 «Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в биоматериалах

животного и растительного происхождения (пищевых продуктах, кормах и др.)» (2004).

Определение содержания микроэлементов в мышечной ткани проводили в аккредитованном испытательном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Омской области». Химический анализ проб печени рыб осуществляли в БУ «Омская областная ветеринарная лаборатория».

Концентрацию Cd и Pb в мышечной ткани определяли инверсионно-вольтамперометрическим методом согласно ГОСТ

33824-2016 (2016), As – инверсионной вольтамперометрией на анализаторе ТА-2М (МУ 31-05/04), Hg – атомно-абсорбционной спектрометрией на спектрометре МГА-1000 (ГОСТ Р 53183-2008, 2010), Zn и Cu – атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (М-02-1702-20) на приборе Plasma 3000.

В образцах печени Cd, Pb, Zn, Cu (ГОСТ 33824-2016, 2016), As (ГОСТ 31628-2012, 2014) определяли инверсионно-вольтамперометрическим методом на анализаторе ТА-LAB, Hg – атомно-адсорбционным методом (ГОСТ 26927-86, 2010) на анализаторе Спектр-5.

Полученные концентрации четырех тяжелых металлов (кадмий, свинец, мышьяк и ртуть) в мышечной ткани рыб сравнивали с утвержденными нормативами для пресноводных нехищных видов рыб по СанПиН 2.3.2.1078–01 от 2002 года (с изменениями и дополнениями) (2025), в печени – с Техни-

ческим регламентом Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» (2025). ПДК цинка и меди брали из документа «Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах» (Сборник важнейших официальных..., 1992).

Статистическую обработку данных осуществляли в программе MS Excel.

Результаты

В проведенном исследовании не установлено существенно значимых различий в содержании тяжелых металлов в образцах рыбы в зависимости от месторасположения створа, поэтому приведены усредненные показатели содержания изучаемых элементов в мышечной ткани и печени рыб.

Средние концентрации микроэлементов в мышечной ткани изучаемых видов рыб, выловленных в р. Иртыш (Омская область), представлены в табл. 1.

Таблица 1. Концентрации микроэлементов в мышечной ткани различных видов рыб, выловленных в р. Иртыш, 2024 г.

Вид рыбы	Значения концентраций, мг/кг сырой массы					
	Cd	Pb	As	Hg	Zn	Cu
Обыкновенная плотва	< 0.003	< 0.02	0.11 ± 0.03	0.0069 ± 0.002	6.47 ± 1.62	0.71 ± 0.18
Обыкновенный лещ	< 0.003	0.030 ± 0.009	0.035 ± 0.01	0.232 ± 0.069	6.74 ± 1.69	0.54 ± 0.14
Серебряный карась	< 0.003	0.030 ± 0.009	0.075 ± 0.02	0.055 ± 0.017	6.74 ± 1.69	0.54 ± 0.14
ПДК	0.2	1.0	1.0	0.3	40.0	10.0

Анализ результатов исследований показал, что среднее содержание Cd в мышечной ткани основных промысловых видов рыб р. Иртыш значительно ниже допустимого уровня 0.2 мг/кг. Так, концентрация Cd во всех изучаемых видах рыб составляла менее 0.003 мг/кг и была ниже предела обнаружения применяемого метода анализа.

Содержание Pb в мышечной ткани рыб не превышало установленного ПДК – 1.0 мг/кг. Концентрация этого элемента в плотве обыкновенной была ниже предела обнаружения и составила

При этом отмечены различия в содержании мышьяка внутри семейства: наибольшее содержание As в образцах мышечной ткани зафиксировано у плотвы обыкновенной (0.11 мг/кг), у леща и карася концентрации были в 1.5–3.0 раза ниже и варьировали от 0.035 до 0.075 мг/кг соответственно. Содержание As в исследуемых образцах мышечной ткани рыб не превышало ПДК (1.0 мг/кг).

У представителей семейства карповые, обитающих в р. Иртыш, содержание Hg значительно варьировало и составило 0.232 мг/кг у леща, 0.055 мг/кг у карася и 0.0069 мг/кг у плотвы. Сравнительно высокая концентрация Hg в мышечной ткани леща обыкновенного (но не превышающая ПДК) связана с тем, что из представленных мирных видов рыб он единственный относится к бентофагам, основу питания которых составляют донные беспозвоночные, водоросли, детрит, что способствует прогрессивному накоплению Hg в мышечной ткани.

Концентрации эссенциальных микроэлементов Zn и Cu в мышцах изучаемых видов рыб были примерно на одном уровне и изменялись для цинка от 6.47 до 6.74 мг/кг (ПДК = 40 мг/кг), для меди от 0.54 до 0.71 мг/кг (ПДК = 10 мг/кг). Стоит отметить, что относительно других элементов Zn и Cu в мышечной ткани присутствовали в большем количестве.

Таким образом, в ходе проведенных исследований выявлена следующая закономерность распределения микроэлементов в мышечной ткани мирных видов рыб:

плотва обыкновенная – $Zn > Cu > As > Pb > Hg > Cd$;

лещ обыкновенный – $Zn > Cu > Hg > As >$

$Pb > Cd$;

серебристый карась – $Zn > Cu > As > Hg > Pb > Cd$.

Концентрации микроэлементов в печени промысловых видов рыб р. Иртыш приведены в табл. 2.

Таблица 2. Концентрации микроэлементов в печени различных видов рыб, выловленных в р. Иртыш, 2024 г.

Вид рыбы	Значения концентраций, мг/кг сырой массы					
	Cd	Pb	As	Hg	Zn	Cu
Обыкновенная плотва	0.119 ± 0.05	0.097 ± 0.04	<0.03	<0.0040	–	3.10 ± 0.81
Обыкновенный лещ	0.278 ± 0.07	0.126 ± 0.05	<0.03	<0.0040	–	3.40 ± 0.86
Серебряный карась	0.470 ± 0.09	0.400 ± 0.07	<0.03	<0.0040	2.22 ± 0.62	2.41 ± 0.76
ПДУ	0.7	1.0	1.0	0.5	–	–
ПДК	–	–	–	–	40.0	10.0

Примечание. «–» – элемент не определялся.

В ходе проведенных лабораторных испытаний установлено, что содержание Cd в печени исследуемых видов рыб выше, чем в мышечной ткани (см. табл. 2). Превышение содержания Cd в печени по сравнению с мышцами у разных видов рыб изменялось от 39 раз (плотва обыкновенная) до 157 раз (карась серебристый). Способность к значительному накоплению Cd в печени рыб обусловлена активным участием этого органа в процессах детоксикации с участием металлопротеинов (Fernandes et al., 2008). Во всех образцах печени анализируемых видов рыб концентрация Cd не превышала установленный уровень ПДУ 0.7 мг/кг сырой массы (ТР ТС 021/2011). В пробах печени серебряного карася концентрация кадмия составляла 0.470 (0.67 ПДК), обыкновенного леща – 0.278 (0.40 ПДК), плотвы обыкновенной – 0.119 (0.17 ПДК) мг/кг сырой массы.

Внутри семейства отмечены различия по содержанию свинца в печени рыб. Его наибольшие концентрации наблюдались у карася – 0.400 мг/кг, что в 3–4 раза выше, чем у леща и плотвы. Содержание Pb так же, как и Cd, было выше в печени в 4.2–13.3 раза по сравнению с мышечной тканью.

Мышьяк и ртуть во всех пробах печени мирных видов рыб находились ниже предела обнаружения метода:

Концентрация Cu изменялась от 2.41 (серебристый карась) до 3.40 (обыкновенный лещ) мг/кг сырой массы, не превышая установленный норматив (10 мг/кг). Содержание Zn в печени серебряного карася составило 2.22 мг/кг при ПДК 40 мг/кг.

Анализ накопления ТМ в изучаемых образцах мышечной ткани и печени показал, что металлы распределились неравномерно в зависимости от свойств элемента и функциональных особенностей органов и тканей, а также от уровня загрязнения окружающей среды (Теплая и др., 2024). Так, концентрации Cd, Pb и Cu в печени изучаемых видов рыб были значительно выше, чем в мышечной ткани (например, у серебристого карася концентрация Cd была выше в 157 раз), а концентрация Hg (у леща в 58 раз) и Zn (у серебристого карася в 3 раза) ниже, чем в мышцах рыб.

Среднее содержание тяжелых металлов в порядке их убывания в печени исследуемых рыб можно представить в виде следующих рядов:

плотва обыкновенная, лещ обыкновенный: $Cu > Cd > Pb > As > Hg$;

серебристый карась: $Cu > Zn > Cd > Pb > As > Hg$.

Обсуждение

Оценка формирования микроэлементного состава рыб невозможна без изучения закономерностей распределения элементов в различных органах и тканях (Ковековдова, Симоконов, 2010). Распределение микроэлементов в организме рыб происходит неодинаково. В наших исследованиях изучалось содержание тяжелых металлов в мышцах, используемых человеком в пищу, и в печени рыб – органе, который накапливает и депонирует вредные вещества, выполняя функцию детоксикации и выведения этих веществ из организма.

На участке р. Иртыш (Омская область) содержания ТМ в мышечной ткани и печени рыб до настоящего времени не проводилось, исключением является работа С. С. Эйрих с соавторами (2024), в которой приведены данные 2022 г.

Наибольшую экологическую опасность представляют неэссенциальные элементы, такие как Cd, Hg и Pb, которые могут накапливаться в организме или включаться в метаболические процессы, оказывая токсичное воздействие на организм (Моисеенко, 2015; Эйрих и др., 2024).

Согласно данным С. С. Эйрих с соавторами (2024), содержания Pb и Cd в мышечной ткани рыб, выловленных в р. Иртыш в районе Омской области в 2022 г., находились ниже предела обнаружения метода.

Диапазоны концентраций Hg, по данным С. С. Эйрих с соавторами (2024), в 2022 г. составляли: 0.007–0.084 мкг/г для мирных и 0.007–0.117 мкг/г для хищных видов рыб. В наших исследованиях 2024 г. концентрация Hg изменялась в зависимости от вида рыбы от 0.0069 до 0.232 мг/кг сырой массы, увеличиваясь в ряду: плотва обыкновенная < серебряный карась < лещ обыкновенный, что не противоречит представленным ими данным (Эйрих и др., 2024), согласно которым среди мирных видов рыб наибольшие концентрации Hg в мышечной ткани были отмечены у леща обыкновенного, который относится к бентофагам. Это связано с эффектом биомагнификации, т.е. Hg, попадая в водные объекты, аккумулируется в трофических структурах экосистем, и ее концентрация в организме увеличивается при переходе к более высокому уровню пищевой цепи.

В работе Houserova et al., 2006 показано, что содержание Hg у представителей карповых рыб достигает максимальных значений в мышечной ткани и сердце, а минимальных в печени. Наши исследования тоже подтверждают это заключение. Так, содержание Hg в 1.73 (плотва) – 58.0 (лещ) раз выше в мышечной ткани по сравнению с печенью изучаемых видов рыб. В исследованиях С. С. Эйрих с соавторами (2024), проведенных в 2022 г., концентрация Hg в мышечной ткани леща обыкновенного, обитающего в р. Иртыш, варьировала от 0.023 до 0.084 мкг/г. При этом авторы отмечают высокую степень биоаккумуляции Hg у бентофагов (ерш, лещ). В исследованиях, проводимых нами, в мышечной ткани леща отмечено повышенное содержание Hg (0.232 мг/кг), близкое к максимальному уровню этого элемента в

рыбе, используемой в пищу (0.3 мг/кг). Это, вероятно, связано с неоднократным превышением в последние годы нормативных показателей содержания ртути в природной воде и донных отложениях р. Иртыш в границах Омской области (Жаркова и др., 2025; Жаркова, Болтовская, 2025). Таким образом, высокая степень биоаккумуляции Hg в организмах бентофагов и хищных видов рыб может служить индикатором загрязнения вод.

Концентрации Zn и Cu в образцах мирных видов рыб, по данным С. С. Эйрих с соавторами (2024), в 2022 г. варьировали от 2.2 до 7.0 и от 0.10 до 0.50 мкг/г соответственно. Приведенные значения сопоставимы с нашими результатами – концентрация Zn в зависимости от вида рыб изменялась от 6.47 до 6.74 мг/кг, Cu – от 0.54 до 0.71 мг/кг сырой массы. Авторы не выявили увеличение концентраций ТМ с повышением трофического уровня от мирных к хищным рыбам для Cu, для Zn – превышение было незначительным. Ю. Е. Артамонов с соавторами (2023) отмечают максимальные концентрации Cu в рыбах (лещ, окунь, щука) р. Иртыш в районе г. Семей летом (3.47–4.35 мг/кг), что связано с увеличением кормовой базы в этот период. В весенний и осенний сезоны концентрации меди снижаются (1.55–2.80 мг/кг). В наших исследованиях концентрация Cu в печени изучаемых видов рыб значительно превышает эти значения в мышечной ткани (в 4.4–6.3 раза). Аналогичные сведения содержатся в работах Г. К. Булахтиной с соавторами (2020), В. М. Зубковой с соавторами (2016).

Л. К. Себах с соавторами (1995) отмечают, что мышьяк обычно не накапливается в больших количествах в мягких тканях рыб, за исключением крайне загрязненных районов. В незагрязненных и умеренно загрязненных водах уровень мышьяка составляет от менее 0.1 до 0.4 мг/кг сырой массы. Эти данные согласуются с нашими исследованиями, согласно которым концентрация мышьяка в мышечной ткани изменялась от 0.035 до 0.11 мг/кг сырой массы. В связи с тем, что самоочищение от мышьяка в организме рыб протекает достаточно быстро (Себах и др., 1995), концентрации этого элемента в печени минимальны – ниже предела обнаружения метода.

Данные, полученные в ходе исследований, свидетельствуют о том, что по степени накопления тяжелых металлов доминируют бентофаги. Так, печень и мышечная ткань леща обыкновенного отличаются более вы-

сокими концентрациями металлов, в сравнении с органами и тканями плотвы обыкновенной и карася серебряного. Это связано с питанием леща бентосными организмами, в которых эти микроэлементы аккумулируются в высокой степени, что и приводит к их большому накоплению в тканях и органах данного вида рыб (Зубкова др., 2016). В больших количествах у леща обыкновенного в мышечной ткани аккумулируются Zn, Hg; в печени – Cu, Cd, Pb.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлено различие в уровнях содержания изучаемых элементов в мышечной ткани и печени в зависимости от видовой принадлежности. Наибольшее содержание Hg отмечено в мышечной ткани леща обыкновенного (0.242 мг/кг), As – в плотве обыкновенной (0.11 мг/кг). Максимальные концентрации Cd и Pb в печени изучаемых видов рыб установлены у серебряного карася.

Ряд накопления ТМ в мышечной ткани имеет вид: плотва обыкновенная – Zn > Cu > As > Pb > Hg > Cd; лещ обыкновенный – Zn > Cu > Hg > As > Pb > Cd; серебряный карась

– Zn > Cu > As > Hg > Pb > Cd; в печени независимо от видовой принадлежности: Cu > Cd > Pb > As > Hg.

Среднее содержание тяжелых металлов в печени исследуемых рыб в порядке их убывания можно представить в виде следующих рядов: плотва обыкновенная, лещ обыкновенный: Cu > Cd > Pb > As > Hg; серебряный карась: Cu > Zn > Cd > Pb > As > Hg.

Установлено, что максимальные концентрации Cu, Pb и Cd характерны для печени рыб, независимо от их видовой принадлежности. Мышцы рыб имели относительно низкие концентрации этих микроэлементов. Обратная ситуация складывалась по Zn, Hg и As – наибольшие концентрации данных элементов отмечены в мышечной ткани рыб.

Современные уровни содержания ТМ в печени и мышцах исследуемых видов рыб р. Иртыш на изучаемом участке находятся в пределах нормы и не превышают нормативов, установленных СанПиН для рыбы и продуктов из нее. Таким образом, в настоящее время риска потребления мышечной ткани рыбы, обитающей в р. Иртыш на изучаемом участке, не установлено.

Библиография

- Артамонов Ю. Е. Содержание и особенности распределения тяжелых металлов в рыбах реки Иртыш // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Междунар. симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 120-летию со дня основания Томского политехн. ун-та: В 2 т. Томск, 04–08 апреля 2016 года / Нац. исслед. Томский политехн. ун-т (ТПУ), Ин-т природных ресурсов (ИПР); Об-во инженеров-нефтяников, междунар. некоммерч. организация, Студенческий чептер; Под ред. А. Ю. Дмитриева. Т. 2. Томск: Нац. исслед. Томский политехн. ун-т, 2016. С. 66–68.
- Артамонов Ю. Е., Кливенко А. Н., Артамонова Е. Н., Евлампиева Е. П. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов в рыбах реки Иртыш // Вестник университета Шакарима. Серия: Технические науки. 2023. № 1 (9). С. 5–15. DOI: 10.53360/2788-7995-2023-1(9)-1
- Булахтина Г. К., Баканева А. А., Кудряшов А. В., Кудряшова Н. И. Уровень Zn, Cu, Pb, Cd и Ni в тканях и органах основных представителей ихтиофауны Нижней Волги // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 4 (85). С. 157–162.
- Вундцеттель М. Ф., Кузнецова Н. В. Содержание тяжелых металлов в органах и тканях рыб реки Яхрома // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2013. № 2. С. 155–158.
- Глушков С. В. Экологические проблемы реки Иртыш и пути их решения // Декада экологии: Материалы X Юбилейного международного конкурса, Омск, 11–19 мая 2016 года. Омск: Омский университет дизайна и технологий, 2016. С. 100–102.
- ГОСТ 26927-86 Сырье и продукты пищевые. Методы определения ртути. М.: Стандартинформ, 2010. 13 с.
- ГОСТ 26929-94 Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. М.: Стандартинформ, 2010. 12 с.
- ГОСТ 31628-2012 Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольтамперометрический метод определения массовой концентрации мышьяка. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
- ГОСТ 33824-2016 Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольтамперометрический метод определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди и цинка). М.: Стандартинформ, 2016. 27 с.
- ГОСТ Р 53183-2008 Продукты пищевые. Определение следовых элементов. Определение ртути методом атомно-абсорбционной спектроскопии холодного пара с предварительной минера-

- лизацией пробы под давлением. М.: Стандартиформ, 2010. 12 с.
- Горбунов А. В., Ермолаев Б. В., Петренко Д. Б. Биоаккумуляция тяжелых металлов и других токсичных элементов в мышцах рыб бассейна р. Волги. // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 80–88. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-080-088
- Ефимова И. О., Григорьева В. В., Тихонова Г. П. Определение доброкачественности морской рыбы и содержания в ней тяжелых металлов // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4 (7). С. 47–52. DOI: 10.17022/fhss-js35
- Жаркова Н. Н., Баженова О. П., Гаврильченко О. Л., Болтовская А. С. Сезонная динамика химического состава воды реки Иртыш на территории Омской области // Водные биоресурсы и среда обитания. 2024. Т. 7, № 2. С. 7–20. DOI: 10.47921/2619-1024_2024_7_2_7
- Жаркова Н. Н., Баженова О. П., Болтовская А. С. Динамика содержания тяжелых металлов в воде реки Иртыш в период открытой воды в границах Омской области // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2025. Т. 17, № 2. С. 98–123. DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1109
- Жаркова Н. Н., Болтовская А. С. Содержание ртути в природной воде и донных отложениях на трансграничном участке реки Иртыш (Омская область) // Экологические чтения – 2025: Материалы XV I Национальной научно-практической конференции (с международным участием), Омск, 04–05 июня 2025 года. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2025. С. 704–710.
- Зубкова В. М., Розумная Л. А., Болотов В. П. Содержание тяжелых металлов в тканях и органах разных видов рыб Волгоградского водохранилища // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2016. № 4. С. 93–98.
- Ковековдова Л. Т., Симоконов М. В. Оценка содержания металлов и мышьяка в донных отложениях и рыбах из рек бассейна залива Петра Великого (Японское море) // Известия ТИНРО. 2010. Т. 160. С. 223–235.
- Лобанова Т. А. Особенности накопления тяжелых металлов промысловыми видами рыб // Вестник Костромского государственного университета им. Н. А. Некрасова. 2008. Т. 14, № 1. С. 18–21.
- Лопарева Т. Я., Шарипова О. А., Петрушенко Л. В. Уровень накопления токсикантов в мышечной ткани рыб в водных бассейнах Республики Казахстан // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2016. № 2. С. 115–122.
- Макарова О. А. Экологическая оценка содержания тяжелых металлов в системе вода-почва-растение в прирусловой части поймы реки Иртыш : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Омск, 2009. 17 с.
- Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А. Биогеохимия кадмия: антропогенное рассеивание, биоаккумуляция и экотоксичность // Геохимия. 2018. № 8. С. 759–773. DOI: 10.1134/S001675251808006X
- Моисеенко Т. И. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб // Геохимия. 2015. № 3. С. 222–233. DOI: 10.7868/S0016752515030097
- МУК 4.1.1472-03 Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в биоматериалах животного и растительного происхождения (пищевых продуктах, кормах и др.). М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 59 с.
- Новиков М. А., Горбачева Е. А., Харламова М. Н. Содержание кадмия в промысловых рыбах Баренцева моря (по многолетним данным) // Труды ВНИРО. 2024. Т. 198. С. 87–99. DOI: 10.36038/2307-3497-2024-198-87-99
- Пинтаева Е. Ц., Базарсадуева С. В., Раднаева Л. Д. Содержание и характер накопления металлов в рыбах реки Кичеры (приток оз. Байкал). // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18, № 1. С. 87–92.
- Попов П. А., Андросова Н. В. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани рыб из водоемов бассейна реки Оби // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2014. № 4 (28). С. 108–122.
- Промоторова Е. Ю. Экология карповых рыб бассейна нижнего Иртыша. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2019. 80 с.
- СанПиН 2.3.2.1078–01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: с изм. от 6 июля 2011 года // Меганорм. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293855/4293855259.htm> (дата обращения: 23.07.2025).
- Сборник важнейших официальных материалов по санитарным и противоэпидемическим вопросам: В 7 т. Т. V: Санитарные правила и нормы (СанПиН), гигиенические нормативы и перечень методических указаний и рекомендаций по гигиене питания. М.: МП «Рарог», 1992.
- Себах Л. К., Панкратова Т. М., Авдеева Т. М. Оценка накопления тяжелых металлов в промысловых объектах Азово-Черноморского бассейна // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 1995. Т. 41. С. 87–90.
- Теплая Г. А., Рыбкин В. С., Полянская Н. В., Каляткина В. П. Распределение тяжелых металлов в мышечной ткани различных видов рыб Астраханской области // Астраханский вестник экологического образования. 2024. № 2 (80). С. 91–97. DOI: 10.36698/2304-5957-2024-2-91-97

- Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции», утвержден Решением Комиссии таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 880 (с изм. на 22 апреля 2024 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320560> (дата обращения: 23.07.2025).
- Чемагин А. А., Волосников Г. И., Кыров Д. Н., Либерман Е. Л. Тяжелые металлы Hg, Cd, Pb в организме стерляди (*Acipenser ruthenus* L.), Нижний Иртыш // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2019. Т. 22, № 2. С. 225–233. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-225-233
- Цеханович И. А., Лентовский А. С., Холоденко В. А. Оценка содержания ионов меди в поверхностных водах Иртыша // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., Омск, 24–28 апреля 2017 года. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2017. С. 222–223.
- Эйрих С. С., Колотушкина Л. В., Серых Т. Г. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани мирных и хищных рыб реки Иртыш // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2024. № 2 (73). С. 77–94. DOI: 10.24412/2410-1192-2024-17306
- Bjerregaard P., Andersen C., Andersen O. Ecotoxicology of metals — sources, transport, and effects on the ecosystem // Handbook on the Toxicology of Metals / Nordberg G. F., Fowler B. A., Nordberg M., eds. Elsevier Science, Amsterdam. 2014. P. 425–459.
- Bradley R. W., Morris J. R. Heavy metals in fish from a series of metal contaminated lakes near sudbury ontario // Water Air Soil Pollut. 1986. № 27. P. 341–354.
- Fernandes D., Bebianno M. J., Porte C. Hepatic levels of metal and metallothioneins in two commercial fish species of the Northern Iberian shelf // Sci. Total Environ. 2008. Vol. 391. P. 159–167. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.057
- Houserova P., Kuban V., Spurny P., Habarta P. Determination of total mercury and mercury species in fish and aquatic ecosystems of Moravian rivers // Veterinarni Medicina. 2006. Vol. 51 (3). P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.17221/5527-VETMED>
- Karl H., Kammann U., Aust M.-O., Manthey-Karl M., Lüth A., Kanisch G. Large scale distribution of dioxins, PCBs, heavy metals, PAH-metabolites and radionuclides in cod (*Gadus morhua*) from the North Atlantic and its adjacent seas // Chemosphere. 2016. Vol. 149. P. 294–303. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.01.052
- Liu Y., Chen Q., Li Y., Bi L., Jin L., Peng R. Toxic Effects of Cadmium on Fish // Toxics. 2022. Vol. 10, 622. 19 p. DOI: 10.3390/toxics10100622
- Wagner A., Boman J. Biomonitoring of trace elements in muscle and liver tissue of freshwater fish // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2003. Vol. 58, No 12. P. 2215–2226. DOI: 10.1016/j.sab.2003.05.003
- Yeşilbudak B., Erdem C. Cadmium accumulation in gill, liver, kidney and muscle tissues of Common carp, *Cyprinus carpio*, and Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2014. Vol. 92. P. 546–550. DOI: 10.1007/s00128-014-1228-3

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Россельхозбанк» (грант РСХБ-009-40/39-2023).

THE CONTENT OF HEAVY METALS IN THE MUSCLE TISSUE AND LIVER OF VARIOUS SPECIES OF COMMERCIAL FISH OF THE IRTYSH RIVER (OMSK REGION)

ZHARKOVA
Natalya Nikolaevna

*D.Sc., P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, 644008 Russia
Siberian Federal District Omsk Region Omsk Institutskaya Square, 1,
nn.zharkova@omgau.org*

BOLTOVSKAYA
Alena Sergeevna

*P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, 644008 Russia
Siberian Federal District Omsk Region Omsk Institutskaya Square, 1,
as.kravets2025@omgau.org*

Key words:
heavy metals
commercial fish
muscle tissue
liver
Irtysh River
Omsk Region

Summary: The article considers the current content of Zn, Cu, Cd, Pb, As and Hg in the muscle tissue and liver of various commercial fish species: common bream (*Abramis brama*), crucian carp (*Carassius auratus gibelio*), roach (*Rutilus rutilus*), sampled in the Irtysh River within the borders of the Omsk region in 2024. A total of 45 sex-and-age, approximately one-sized individuals were examined, 15 fish of each species, without gender separation. The difference in the levels of trace elements in the muscle tissue and liver of fish was shown, depending on their type of nutrition. Thus, in the common bream the concentration of Hg was higher in the muscle tissue, Cu - in the liver, compared to other species of peaceful fish, such as roach and crucian carp. It was found that the maximum contents of Cu, Pb and Cd were characteristic of the liver of fish, regardless of their species. The muscles of the fish had relatively low concentrations of these trace elements. The opposite situation was observed for Zn, Hg and As – the highest concentrations of these elements were found in the muscles of fish. The content of heavy metals in the muscle tissue and liver of the studied fish species of the Irtysh River did not exceed the maximum permissible levels. However, in the muscle tissue of the common bream, an increased content of Hg was recorded – 0.232 mg/kg with a maximum permissible concentration of 0.3 mg/kg

Received on: 21 August 2025

Published on: 10 December 2025

References

- Artamonov Yu. E. Klivenko A. N. Artamonova E. N. Evlampieva E. P. Ecological assessment of heavy metal content in fish of the Irtysh River, Vestnik universiteta Shakarima. Seriya: Tehnicheskie nauki. 2023. No. 1 (9). P. 5–15. DOI: 10.53360/2788-7995-2023-1(9)-1
- Artamonov Yu. E. Content and distribution features of heavy metals in fish of the Irtysh River, Problemy geologii i osvoeniya nedr: Trudy XX Mezhdunar. simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodyh uchenyh, posvyasch. 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politehn. un-ta: V 2 t. Tomsk, 04–08 aprelya 2016 goda, Nac. issled. Tomskiy politehn. un-t (TPU), In-t prirodnih resursov (IPR); Ob-vo inzhenerov-neftyanikov, mezhdunar. nekommerch. organizaciya, Studencheskiy chapter; Pod red. A. Yu. Dmitrieva. T. 2. Tomsk: Nac. issled. Tomskiy politehn. un-t, 2016. P. 66–68.
- Bjerregaard P., Andersen C., Andersen O. Ecotoxicology of metals — sources, transport, and effects on the ecosystem, Handbook on the Toxicology of Metals, Nordberg G. F., Fowler B. A., Nordberg M., eds. Elsevier Science, Amsterdam. 2014. P. 425–459.
- Bradley R. W., Morris J. R. Heavy metals in fish from a series of metal contaminated lakes near sudbury ontario, Water Air Soil Pollut. 1986. No. 27. P. 341–354.
- Bulahtina G. K. Bakaneva A. A. Kudryashov A. V. Kudryashova N. I. The level of Zn, Cu, Pb, Cd and Ni in the tissues and organs of the main representatives of the ichthyofauna of the Lower Volga, Aridnye ekosistemy. 2020. T. 26, No. 4 (85). P. 157–162.
- Cehanovich I. A. Lentovskiy A. S. Holodenko V. A. Assessment of copper ion content in the surface waters of the Irtysh River// Tehnika i tehnologiya neftehimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: Materialy 7-y mezhdunar. nauch, tehn. konf., Omsk, 24–28 aprelya 2017 goda. Omsk: Omskiy gop. tehn. un-t, 2017. P. 222–223.
- Chemagin A. A. Volosnikov G. I. Kyrov D. N. Liberman E. L. Heavy metals Hg, Cd, Pb in the body of sterlet

- (*Acipenser ruthenus* L.), Lower Irtysh, Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. T. 22, No. 2. P. 225–233. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-225-233
- Collection of the most important official materials on sanitary and anti-epidemic issues: In 7 volumes Vol. V: Sanitary rules and regulations (SanPiN), hygienic standards and a list of methodological guidelines and recommendations on food hygiene. M.: MP «Rarog», 1992.
- Efimova I. O. Grigor'eva V. V. Tihonova G. P. Determination of the quality of marine fish and the content of heavy metals in it, Vestnik Chuvashskoy gosudarstvennoy sel'skohozyaystvennoy akademii. 2018. No. 4 (7). P. 47–52. DOI: 10.17022/fhss-js35
- Eyrh S. S. Kolotushkina L. V. Seryh T. G. The content of heavy metals in the muscle tissue of peaceful and predatory fish of the Irtysh River, Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obschestva. 2024. No. 2 (73). P. 77–94. DOI: 10.24412/2410-1192-2024-17306
- Fernandes D., Bebianno M. J., Porte C. Hepatic levels of metal and metallothioneins in two commercial fish species of the Northern Iberian shelf, Sci. Total Environ. 2008. Vol. 391. P. 159–167. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.057
- GOST 26927-86 Raw materials and food products. Methods for the determination of mercury. M.: Standartinform, 2010. 13 p.
- GOST 26929-94 Raw materials and food products. Sample preparation. Mineralization to determine the content of toxic elements. M.: Standartinform, 2010. 12 p.
- GOST 31628-2012 Food products and food raw materials. An inversion-voltammetric method for determining the mass concentration of arsenic. M.: Standartinform, 2014. 19 p.
- GOST 33824-2016 Food products and food raw materials. An inversion-voltammetric method for determining the content of toxic elements (cadmium, lead, copper and zinc). M.: Standartinform, 2016. 27 p.
- GOST R 53183-2008 Food products. Identification of trace elements. Determination of mercury by atomic absorption spectrometry of cold steam with preliminary mineralization of the sample under pressure. M.: Standartinform, 2010. 12 p.
- Glushkov S. V. Environmental problems of the Irtysh River and ways to solve them, Dekada ekologii: Materialy H Yubileynogo mezhdunarodnogo konkursa, Omsk, 11–19 maya 2016 goda. Omsk: Omskiy universitet dizayna i tekhnologiy, 2016. P. 100–102.
- Gorbunov A. V. Ermolaev B. V. Petrenko D. B. и др. Bioakkumulyaciya tyazhelyh metallov i drugih toksichnyh elementov v myshchah ryb basseyna r. Volgi. // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2023. No. 2. P. 80–88. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-080-088
- Houserova P., Kuban V., Spurny P., Habarta P. Determination of total mercury and mercury species in fish and aquatic ecosystems of Moravian rivers, Veterinarni Medicina. 2006. Vol. 51 (3). P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.17221/5527-VETMED>
- Karl H., Kammann U., Aust M., O., Manthey-Karl M., Lüth A., Kanisch G. Large scale distribution of dioxins, PCBs, heavy metals, PAH-metabolites and radionuclides in cod (*Gadus morhua*) from the North Atlantic and its adjacent seas, Chemosphere. 2016. Vol. 149. P. 294–303. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.01.052
- Kovekovdova L. T. Simokon' M. V. Assessment of the content of metals and arsenic in bottom sediments and fish from the rivers of the Peter the Great Bay basin (Sea of Japan), Izvestiya TINRO. 2010. T. 160. P. 223–235.
- Liu Y., Chen Q., Li Y., Bi L., Jin L., Peng R. Toxic Effects of Cadmium on Fish, Toxics. 2022. Vol. 10, 622. 19 p. DOI: 10.3390/toxics10100622
- Lobanova T. A. Features of accumulation of heavy metals by commercial fish species, Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. A. Nekrasova. 2008. T. 14, No. 1. P. 18–21.
- Lopareva T. Ya. Sharipova O. A. Petrushenko L. V. The level of accumulation of toxicants in the muscle tissue of fish in the water basins of the Republic of Kazakhstan, Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyaystvo. 2016. No. 2. P. 115–122.
- Makarova O. A. Ecological assessment of heavy metal content in the water-soil-plant system in the riverbed part of the Irtysh River floodplain: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Omsk, 2009. 17 p.
- Methodological Guidelines 4.1.1472-03 Atomic absorption determination of the mass concentration of mercury in biomaterials of animal and plant origin (food, feed, etc.). M.: Federal'nyy centr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. 59 p.
- Moiseenko T. I. Gashkina N. A. Biogeochemistry of cadmium: anthropogenic dispersion, bioaccumulation and ecotoxicity, Geohimiya. 2018. No. 8. P. 759–773. DOI: 10.1134/S001675251808006X
- Moiseenko T. I. The influence of geochemical factors of the aquatic environment on the bioaccumulation of metals in fish, Geohimiya. 2015. No. 3. P. 222–233. DOI: 10.7868/S0016752515030097
- Novikov M. A. Gorbacheva E. A. Harlamova M. N. Cadmium content in commercial fish of the Barents Sea (according to long-term data), Trudy VNIRO. 2024. T. 198. P. 87–99. DOI: 10.36038/2307-3497-2024-198-87-99

- Pintaeva E. C. Bazarsadueva S. V. Radnaeva L. D. и др. Soderzhanie i harakter nakopleniya metallov v rybah reki Kichery (pritok oz. Baykal). , Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2011. T. 18, No. 1. P. 87–92.
- Popov P. A. Androsova N. V. The content of heavy metals in the muscle tissue of fish from the reservoirs of the Ob River basin, Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2014. No. 4 (28). P. 108–122.
- Promotorova E. Yu. Ecology of cyprinid fishes of the Lower Irtysh basin. Tambov: ООО «Konsaltingovaya kompaniya Yukom», 2019. 80 p.
- SanPiN 2.3.2.1078–01 Hygienic requirements for food safety and nutritional value: as amended. dated July 6, 2011, Meganorm. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293855/4293855259.htm> (data obrascheniya: 23.07.2025).
- Sebah L. K. Pankratova T. M. Avdeeva T. M. Assessment of accumulation of heavy metals in fishing facilities of the Azov-Black Sea basin, Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo hozyaystva i okeanografii. 1995. T. 41. P. 87–90.
- Technical Regulations of the Customs Union TR CU 021/2011 «On Food Safety», approved by the Decision of the Commission of the Customs Union dated December 9, 2011 No. 880 (as amended on April 22, 2024). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320560> (data obrascheniya: 23.07.2025).
- Teplaya G. A. Rybkin V. S. Polyanskaya N. V. Kalyatkina V. P. Distribution of heavy metals in the muscle tissue of various fish species in the Astrakhan region, Astrahanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2024. No. 2 (80). P. 91–97. DOI: 10.36698/2304-5957-2024-2-91-97
- Vundcettel' M. F. Kuznecova N. V. Heavy metal content in organs and tissues of fish of the Yakhroma River// Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyaystvo. 2013. No. 2. P. 155–158.
- Wagner A., Boman J. Biomonitoring of trace elements in muscle and liver tissue of freshwater fish, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2003. Vol. 58, No 12. P. 2215–2226. DOI: 10.1016/j.sab.2003.05.003
- Yeşilbudak B., Erdem C. Cadmium accumulation in gill, liver, kidney and muscle tissues of Common carp, Cyprinus carpio, and Nile tilapia, Oreochromis niloticus, Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2014. Vol. 92. P. 546–550. DOI: 10.1007/s00128-014-1228-3
- Zharkova N. N. Bazhenova O. P. Boltovskaya A. S. Dynamics of heavy metal content in the water of the Irtysh River during the open water period within the borders of the Omsk region, Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2025. T. 17, No. 2. P. 98–123. DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1109
- Zharkova N. N. Bazhenova O. P. Gavril'chenko O. L. Boltovskaya A. S. Seasonal dynamics of the chemical composition of the Irtysh River water in the Omsk region, Vodnye bioresursy i sreda obitaniya. 2024. T. 7, No. 2. P. 7–20. DOI: 10.47921/2619-1024_2024_7_2_7
- Zharkova N. N. Boltovskaya A. S. Mercury content in natural water and sediments in the transboundary section of the Irtysh River (Omsk region), Ekologicheskie chteniya – 2025: Materialy HV I Nacional'noy nauchno-prakticheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem), Omsk, 04–05 iyunya 2025 goda. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. P. A. Stolypina, 2025. P. 704–710.
- Zubkova V. M. Rozumnaya L. A. Bolotov V. P. The content of heavy metals in the tissues and organs of various fish species of the Volgograd reservoir, Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyaystvo. 2016. No. 4. P. 93–98.



УДК 574.587

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД ПРИТОКОВ РЕКИ СУХОНЫ (ВОЛОГОДСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ЗООБЕНТОСА

ИВИЧЕВА
Ксения Николаевна

кандидат биологических наук, Санкт-Петербургский филиал ГНЦ
РФ ФГБНУ ВНИРО, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 26,
ivicheva@niorh.vniro.ru

ФИЛОНЕНКО
Игорь Владимирович

кандидат биологических наук, Вологодский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ
ВНИРО, г. Вологда, ул. Левичева, д. 5,
filonenko@vologod.vniro.ru

КОМАРОВА
Александра Сергеевна

кандидат биологических наук, Институт биологии внутренних
вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук; Санкт-
Петербургский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ ВНИРО, Ярославская обл.,
Некоузский р-н, п. Борок, 109, komarowa.aleks@yandex.ru

Ключевые слова:
зообентос
биоиндикация
качество вод
малые реки
Вологодская область

Аннотация: В летний период 2016–2018 гг. проведены гидробиологические исследования 40 притоков р. Сухоны (бассейн Белого моря). На основании количественных и качественных данных зообентоса осуществлена оценка экологического состояния рек. По показателям зообентоса к группе наиболее чистых относятся реки с высокой скоростью течения; наиболее загрязненных – реки, протекающие вблизи населенных пунктов, а также по заболоченным территориям. Показан вклад гидрологических характеристик водосбора в формирование качества вод. Полученные индексы в ряде случаев демонстрируют противоречивые результаты. Значение индексов EPT, ASPT, BMWP, OQR могут снижаться в водотоках, имеющих маленькие размеры. На значение индекса Гуднайт – Уитли могут влиять болота, расположенные на водосборе. Показано, что фоновые значения индекса сапробности для водотоков таежной зоны находятся в диапазоне 1.5–2.5. Индексы видового разнообразия и сапробности следует рассматривать в сравнительном ключе.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Д. М. Безматерных

Получена: 17 ноября 2025 года

Подписана к печати: 25 декабря 2025 года

Введение

Представители зообентоса считаются одним из лучших объектов для биоиндикации пресноводных экосистем. Длительные жизненные циклы и оседлость организмов зообентоса позволяют оценивать качество вод по структуре сообществ донных организмов. К настоящему времени сделан ряд обзоров методов биоиндикации пресных вод (Баканов, 2000; Шуйский и др., 2002; Семенченко, 2004; Шитиков и др., 2005; Безматерных, 2007 и пр.), проводимых на разных уровнях:

от обилия крупных таксонов до видовой идентификации организмов. В то же время система биоиндикации водных объектов имеет ряд ограничений. Во-первых, эти методы плохо работают в экстремальных климатических условиях (например, на Крайнем Севере, в аридных районах, в высокогорных водных объектах). Во-вторых, при выборе разных методов биоиндикации необходимо анализировать, вызвано ли конкретное низкое качество вод антропогенной нагрузкой или же оно объясняется гидрологическими характеристиками водотока (Гончаров и др.,

2025). В-третьих, чем меньше водный объект, тем быстрее его обитатели реагируют на антропогенную нагрузку.

Методы биоиндикации наиболее хорошо работают на реках, расположенных на территории крупных городов (Безматерных, 2018; Лобуничева и др., 2023; Петров, Якушева, 2022; Ивичева и др., 2024). В большинстве случаев речь идет о комплексной антропогенной нагрузке, однако есть примеры, когда экологическая оценка проводится при конкретном типе или источнике загрязнения (Яныгина, Евсеева, 2022; Холмогорова, 2024). По некоторым данным (Яныгина, 2023), лучшим периодом для отбора проб зообентоса является период перед вскрытием льда. Также есть мнение, что оптимальным периодом для отбора проб макробеспозвоночных является период наибольшего развития высшей водной растительности (Ивичева и др., 2024; Гончаров и др., 2025).

Цель данной работы заключалась в оценке экологического состояния притоков р. Сухоны по макрозообентосу с применением разных индексов и выбор наиболее подходящих.

Материалы

Река Сухона является крупнейшей на территории Вологодской области, водосбор ее составляет около трети от площади региона. Длина реки составляет 558 км. Площадь водосбора 50300 км² (Болотова и др., 2007), относится к бассейну Белого моря. Река имеет 70 притоков I порядка. На своем протяжении бассейн р. Сухоны охватывает 13 ландшафтных районов, принадлежащих к Сухона-Двинской физико-географической области Восточно-Европейской равнины (Максутова, Воробьев, 2007): Кубеноозерский, Прикубенский, Харовский, Кулойский, Нижнесухонский, Устьянский, Мало-Двинский, Вологодско-Грязовецкий, Верхнесухонский, Авнигский, Галичский, Кичменгский, Среднеюгский. В настоящей работе исследованы притоки р. Сухоны I–IV порядков разной протяженности. Территория Вологодской области расположена в таежной зоне, на стыке южной и средней ее подзон. Рассматриваются реки, расположенные в обеих подзонах тайги. Территория Европейского Севера характеризуется умеренным уровнем антропогенной нагрузки, носящей, как правило, локальный характер, проявляющийся в виде сбросов отдельных предприятий. Большая часть водосборов исследованных рек покрыта лесом, высокую долю составляют

болота (Филоненко, Филиппов, 2013). Ряд исследованных рек протекает вблизи крупных населенных пунктов: городов Вологда и Тотьма, поселка Юбилейный, сел Шуйское и Нюксеница.

Методы

Отбор проб зообентоса проводили на 40 реках, являющихся притоками разного порядка р. Сухоны (рис. 1), в июле – сентябре 2016–2018 гг. Число отобранных проб на реке колебалось от 4 до 13 и зависело от разнообразия биотопов на модельном участке. Количество проб и характеристики водных объектов приведены в табл. 1. Для отбора проб использовали штанговый дночерпатель ГР-91 (площадь захвата 0.07 м²), каждая проба состояла из трех повторностей. Помимо этого, проводили смывы с камней. Пробы промывали через сито с ячейей 250 мкм и фиксировали 4%-ным раствором формалина. Камеральную обработку проб и видовую идентификацию извлеченных особей проводили в лабораторных условиях.

Для оценки качества вод использовали следующие индексы: EPT-индекс, Biological Monitoring Working Party Index (BMWP), Average Score per Taxon (ASPT), Overall Quality Rating (OQR) (Поздеев, Аристова, 2023), индекс Гуднайта – Уитли, доминирования (D) (обратное значение индекса Симпсона), Шеннона (H), Маргалефа (M) (расчет выполнен в программе Past V4.03), сапробности. Расчет последних трех индексов выполняли на основании численности видов. Для определения сапробности использовали индекс Пантле – Букка в модификации Сладечека (Sládeček, 1973). Для определения индикаторного значения отдельных видов макробеспозвоночных ориентировались на работы (Sládeček, 1973; Wegl, 1983; Щербина, 2010). При построении карты в качестве слоя болот использованы данные (Филоненко, Филиппов, 2013). Корреляционный анализ и анализ избыточности (RDA) выполнены в среде R. Корреляционный анализ проводили методом Пирсона. Использованы пакеты: vegan, Hmisc, GGally, RVAideMemoire. Структурирования станций сбора зообентоса в RDA проверяли по принадлежности к ландшафтному району, типу субстрата, порядку притока и уровню освоенности водосбора водотока. Уровень освоенности ранжировали по наличию населенных пунктов – сильная (наличие городов и сел), умеренная (небольшие деревни) и слабая (отсутствие населенных пунктов или единичные нежилые строения).

Таблица 1. Сроки, количество отобранных проб и характеристики станций

№	Река	Порядок притока	L, км	Ландшафт	Степень освоённости водосбора	B, м	h, м	V, м/с	Грунт	N
1	Лоста	II	38	Верхнесухонский	сильная	4	0.8	0.01	ил, детрит	6
2	Комья	IV	39	Верхнесухонский	сильная	7	0.5	0.01	песок, детрит	7
3	Лухта	III	31	Верхнесухонский	сильная	5	0.5	0.01	песок, детрит	7
4	Лежа	I	178	Верхнесухонский	сильная	20	1.8	0.2	глина	4
5	Великая	II	47	Верхнесухонский	умеренная	15	0.5	0.1	песок, ил, галька	4
6	Черный Шингарь	II	21	Верхнесухонский	умеренная	5.5	1.5	0.08	песок, глина, ил	4
7	Белый Шингарь	II	19	Авнига	сильная	3	0.3	0.3	песок	8
8	Тиновка	IV	21	Авнига	умеренная	4	1.5	0.01	глина, ил	4
9	Шуя	I	54	Верхнесухонский	умеренная	3	1	0.19	песок, глина	4
10	Везгуниха	I	3	Верхнесухонский	умеренная	3	1	0.1	песок, глина	4
11	Стрелица	I	57	Верхнесухонский	умеренная	4	0.4	0.45	песок, камни	4
12	Турица	I	15	Харовский	умеренная	1–1.5	0.3–0.5	0.17	песок, камни, детрит	4
13	Шонтас	I	36	Харовский	умеренная	5	0.7–1	0.11	песок, ил	4
14	Тиксна	II	51	Харовский	сильная	20	2	0.63	песок, камни	4
15	Вопра	III	29	Харовский	умеренная	3	1	0.25	ил, песок	4
16	Толокнянка	IV	6	Харовский	умеренная	1.5–2	0.3–0.6	0.1	песок, камни	4
17	Обрубновка	IV	6	Харовский	умеренная	2–2.5	0.5	0.05	песчаный	4
18	Великовка	IV	4	Кулойский	умеренная	1.5	0.5	0.21	песок, камни	4
19	Царева	I	46	Кулойский	сильная	25	1.5	0.25	песок, ил	4
20	Кобаньга	II	62	Кулойский	сильная	5	1	0.79	песок, камни	4
21	Песья Деньга	I	26	Кулойский	сильная	7	1	0.47	песок, камни	4
22	Ковда	II	15	Кулойский	сильная	4.5	0.8	0.08	песок, камни	4
23	Еденьга	I	93	Кулойский	сильная	20	1–1.5	0.29	песок, камни	4
24	Малая Нореньга	I	30	Кулойский	умеренная	2–4	0.1–0.5	0.25	песок, камни	4
25	Пельшма	I	82	Кулойский	умеренная	6–8	0.4–1	0.3	песок, камни	4
26	Кирженьга	I	33	Кулойский	умеренная	5–7	0.5	0.3	песок	4
27	Коченьга	I	42	Кулойский	умеренная	12–15	0.5–0.8	0.18	плотный стланец, песок	4
28	Сивеж	II	10	Кулойский	умеренная	4–6	1–1.2	0.05	песок	4
29	Саковез	III	7	Кулойский	умеренная	0.4–0.7	0.2–0.4	0.05	песок	4
30	Саланга	I	40	Кулойский	умеренная	5–8	0.7–1	0.06	песок, камни	4
31	Уфтюга	I	117	Нижнесухонский	сильная	20–30	1–1.5	0.09	песок, камни	6
32	Кичуга	I	10	Нижнесухонский	слабая	10	2	0.01	песок	4
33	Малая Сельменьга	I	11	Нижнесухонский	слабая	5	0.1–0.5	0.21	песок, мелкие камни, валуны	4

Таблица 1. Продолжение

№	Река	Порядок притока	L, км	Ландшафт	Степень освоенности водосбора	B, м	h, м	V, м/с	Грунт	N
34	Левая Кичуга	I	10	Нижнесухонский	слабая	0.5–1	0.5	0.01	ил, песок, глина	4
35	Малая Бобровка	I	14	Нижнесухонский	слабая	2–3	0.7–1	0.01	глина, песок	4
36	Кобыла	I	7	Нижнесухонский	слабая	0.1– 0.3	0.1– 0.15	0.2	ил, глина	4
37	Левая Сученьга	I	28	Нижнесухонский	слабая	4–6	0.3–0.5	0.25	песок, камни	4
38	Верхняя Ерга	I	140	Нижнесухонский	слабая	20	0.5–1	0.45	песок, камни	13
39	Барачиха	II	12	Нижнесухонский	слабая	1.5	1–1.5	0.17	песок, камни	3
40	Нижняя Ерга	I	135	Устьянский	слабая	20	2.5	0.1	песок, камни	2

Примечание. L – длина водотока, км; B – ширина водотока, м; h – глубина водотока, м; V – скорость течения, м/с; N – число проб.

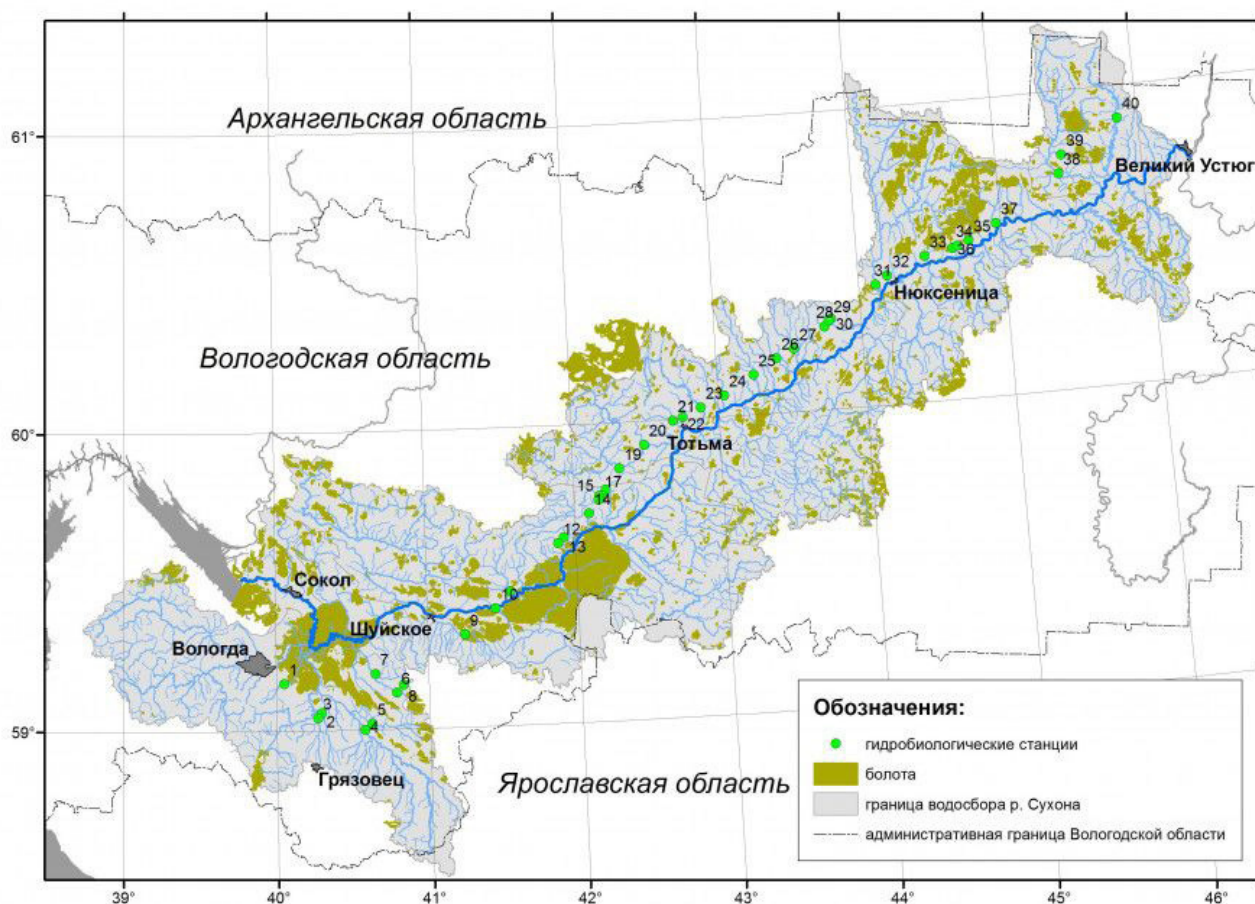


Рис. 1. Схема отбора проб в бассейне р. Сухоны (нумерация реки соответствует таковой в табл. 1–3)
Fig. 1. Sampling scheme in the Sukhona River basin (the river numbering corresponds to that in Tables 1–3)

Результаты

Всего в изученных притоках реки Сухоны отмечено 172 вида и таксона более высокого ранга водных макробеспозвоночных. Наибольшее число видов отмечено в реках Верхняя Ерга (84), Уфтюга (59), Белый Шингарь (45) (табл. 2). Данные водотоки характеризуются высокой скоростью течения и наличием большого числа биотопов на участках, где проводился отбор проб. Наименьшее число видов отмечено в малых реках (Барачиха, Левая Кичуга, Малая Бобровка, Кобыла, Кичуга, Великовка, Обрубновка, Сивеж) и реках со значительной антропогенной нагрузкой (Лоста). В этих же водотоках зафиксировано наименьшее число представителей таких отрядов насекомых, как поденки (Ephemeroptera), веснянки (Plecoptera), ручейники (Trichoptera). В реках Верхняя Ерга и Уфтюга отмечено наибольшее число видов ЕРТ, где они составляют чуть более трети от всего видового списка. Вместе с тем в реках Кобаньга и Левая Сученьга виды ЕРТ составляют практически половину от всего видового списка. Таксоны ЕРТ имеют высокий «вес» при расчете индекса BMWP, рассчитанного на его основе индекса ASPT и объединяющего оба индекса OQR. Соответственно, наилучшее качество вод и грунтов (очень чистые) отмечено в реках, где наблюдается наибольшая доля этих таксонов в общем числе видов (Верхняя Ерга, Уфтюга, Кобаньга). Наихудшее качество вод (очень грязные) отмечено в р. Барачиха, где наблюдается наименьшее из всех водотоков число видов. Также низкое качество вод (грязные) отмечено в реках, протекающих вблизи населенных пунктов (Лоста вблизи г. Вологды, Обрубновка и Великовка вблизи пос. Юбилейный, Кичуга вблизи с. Нюксеница), и в реках с малой длиной и протекающих по заболоченным территориям (Тиновка, Сивеж, Левая Кичуга, Малая Бобровка, Кобыла).

При оценке исследованных рек по индексу Гуднайта – Уитли (см. табл. 2) к категории грязных можно отнести только реки Барачиха и Саковез. В категорию «загрязненных» также попали реки Везгуниха, Шонтас, Обрубновка. Большинство исследованных рек относятся к категории «чистые».

Наибольшее значение индекса Шеннона отмечено для рек Уфтюга, Малая Сельменьга, Верхняя Ерга, а индекса Менхиника – Верхняя Ерга и Уфтюга. Наименьшее значение данных индексов отмечено для р. Барачиха. Все исследованные водотоки отно-

сятся к α - и β -мезосапробным. В р. Саковез значение индекса сапробности было близко к полисапробной зоне. В р. Коченьга – к олигосапробной.

Индексы, основанные на наличии или отсутствии крупных таксонов (BMWP, ASPT, OQR) и индекс Гуднайта – Уитли для ряда рек показали противоречивые результаты. Все реки, которые попали в категорию «чистые» по индексу OQR, также характеризуются как чистые по индексу Гуднайта – Уитли. В то же время реки, характеризующиеся как «грязные» по индексу OQR, могут характеризоваться как «чистые» по индексу Гуднайта – Уитли (например, реки Малая Бобровка, Кобыла, Кичуга, Сивеж, Великовка, Лоста). Все эти реки имеют длину не более 15 км, протекают по болотам (см. рис. 1), вследствие чего в них отмечено низкое видовое богатство. При этом реки Кичуга и Лоста протекают вблизи населенных пунктов (г. Вологда и с. Нюксеница соответственно), и низкое качество вод по индексу OQR в них мы можем связать с антропогенной нагрузкой. В то же время вблизи других малых рек (Малая Бобровка, Кобыла, Сивеж) населенные пункты вообще отсутствуют. Низкое значение индексов BMWP, ASPT, OQR в них объясняется скорее малыми размерами, отбором проб вблизи истоков, малым числом биотопов. Для р. Нижняя Ерга низкое качество вод по индексу OQR связано скорее с малым количеством проб на участке исследования, и в данном случае мы склонны верить результатам индекса Гуднайта – Уитли.

Выявлена значимая положительная корреляционная связь между индексами ЕРТ, BMWP, ASPT, OQR, взаимосвязанными как между собой, так и с индексом Менхиника (М) (рис. 2). В основе расчета данных индексов используется показатель видового богатства, что может определять высокую степень корреляции вышеперечисленных индексов. Кроме того, отмечена положительная значимая корреляция между индексами Гуднайта – Уитли (Г–У), сапробности (S) и индексом доминирования (D). В расчет индексов Гуднайта – Уитли и сапробности определяющее значение в наших исследованиях вносит численность олигохет-тубифицид (*Limnodrilus hoffmeisteri* и *Tubifex tubifex*). В то же время при расчете индексов BMWP, ASPT данная группа практически не играет роли.

Гидрологические характеристики водотока (длина, ширина и скорость течения) демонстрируют достоверную корреляционную

Таблица 2. Качество вод притоков р. Сухоны

№	N	EPT	BMWP	ASPT	OQR	Качество*	Г-У	Качество**	D	H	M	S	Зона***
1	17	2	26	3.3	2.0	г.	27.7	ч.	0.17	2.06	2.73	2.68	α
2	37	12	66	4.4	3.5	з.	4.1	оч. ч.	0.28	2.07	5.04	2.48	β
3	32	5	94	5.2	5.0	ч.	27.5	ч.	0.11	0.61	5.73	2.75	α
4	29	9	81	4.8	4.0	ум. з.	12.6	оч. ч.	0.08	2.92	6.15	2.51	α
5	41	9	107	4.9	4.5	ум. з.	10.7	оч. ч.	0.19	2.48	6.7	2.45	β
6	30	7	105	4.7	4.5	ум. з.	12.6	оч. ч.	0.34	1.85	4.54	2.77	α
7	45	12	120	5.2	5.0	ч.	7.3	оч. ч.	0.23	2.24	5.98	2.39	β
8	20	0	24	3.0	2.0	г.	56.3	з.	0.6	1.63	3.41	2.97	α
9	36	5	95	5.3	5.0	ч.	29.2	ч.	0.1	2.76	6.24	2.41	β
10	21	2	51	3.9	3.0	з.	70.1	з.	0.41	1.58	3.59	3.11	α
11	21	4	39	4.3	3.0	з.	10.6	оч. ч.	0.18	2.23	4.1	2.33	β
12	25	4	63	4.9	4.0	ум. з.	31.9	ум. з.	0.14	2.36	4.85	2.77	α
13	25	5	71	5.1	4.5	ум. з.	55.7	з.	0.28	1.85	4.21	3.27	α
14	29	10	64	5.8	5.0	ч.	16.4	оч. ч.	0.08	2.81	5.38	2.31	β
15	21	3	50	5.5	4.5	ум. з.	19.5	оч. ч.	0.18	2.27	4.6	2.71	α
16	23	4	36	4.5	3.0	з.	37.2	ум. з.	0.14	2.44	4.19	2.86	α
17	15	3	28	4.0	2.5	г.	54.2	з.	0.15	2.34	3.43	2.7	α
18	10	3	25	4.4	2.5	г.	22.2	ч.	0.16	2.07	2.36	2.69	α
19	28	6	64	4.9	4.0	ум. з.	11.7	оч. ч.	0.15	2.47	5.21	2.14	β
20	29	14	105	6.6	6.0	оч. ч.	9.2	оч. ч.	0.1	2.72	6.06	2.37	β
21	30	11	79	4.6	4.0	ум. з.	1.5	оч. ч.	0.08	2.88	5.89	2.21	β
22	24	8	58	5.3	4.0	ум. з.	9.9	оч. ч.	0.12	2.52	4.52	2.34	β
23	35	11	98	5.4	5.0	ч.	25.9	ч.	0.14	2.49	5.85	2.62	α
24	23	3	52	4.7	3.5	з.	26.7	ч.	0.18	2.21	4.53	2.73	α
25	26	6	74	4.9	4.0	ум. з.	2.3	оч. ч.	0.16	2.41	5.13	2.1	β
26	33	7	59	4.5	3.0	з.	23.3	ч.	0.16	2.38	5.32	2.55	α
27	26	10	79	5.3	4.5	ум. з.	0.5	оч. ч.	0.12	2.5	4.69	1.55	β
28	16	2	28	4.0	2.5	г.	11.8	оч. ч.	0.35	1.66	2.92	2.71	α
29	23	4	52	4.0	3.0	з.	75.2	г.	0.56	1.24	3.83	3.35	α
30	25	7	86	5.4	4.5	ум. з.	32.6	ч.	0.08	2.8	5.39	2.53	α
31	59	20	145	5.8	6.0	оч. ч.	10.6	оч. ч.	0.07	3.18	8.76	2.1	β
32	16	1	18	3.6	2.5	г.	26.1	ч.	0.12	2.41	3.92	2.47	β
33	29	8	63	5.3	4.5	ум. з.	12.1	оч. ч.	0.07	3.01	6.51	2.19	β
34	10	1	16	3.2	2.0	г.	43.3	ум. з.	0.25	1.74	2.65	2.79	α
35	12	0	15	3.0	2.0	г.	11.1	оч. ч.	0.19	1.98	2.76	2.06	β
36	11	1	14	2.8	1.5	г.	25.2	ч.	0.36	1.46	1.99	3.1	α
37	20	9	67	5.6	5.0	ч.	8.1	оч. ч.	0.17	2.26	4.14	2.19	β
38	84	30	261	6.4	7.0	оч. ч.	2	оч. ч.	0.11	2.93	11.3	1.71	β
39	9	0	11	2.8	1.5	оч. г.	68.3	г.	0.47	1.24	1.95	2.49	β
40	10	5	40	5.7	4.5	ум. з.	23.5	ч.	0.12	2.2	3.18	2.2	β

Примечание. N – число видов; EPT – количество видов Ephemeroptera + Plecoptera + Trichoptera; BMWP – Biological Monitoring Working Party Index; ASPT – Average Score per Taxon; OQR – Overall Quality Rating.; * – качество вод и грунтов, оцененное по индексу OQR: оч. ч. – очень чистые, ч. – чистые, ум. з. – умеренно загрязненные, з. – загрязненные, г. – грязные, оч. г. – очень грязные; Г-У – индекс Гуднайта – Уитли; ** – качество вод по значению индекса Гуднайта – Уитли по ГОСТ 17.1.3.07-82; D – индекс доминирования; H – индекс Шеннона, бит/экз.; M – индекс Менхиника; S – сапробность, *** – зона сапробности: α – α-мезосапробная, β – β-мезосапробная.

H, M; отрицательная – с индексами Г–У, D и S. Глубина водотоков значимой корреляционной связи с индексами не имела.

											S	
										M	-0.5	
									H	0.6	-0.6	
								D	-0.7	-0.5	0.6	
							Γ-Y	0.6	-0.6	-0.5	0.7	
						OQR	-0.5	-0.5	0.5	0.8	-0.5	
					ASPT	0.9	-0.5	-0.6	0.6	0.7	-0.5	
				BMW P	0.7	0.9	-0.4	-0.3	0.4	0.9	-0.4	
			EPT	0.9	0.7	0.8	-0.5	-0.4	0.6	0.9	-0.6	
		V	0.5	0.4	0.5	0.5	-0.4	-0.3	0.4	0.4	-0.4	
	h	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	-0.1	0.2	0.1	-0.2	
B	0.6	0.2	0.6	0.5	0.5	0.5	-0.4	-0.4	0.5	0.6	-0.5	
L	0.8	0.5	0.3	0.6	0.6	0.5	0.6	-0.4	-0.4	0.5	0.6	-0.4

Fig. 2. Values of the correlation coefficients of biotic indices and hydrological indicators (significant indicators are highlighted in bold, $p < 0.05$)

Для интерпретации связей значений биотических индексов от гидрологических особенностей рек выполнен анализ избыточности (RDA). Анализ избыточности выполнен для модели, где в качестве предикторов для биотических индексов используются показатели длины реки и ширины, глубины, скорости течения на месте отбора проб. Наилучший результат был получен в модели из комбинации суммы показателей: длины реки, ширины, глубины и скорости течения (рис. 3). Модель была статистически значима (пермутационный тест, $p < 0.0001$). Точками на рисунке показаны станции на реках, крестиками – показатели биотических индексов, стрелками – факторы среды. В данной модели первая каноническая ось (RDA1) описывает 45.7 % суммарной изменчивости, RDA2 – 54.3 %. Значимость эффекта воздействия факторов определялась тестом по F-критерию с использованием рандомизации. В модели из суммы четырех факто-

ров три имеют значимое влияние: ширина реки – $p < 0.001$, глубина и скорость течения – $p < 0.01$. Общая направленность RDA1 с показателями длины реки, ширины и скорости течения дает возможность предположить ведущее значение комплекса данных факторов в формировании величины биотических индексов.

Основная доля (96,8 %) дисперсии только факторов среды приходится на первую компоненту объясняемой вариации. В этом случае для станций на реках наблюдается тенденция к группировке в отношении к песчаным и каменистым субстратам (рис. 4). Виды-индикаторы для биотических индексов бентосных сообществ каменистых и песчаных биотопов более специфичны, в то время как виды с илистых и глинистых субстратов имеют более широкое распространение. Структурирования рек по принадлежности к ландшафтному району или порядку притока р. Сухоны не обнаружено.

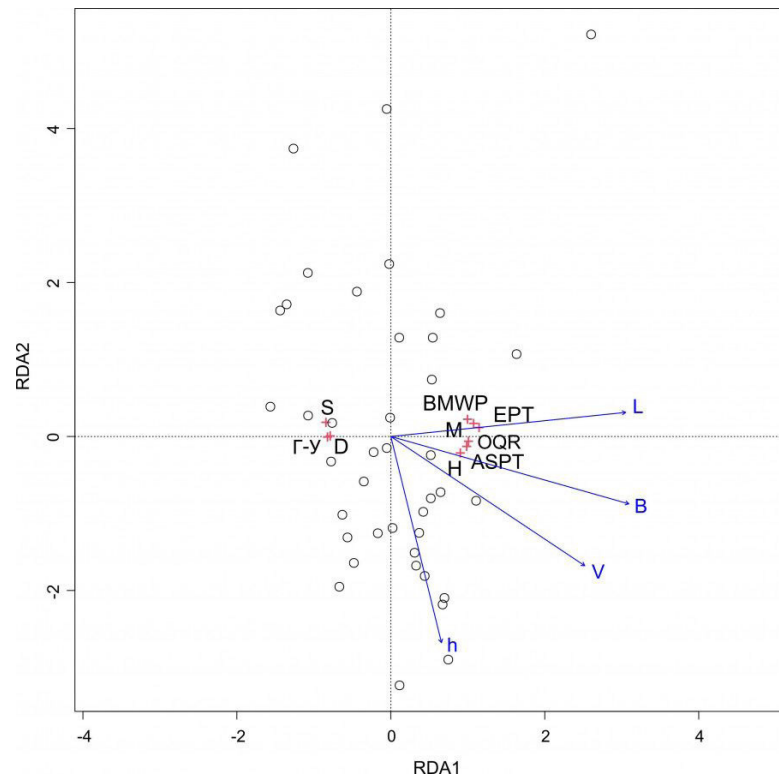


Рис. 3. Визуализация данных анализа избыточности (RDA)
Fig. 3. Visualization of redundancy analysis data (RDA)

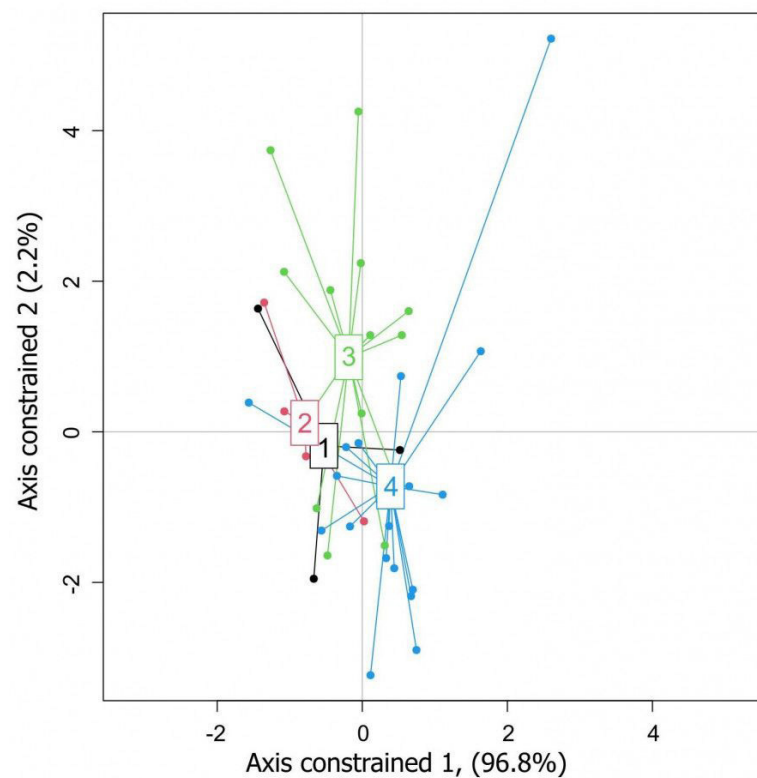


Рис. 4. Группировка рек в зависимости от типа субстрата методом RDA (глинистый – 1, илистый – 2, песчаный – 3, каменистый – 4)

Fig. 4. Grouping of rivers depending on the type of substrate by the RDA method (clay – 1, muddy – 2, sandy – 3, rocky – 4)

В структурировании рек по уровню освоённости водосборов наблюдается тенденция к группировке рек с сильным воздействи-

ем на водосбор (рис. 5). Реки с умеренной и слабой освоённостью водосбора образуют единую группу.

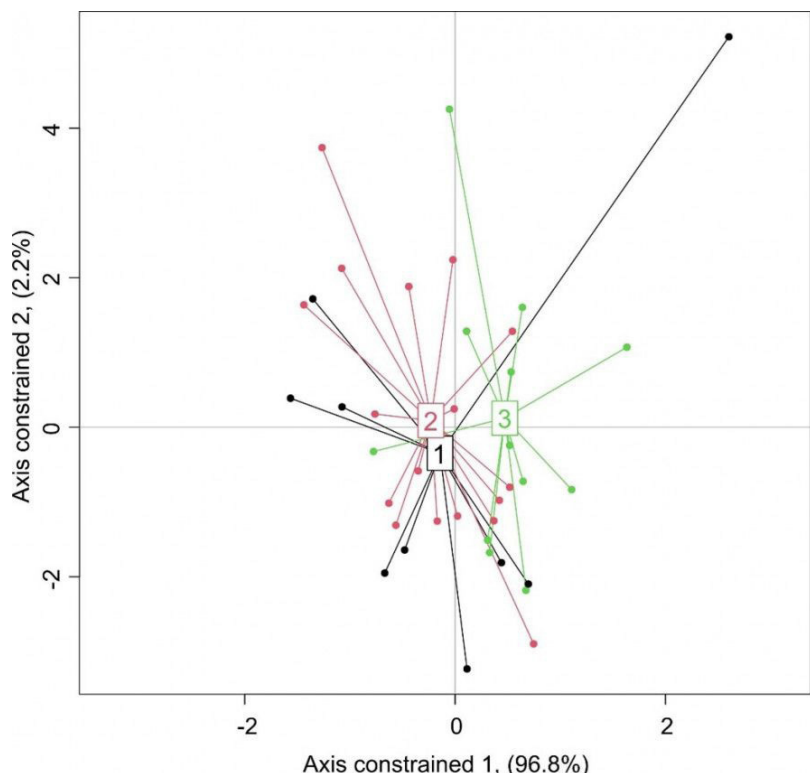


Рис. 5. Группировка рек в зависимости от степени освоённости водосбора методом RDA (слабая – 1, умеренная – 2, сильная – 3)

Fig. 5. Grouping of rivers depending on the degree of development of the catchment area by the RDA method (weak – 1, moderate – 2, strong – 3)

Обсуждение

При оценке экологического состояния малых рек при помощи нескольких индексов самое высокое качество вод отмечено в реках Верхняя Ерга, Уфтьюга, Белый Шингарь, Кобаньга. Эти реки характеризуются высокой скоростью течения, песчано-каменистыми грунтами. Таксоны ЕРТ здесь составляют от трети до половины всего видового списка. Ранее авторами для притоков р. Сухоны также было показано высокое качество вод в реках Белый Шингарь и Вологда в ее верховьях (Ивичева и др., 2024). В перечисленных реках отмечено большее число биотопов (плесы, перекаты). Как следствие, они характеризуются большим видовым богатством и количеством реофильных видов.

Самое низкое качество вод по всем индексам было отмечено в р. Барачихе, где зафиксировано наименьшее число видов зообентоса. Низкое качество вод в данном случае может быть связано с протеканием реки среди болот и отбором проб вблизи реки. Низкое качество вод также отмечено для рек, расположенных вблизи населенных

пунктов (Лоста, Великовка, Обрубновка, Кичуга) и для очень малых рек, протекающих по заболоченным территориям (Тиновка, Сивеж, Саковеж, Малая Бобровка, Левая Кичуга, Кобыла). Во всех реках отмечено низкое значение ЕРТ и BMWP индексов, значение индекса сапробности относится к α -сапробной зоне или же близко к ней.

Индексы BMWP, ASPT, OQR и индекс Гуднайта – Уитли для ряда рек показали противоречивые результаты. При этом реки, отнесенные по индексу OQR к категории «чистых», характеризуются как «чистые» и по индексу Гуднайта – Уитли. В то же время «грязные» по индексу реки могут характеризоваться как «чистые» по индексу Гуднайта – Уитли. Для ряда рек мы можем объяснить низкое качество вод по индексу OQR близостью к населенному пункту. Для других же рек низкое качество вод объясняется скорее их малыми размерами и заболоченностью водосборов. Индексы BMWP, ASPT, OQR оценивают состояние сообществ по всему набору видов в водотоке, а для индекса Гуднайта – Уитли используется лишь одна индикатор-

ная группа. Видовое богатство рек зависит от размера водотока (Алимов и др., 2013), а также от количества биотопов на участке отбора пробы (наличие плесов и перекатов, каменистого грунта, зарослей макрофитов). Как правило, вблизи истоков количество биотопов в реках снижается (Алимов и др., 2013). Важным фактором, который отражается на видовом составе зообентоса, является также высокая заболоченность водосбора р. Сухоны (см. рис. 1). Так, для болотных водотоков наблюдается снижение таксономического разнообразия (Ивичева, Филиппов, 2017). Наряду с реофильными таксонами (поденки, ручейники) из состава донных сообществ выпадают также олигохеты. Этим, вероятно, и объясняется высокое значение индекса Гуднайта – Уитли для ряда водотоков. Сомнение в применении индекса Гуднайта – Уитли для оценки качества вод малых рек ранее высказывалось в работе (Даирова, Живоглядова, 2014), однако в данном исследовании выпадение олигохет связано скорее с высокой скоростью течения.

При использовании индекса сапробности для малых равнинных рек крайне редко возможно получить олигосапробное качество вод. Даже реки, характеризующиеся большим числом видов, относятся к β -мезосапробным, хотя значение индекса сапробности близко к 1.5. Для равнинных рек «фоновым» является значение индекса сапробности 1.5–2. Диапазон колебаний индекса для зообентоса составляет 1.5–3.5. Это подтверждено другими исследованиями Центральной России (Холмогорова, 2024; Соколова, Мурадова, 2025).

Ряд исследований показывает, что для оценки экологического состояния малых рек наиболее подходят индексы ЕРТ, BMWP и индекс Шеннона (Даирова, Живоглядова, 2014; Андрианова, 2015; Головатюк, Зинченко, 2020; Яныгина, 2023). Высокие значения индексов ЕРТ и BMWP являются следствием гидрологических характеристик и особенностей водного объекта, в первую очередь высокой скорости течения (Гончаров и др., 2025). В нашем исследовании скорость течения имела значимую, но невысокую корреляционную связь: положительную с индексами ЕРТ, BMWP, ASPT, OQR, H, M; отрицательную – с индексами Г–У, D и S. Вероятно, это связано с тем, что реки протекают по территории низины и скорость течения в большинстве водотоков невысокая.

Применение индексов BMWP, ASPT, OQR оправдано при большом числе видов в во-

дотоке. Расчет этих индексов основан в первую очередь на реофильных таксонах зообентоса (поденки, веснянки, ручейники, жуки). При низком видовом богатстве, являющемся следствием малых размеров водотоков и высокой заболоченности, индексы BMWP, ASPT, OQR могут «снижать» качество вод. В то же время индекс Гуднайта – Уитли, использующий только одну группу гидробионтов, дает экспресс-оценку качества вод очень малых рек, но может искажаться за счет влияния болот. Исследованные нами водотоки значительно отличаются по длине, отбор проб проводился на разном от истока расстоянии. Все эти параметры могут вносить свои корректировки в расчет индексов. Индексы видового разнообразия и сапробности в меньшей степени зависят от размеров водотоков и не так искажаются вследствие малого числа биотопов или заболоченности водосбора. Однако использовать их следует в сравнительном ключе, не применяя балльную градацию.

Качество вод исследуемых притоков не имеет выраженного тренда вдоль водосбора р. Сухоны. Несмотря на меньшую освоенность водосборов восточной части Вологодской области, используемые в данном исследовании индексы качества вод дают противоположные значения для водотоков, в целом сходных по гидрологическим параметрам. Для экспресс-оценки качества вод по зообентосу следует применять индексы, использующие для своих расчетов разные показатели зообентоса. Применение только одного индекса может исказить полученную картину. Необходимо критически оценивать полученные значения. Индексы BMWP, ASPT, OQR, бесспорно, имеют преимущества в оценке качества вод, но для их корректного применения необходимо расширение сетки станций и методов сбора.

Заключение

Исследованы реки разной длины (от 4 до 170 км), отбор проб проводился на разном от истока расстоянии. Натурные исследования показали, что среди притоков р. Сухоны отмечены реки как с высоким качеством вод, так и с низким. Высокое качество вод по всем показателям отмечено в реках с большим количеством биотопов и высокой скоростью течения. Низкое качество вод в ряде случаев объясняется близостью к населенным пунктам. В то же время в очень малых реках и в реках, протекающих по болотам, качество вод, оцененное по показателям зо-

обентоса, также может снижаться. Индексы, основанные на доле крупных таксономических групп, дают более объективную картину в пределах водосборов с существенным антропогенным воздействием. Для рек, водосбор которых слабо нарушен хозяйственной деятельностью, более показательны индексы с видами-биоиндикаторами. Индексы ЕРТ, BMWP, ASPT, OQR хорошо работают в достаточно крупных реках с большим числом

битопов. Значение индекса Гудната – Уитли может искажаться в реках, протекающих по болотам. Значение индексов видового разнообразия и сапробности перспективнее использовать в сравнительном ключе, не придерживаясь балльной градации. Значение индекса сапробности для рек таежной зоны находится в β - и α -сапробной зонах, что является фоновым значением и для центральной части России.

Библиография

- Алимов А. Ф., Богатов В. В., Голубков С. М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 342 с.
- Андрианова А. В. Биотические индексы и метрики в оценке качества воды малых рек на территории природного парка «Ергаки» (юг Красноярского края) // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 68–82.
- Безматерных Д. М. Влияние антропогенного загрязнения на структуру макрозообентоса реки Барнаулки (бассейн верхней Оби) // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 1. С. 52–61. DOI: 10.7868/S0321059618010066
- Безматерных Д. М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2007. № 85. С. 1–86.
- Болотова Н. Л., Воробьев Г. А., Шестакова Л. Г. Река Сухона // Природа Вологодской области. Вологда: Изд. Дом «Вологжанин», 2007. С. 128–132.
- Головатюк Л. В., Зинченко Т. Д. Биотические идентификаторы в оценке качества воды эталонной реки: сравнительный анализ биоиндикационных индексов реки Байтуган (Высокое Заволжье) // Ученые записки Казанского университета. Сер.: Естественные науки. 2020. Т. 162, № 1. С. 134–150. DOI: 10.26907/2542-064X.2020.1.134-150
- Гончаров А. В., Палатов Д. М., Георгиади А. Г. Особенности донных биоценозов рек в разнотипных ландшафтах Верхней Волги // Биология внутренних вод. 2025. Т. 18, № 1. С. 149–159. DOI: 10.31857/S0320965225010132
- Даирова Д. С., Живоглядова Л. А. Использование различных методов биоиндикации (биотических индексов и метрик) для оценки экологического состояния и качества воды малых рек бассейна р. Лютюга (о-в Сахалин) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2014. № 6. С. 191–200.
- Ивичева К. Н., Филиппов Д. А. Водные макробеспозвоночные верховых болот центральной части Вологодской области // Труды Карельского научного центра РАН. № 9. 2017. С. 30–45. DOI: 10.17076/eco472
- Ивичева К. Н., Филиппов Д. А., Макаренкова Н. Н., Зайцева В. Л., Филоненко И. В., Зуев Ю. А. Влияние урбанизации на сообщества макрофитов, фито-, зоопланктона и макрозообентоса рек бассейна р. Сухоны // Принципы экологии. 2024. № 3. С. 27–45. DOI: 10.15393/j1.art.2024.15164
- Лобуничева Е. В., Макаренкова Н. Н., Ивичева К. Н., Филоненко И. В., Литвин А. И., Попета Е. С., Думнич Н. В. Оценка экологического состояния малой реки урбанизированной территории по характеристикам фитопланктона, зоопланктона и зообентоса на примере р. Содема (Вологодская область) // Трансформация экосистем. 2023. Т. 6, № S4 (22). С. 119–140. DOI: 10.23859/estr-230922
- Максимова Н. К., Воробьев Г. А. Ландшафты // Природа Вологодской области. Вологда: Вологжанин, 2007. С. 299–328.
- Петров Д. С., Якушева А. М. Оценка экологического состояния малых водотоков Санкт-Петербурга по показателям зообентоса в 2019–2021 гг. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67, № 3. С. 529–544. DOI: 10.21638/spbu07.2022.308
- Поздеев И. В., Аристова Р. А. Биоиндикация качества вод по донным животным в системе экологического мониторинга водных объектов // Биология в школе. 2023. № 3. С. 48–53. DOI: 10.47639/0320-9660_2023_3_48
- Семенченко В. П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Минск: Орех, 2004. 125 с.
- Соколова Т. Л., Мурадова Л. В. Оценка экологического состояния некоторых малых рек Государственного природного заповедника «Кологривский лес» по зообентосным сообществам // Принципы экологии. 2025. № 2 (56). С. 99–117. DOI: 10.15393/j1.art.2025.15803
- Филоненко И. В., Филиппов Д. А. Оценка площади болот Вологодской области // Труды Инсторфа. 2013. № 7 (60). С. 3–11.
- Холмогорова Н. В. Экотоксикологическая оценка состояния малой реки в зоне влияния сточных вод молокозавода методами биодиагностики // Труды Института биологии внутренних вод им.

- И. Д. Папанина РАН. 2024. Вып. 107 (110). С. 42–51. DOI: 10.47021/0320-3557-2024-42-51
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.
- Шуйский В. Ф., Максимова Т. В., Петров Д. С. Биоиндикация качества водной среды, состояния пресноводных экосистем и их антропогенных изменений // Экология и развитие Северо-Запада России: Сб. науч. докл. VII междунар. конф. (Санкт-Петербург, 2–7 авг. 2002 г.). СПб., 2002. С. 441–451.
- Щербина Г. Х. Таксономический состав и сапробиологическая значимость донных макробеспозвоночных различных пресноводных экосистем Северо-Запада России // Экология и морфология беспозвоночных континентальных вод: Сб. науч. работ, посвящ. 100-летию со дня рождения Ф. Д. Мордухай-Болтовского. Махачкала, 2010. С. 426–466.
- Яныгина Л. В. Особенности структурных перестроек сообществ водных макробеспозвоночных низкоречных водотоков Алтая под влиянием селитебных территорий // Трансформация экосистем. 2023. Т. 6, № 5 (23). С. 95–106. DOI: 10.23859/estr-220915
- Яныгина Л. В., Евсеева А. А. Структурные перестройки донных сообществ малых рек бассейна Верхней Оби и Иртыша в зоне деятельности горнодобывающих предприятий // Биология внутренних вод. 2022. № 2. С. 198–204. DOI: 10.31857/S0320965222020188
- Sládeček V. System of water quality from the biological point of view // *Ergebn. der Limnol. H. Arsh. Fur Hydrobiol.* 1973. Vol. 7, № 1. P. 1–218.
- Wegl R. Index für die Limnosaprobität // *Wasser und Abwasser.* 1983. Vol. 26. S. 1–175.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00005-25-00 и ИБВВ РАН № 124032500016-4.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Вологодского филиала ФГБНУ "ВНИРО", участвовавшим в отборе проб.

ASSESSMENT OF THE WATER QUALITY OF THE SUKHONA RIVER TRIBUTARIES (VOLOGDA OBLAST) ACCORDING TO ZOOBENTHOS INDICATORS

IVICHEVA
Ksenya Nikolaevna

PhD, St. Petersburg Branch of the Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO, 26, Makarova emb., St. Peterburg, Russia, ivicheva@niorh.vniro.ru

FILONENKO
Igor Vladimirovich

PhD, Vologda branch of the Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO, 5, Levicheva st., Vologda, Russia, filonenko@vologod.vniro.ru

KOMAROVA
Alexandra Sergeevna

PhD, I.D.Papanin Institute of Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Sankt-Peterburg Branch VNIRO, 109, setl.Borok, Nekouzsky district, Yaroslavl region, Russia, komarowa.aleks@yandex.ru

Key words:
zoobenthos
bioindication
water quality
small rivers
Vologda oblast

Summary: Hydrobiological studies of 40 tributaries of the Sukhona River (White Sea basin) were conducted in the summer of 2016–2018. The assessment of the ecological state of the rivers was carried out on the basis of quantitative and qualitative data from zoobenthos. According to zoobenthos indicators, the cleanest rivers include rivers with high flow rates; the most polluted are rivers flowing near populated areas, as well as through wetlands. The contribution of the hydrological characteristics of the catchment area to the formation of water quality is shown. The indices obtained in some cases show contradictory results. The values of the EPT, ASPT, BMWP, and OQR indices may decrease in small watercourses. The value of the Goodnight-Whitley index can be influenced by swamps located in the catchment area. It is shown that the background values of the saprobic index for the watercourses of the taiga zone are in the range of 1.5–2.5. The indices of species diversity and saprobity should be considered in a comparative way.

Reviewer: D. M. Bezmaternich

Received on: 17 November 2025

Published on: 25 December 2025

References

- Alimov A. F. Bogatov V. V. Golubkov S. M. Productive hydrobiology. SPb.: Nauka, 2013. 342 p.
- Andrianova A. V. Bioticheskie indeksy i metriki v ocenke kachestva vody malyh rek na territorii prirodnogo parka «Ergaki» (yug Krasnoyarskogo kraya) [Biotic indices and metrics in assessment of the water quality of small rivers on the territory of Ergaki nature park (south of Krasnoyarsk region), Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2015. T. 22, No. 3. P. 439–451. DOI: 10.15372/SEJ20150311
- Bakanov A. I. The use of zoobenthos for monitoring freshwater reservoirs, Biologiya vnutrennih vod. 2000. No. 1. P. 68–82.
- Bezmaternyh D. M. Effect of anthropogenic pollution on macrozoobenthos structure in Barnaulka River (Upper Ob basin), Vodnye resursy. 2018. T. 45, No. 1. P. 52–61. DOI: 10.7868/S0321059618010066
- Bezmaternyh D. M. Zoobenthos as an indicator of the ecological status of aquatic ecosystems in Western Siberia, Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury. 2007. No. 85. P. 1–86.
- Bolotova N. L. Vorob'ev G. A. Shestakova L. G. Sukhona River, Priroda Vologodskoy oblasti. Vologda: Izd. Dom «Vologzhanin», 2007. P. 128–132.
- Dairova D. S. Zhivoglyadova L. A. The use of different methods of bioindication (biotic indices and metrics) to assess the environmental condition and water quality of small rivers in the basin of the Lutoga River (Sakhalin Island), Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova. 2014. No. 6. P. 191–200.
- Filonenko I. V. Filippov D. A. Assessment of the swamp area of the Vologda oblast, Trudy Instorfa. 2013. No. 7 (60). P. 3–11.
- Golovatyuk L. V. Zinchenko T. D. Biotic indices in water quality assessment for reference rivers: a comparative analysis of bioindication indices of the Baitugan River (High Transvolga region),

- Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki. 2020. T. 162, No. 1. P. 134–150. DOI: 10.26907/2542-064X.2020.1.134-150
- Goncharov A. V. Palatov D. M. Georgiadi A. G. The characteristics of benthic biocenoses of rivers in diverse landscapes of the Upper Volga basin, *Biologiya vnutrennih vod*. 2025. T. 18, No. 1. P. 149–159. DOI: 10.31857/S0320965225010132
- Holmogorova N. V. Ecotoxicological assessment of the state of a small river in the influence zone of dairy plant wastewater by biondiagnostics methods, *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I. D. Papanina RAN*. 2024. Vyp. 107 (110). P. 42–51. DOI: 10.47021/0320-3557-2024-42-51
- Ivicheva K. N. Filippov D. A. Zayceva V. L. Filonenko I. V. Zuev Yu. A. The impact of urbanization on macrophyte, phyto-, zooplankton, and macrozoobenthos communities in the Sukhona River basin, *Principy ekologii*. 2024. No. 3. P. 27–45. DOI: 10.15393/j1.art.2024.15164
- Ivicheva K. N. Filippov D. A. Aquatic macroinvertebrates of raised bogs in the central part of the Vologda region, Russia, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. No. 9. 2017. P. 30–45. DOI: 10.17076/eco472
- Lobunicheva E. V. Makarenkova N. N. Ivicheva K. N. Filonenko I. V. Litvin A. I. Popeta E. S. Dumnich N. V. Assessing the ecological state of a small river in the urbanized area in terms of phytoplankton, zooplankton and zoobenthos characteristics (on the example of the Sodema River (Vologda region), *Transformatsiya ekosistem*. 2023. T. 6, No. S4 (22). P. 119–140. DOI: 10.23859/estr-230922
- Maksutova N. K. Vorob'ev G. A. Landscapes, *Priroda Vologodskoy oblasti*. Vologda: Vologzhanin, 2007. P. 299–328.
- Petrov D. S. Yakusheva A. M. Assessment of the ecological status of small watercourses of St. Petersburg according to zoobenthos indicators in 2019–2021., *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022. T. 67, No. 3. P. 529–544. DOI: 10.21638/spbu07.2022.308
- Pozdeev I. V. Aristova R. A. Bioindication of water quality by bottom animals in the system of ecological monitoring of water bodies, *Biologiya v shkole*. 2023. No. 3. P. 48–53. DOI: 10.47639/0320-9660_2023_3_48
- Scherbina G. H. Taxonomic composition and saprobiological significance of benthic macroinvertebrates of various freshwater ecosystems in Northwestern Russia, *Ekologiya i morfologiya bespozvonochnykh kontinental'nykh vod: Sb. nauch. rabot, posvyasch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya F. D. Morduhay-Boltovskogo*. Mahachkala, 2010. P. 426–466.
- Semenchenko V. P. Principles and systems of bioindication of flowing waters. Minsk: Oreh, 2004. 125 p.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: methods, criteria, solutions. Kn. 1. M.: Nauka, 2005. 281 p.
- Shuyskiy V. F. Maksimova T. V. Petrov D. S. Bioindication of the quality of the aquatic environment, the state of freshwater ecosystems and their anthropogenic changes, *Ekologiya i razvitie Severo-Zapada Rossii: Sb. nauch. dokl. VII mezhdunar. konf. (Sankt-Peterburg, 2–7 avg. 2002 g.)*. SPb., 2002. P. 441–451.
- Sládeček V. System of water quality from the biological point of view, *Ergebn. der Limnol. H. Arsh. Fur Hydrobiol*. 1973. Vol. 7, No. 1. P. 1–218.
- Sokolova T. L. Muradova L. V. Assessment of the ecological status of some small rivers of the State Nature Reserve «Kologrivsky Forest» by zoobenthos communities, *Principy ekologii*. 2025. No. 2 (56). P. 99–117. DOI: 10.15393/j1.art.2025.15803
- Wegl R. Index für die Limnosaprobität, Wasser und Abwasser. 1983. Vol. 26. S. 1–175.
- Yanygina L. V. Evseeva A. A. Structural transformations of bottom communities in small rivers of the Upper Ob and Irtysh basins under the Influence of mining enterprises, *Biologiya vnutrennih vod*. 2022. No. 2. P. 198–204. DOI: 10.31857/S0320965222020188
- Yanygina L. V. Features of structural changes in communities of aquatic macroinvertebrates in low-mountain watercourses of Altai under the influence of residential areas, *Transformatsiya ekosistem*. 2023. T. 6, No. 5 (23). P. 95–106. DOI: 10.23859/estr-220915



УДК 574.4(571.63)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКОТРОПЫ «СЕДАНКА» (Г. ВЛАДИВОСТОК)

КИСЕЛЁВА
Алёна Геннадьевна

кандидат биологических наук, Тихоокеанский институт географии
ДВО РАН, г. Владивосток, ул. Радио, 7, alena_kiseleva@mail.ru

ПШЕНИЧНИКОВА
Нина Фёдоровна

кандидат биологических наук, Тихоокеанский институт географии
ДВО РАН, г. Владивосток, ул. Радио, 7, n.f.p@mail.ru

РОДНИКОВА
Илона Мироновна

кандидат биологических наук, Тихоокеанский институт географии
ДВО РАН, г. Владивосток, ул. Радио, 7, rodnikova_ilona@mail.ru

ЮРЧЕНКО
Светлана Григорьевна

кандидат географических наук, Тихоокеанский институт географии
ДВО РАН, г. Владивосток, ул. Радио, 7, yurchenko@tigdvo.ru

Ключевые слова:

растительность
лишайники
почвы
экотропа
пихтовые леса
ртуть
хвоя
Владивосток

Аннотация: Экологические тропы предназначены для экопросвещения, рационального природопользования, охраны биогеоценозов, оздоровительных и туристических прогулок. Для сохранения биоразнообразия экосистем полуострова Муравьев-Амурский г. Владивостока предлагается создание экотропы «Седанка». В работе проведено исследование разработанного маршрута. Работа нацелена на оценку геоэкологического состояния экотропы по показателям почвенно-растительного и лишайникового покровов, лесистости, антропогенно измененным территориям и содержанию ртути в хвое пихты цельнолистной (для оценки состояния воздуха). Семь участков тропы были исследованы в 2024 г., они отражают разную степень антропогенной нарушенности территории и смену экосистем. Мертвопокровные дубняки сменяются на широколиственные, пихтово-широколиственные и низкорослые леса. В почвенном покрове тропы преобладают буроземы типичные маломощные сильно скелетные, на крутых склонах эродированные. По высокому содержанию ртути в хвое 25.4 нг/г выделен участок более антропогенно измененной территории и близко расположенной к застройкам. На удаленном от поселения участке более низкое значение ртути в хвое (10.6 нг/г). По сравнению с другими районами на тропе обнаружено наибольшее содержание ртути в хвое (32.3 нг/г) (среднее значение), чем в поселке Трудовом (21.5 нг/г) и на острове Русский (30.4 нг/г). По данным лишеноиндикации на тропе сохранились участки, поддерживающие более высокое видовое разнообразие по сравнению с окружающей территорией. Проведено сравнение почвенно-растительного покрова экотропы и прилегающей территории Ботсада. Показатели лесистости выше на экотропе (81 %). Территория Ботсада имеет такую же степень антропогенно измененных территорий, что и экотропа (65–70 %). Рациональное природопользование в зоне экотропы будет способствовать охране коренных пихтово-широколиственных лесов и природных экосистем.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Л. В. Кубрина

Получена: 14 июля 2025 года

Подписана к печати: 10 декабря 2025 года

Введение

Экологические тропы создаются для минимизации вреда окружающей среде и роста экологической культуры населения. Они выполняют роль экопросвещения (усвоение информации и норм поведения), охраны природы (снижение рекреационных нагрузок, биомониторинг), рекреации (активный отдых). Экотропа – это обустроенный информационный пешеходный маршрут, охватывающий различные биоценозы, ландшафты и места, представляющие культурно-историческую ценность. В России насчитывается около трехсот экологических троп, которые классифицируются по разным критериям: длине маршрута или его продолжительности; типу траектории (линейные, полукольцевые, кольцевые и радиальные); типу рельефа и сложности ландшафтов; биоразнообразию; культурному наследию; назначению (познавательные-прогулочные, познавательные-туристические и учебные) (Прокопьев и др., 2018).

Разработанная ранее экологическая тропа «Седанка» г. Владивостока знакомит с основными коренными экосистемами полуострова Муравьев-Амурский и направлена на природоохранные и рекреационные мероприятия (Киселёва, Пшеничникова, 2024). Территория полуострова облесена на 82 % и разнообразна лесной растительностью от монодоминантных лесов ольховых, дубовых, ясеневых до полидоминантных смешанных лесов мелколиственно-широколиственных, чернопихтово-широколиственных и кедрово-широколиственных склонов и речных долин (Прохоренко и др., 1996). Окрестности г. Владивостока и остров Русский в 1860-х гг. были покрыты густым строевым чернопихтовым лесом. В настоящее время небольшие участки чернопихтарников остались лишь в нескольких особо охраняемых природных территориях Приморского края: заповедниках «Уссурийский» и «Кедровая Падь», в нацпарке «Земля леопарда», в Ботаническом саду-институте Дальневосточного отделения РАН и на полуострове Муравьев-Амурский г. Владивостока. Пихта цельнолистная (*Abies holophylla* Maxim.) – самая крупная хвойная порода Дальнего Востока (высота до 45–55 м, диаметр до 1–2 м, возраст до 200–250 лет) встречается на российском Дальнем Востоке, в Северо-Восточном Китае и на полуострове Корея (Усенко, 1984; Сосудистые растения..., 1989).

Природные компоненты, концентрирующие ртуть, такие как хвоя, могут использоваться как индикаторы атмосферной эмиссии. Хвоя отражает ртутную нагрузку за ограниченный период времени (5 лет). В приземном слое атмосферного воздуха природные (фоновые) концентрации паров ртути (предельно допустимые концентрации, или ПДК) обычно составляют 10–15 нг/м³ при колебаниях в пределах от 0.5–1 до 20–25 нг/м³ (Ляпина, 2015). Ртуть относится к элементу первого класса опасности, вездесуща, технофильна, биофильна, супертоксична и суперпатологична даже в очень низких концентрациях. Техногенный круговорот ртути формируется за счет эмиссий предприятий цветной металлургии, химической и электрохимической промышленности, при сжигании жидкого и твердого топлива, угля как глобального источника загрязнения, от мусоросжигательных установок и крематориев, при использовании ртути для экстрагирования и концентрирования золота, в аккумуляторах, зубной амальгаме, контрольно-измерительных приборах, электрических контрольных устройствах и выключателях, осветительных приборах и в косметических товарах (Микшевич, Ковальчук, 2020; Бутовский, 2024).

Цель работы – провести оценку геоэкологического состояния экотропы «Седанка».

Ранее в наших работах была показана экологическая ситуация в г. Владивостоке, на островах Шкота и Русский, по содержанию ртути в почвах и листьях граба, дуба, полыни. Сжигание древесины и бытового мусора (в первую очередь полиэтилена) приводит к перераспределению ртути на прилегающих территориях. На островах Русский и Шкота складывается благоприятная экологическая обстановка по содержанию ртути в почвенно-растительном покрове. Данные показатели служат фоновыми для биомониторинга (Ганзей и др., 2021).

Материалы

Исследования почвенно-растительного и лишайникового покровов экотропы «Седанка» были проведены в 2024 г. Составлена схема тропы с условными обозначениями (рис. 1). Протяженность маршрута экотропы «Седанка», на котором сменяются экосистемы, составляет 4 км.

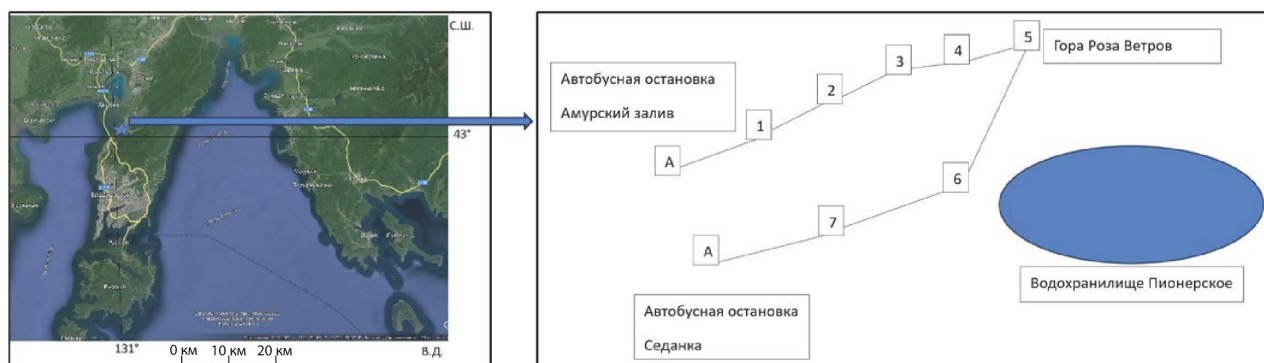


Рис. 1. Картосхема экотропы «Седанка»: А – автобусная остановка; 1–7 – участки экотропы
Fig. 1. Cartography of the Sedanka Ecotrail: A – bus stop; 1–7 – sections of the ecotrail

Участки экотропы «Седанка»: № 1. Дубняк; № 2. Дубово-широколиственный лес; № 3. Чернопихтово-широколиственный лес; № 4. Поляна с разреженным широколиственным лесом; № 5. Гора «Роза ветров» с низкорослым широколиственным лесом. № 6. Чернопихтарник; № 7. Экстремальная крутая тропа с чернопихтово-широколиственным лесом.

Методы

В работе сделаны геоботанические описания по стандартной методике: географическое положение, экспозиция склона, гидрологические условия, тип / подтип почв, видовой состав ярусов, общая сомкнутость крон для деревьев (ОСК), общее проективное покрытие для кустарников и трав (ОПП), высота (пробная площадь 25 x 25 м²). Геоэкологическое состояние определяли по показателям лесистости, степени антропогенного изменения территории, содержанию ртути в хвое пихты цельнолистной, состоянию лишайникового покрова.

Пробы хвои и веток, на которых сидят хвоинки (сборы: остров Русский, 2019 г., поселок Трудовое, 2020 г., экотропа «Седанка», 2024 г.), возрастом ±5 лет, отбирали методом смешанной пробы с примерно одновозрастных деревьев в нижней части кроны на высоте 1.5–2 м от поверхности земли согласно стандартным методическим указаниям. Высушенную воздушно-сухую хвою и ветки измельчали до однородного состояния. Массовая концентрация общей ртути в пробах измерялась на анализаторе ртути «РА-915М» с пиролизической приставкой «ПИРО-915+», которая позволяет определить ртуть в образцах без предварительной химической обработки. Этот метод основан на термической атомизации содержащейся в пробе ртути

в приставке «ПИРО-915+» и последующем ее определении методом беспламенной атомной абсорбции на анализаторе. Технические возможности анализатора позволяют достичь предела обнаружения 0.5 нг/г. Точность аналитических методов измерения концентраций ртути контролировали при использовании образца хвои и веток СЧТ-3 ГСО 2509-83 (НПО «Тайфун», г. Обнинск, Россия).

Результаты

Экотропа разделена на семь участков. Перепад высот составляет 160 м над ур. моря (рис. 2). В почвенном покрове преобладают буроземы типичные маломощные сильно скелетные, на крутых склонах эродированные. На отдельных участках произрастают лекарственные, медоносные, охраняемые виды растений. Общедоступность тропы обеспечена авто- и электротранспортом. Прогулка по тропе имеет оздоровительный, ландшафтно-терапевтический, спортивный, образовательный и научный характер.

Дубняки сменяются на чернопихтово-широколиственный и низкорослый широколиственный лес (табл. 1). Дубово-широколиственный кустарниково-разнотравный лес сложен из дуба монгольского (*Quercus mongolica* Fish. ex Turcz.), граба сердцелистного (*Carpinus cordata* Blume), ясеня носолистного (*Fraxinus rhyncophylla* Hance), ореха маньчжурского (*Juglans mandshurica* Maxim.), клена ложнозибольдова (*Acer pseudosiboldianum* (Pax) Kom.), жимолости раннецветущей (*Lonicera praeflorens* Batal.), леспедецы двцветной (*Lespedeza bicolor* Turcz.), однопокровницы амурской (*Arisaema amurense* Maxim.), горошка однопарного (*Vicia unijuga* A. Braun) и др. Высота древесного яруса 15 м, ОСК 80 %, высота кустарникового яруса 4 м, ОПП 45 %, высота травяного яруса 1 м, ОПП 40 %.



Рис. 2. Профиль экологической тропы «Седанка» 1–7 участков: 1 – дуб; 2 – широколиственные леса; 3 – пихта

Fig. 2. Profile of the Sedanka ecotrail, 1–7 sections: 1 – oak; 2 – broad-leaf forests; 3 – fir

Пихтово-широколиственный разнокустарниково-травяной лес (чернопихтово-широколиственный лес) состоит из пихты цельнолистной (*Abies holophylla*) (фитонцидное), клена зеленокорого (*Acer tegmentosum* Maxim.), липы амурской (*Tilia amurensis* Rupr.) (медоносное), ильма мелколистного (*Ulmus pumila* L.), калопанакса семилопастного (*Kalopanax septemlobus* (Thunb. ex Murray) Koidz.) (охраняемое), калины Саржента (*Viburnum sargentii* Koehne), орешника маньчжурского (*Corylus mandshurica* Maxim.), бузины кистевой (*Sambucus rasemosa* L.), элеутерококка сидяцветкового (*Eleuterococcus sessiliflorus* (Rupr. et Maxim.) S. Y. Hu) (лекарственное), чубушника тонколистного (*Philadelphus tenuifolius* Rupr. et Maxim.) (медоносное), лабазника гладчайшего (*Filipendula glaberrima* Nakai), какалии копьевидной (*Cacalia hastata* L.), чистоусника азиатского (*Osmundastrum asiaticum* (Fern.) Tagawa), орляка обыкновенного (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), ластовеня заостренного (*Vincetoxicum acuminatum* C. Morren ex Decne.), герани волосистотычинковой (*Geranium eriostemon* Fisch.), колокольчика точечного (*Campanula punctata* Lam.), вороньего глаза мутовчатого (*Paris verticillata* M.Bieb.), волжанки двудомной

(*Arunaus dioicus* (Walt.) Fern.), ландыша Кейске (*Convallaria keiskei* Miq.) и др. Высота древесного яруса 20 м, ОСК 90 %, высота кустарникового яруса 4 м, ОПП 60 %, высота травяного яруса 1.5 м, ОПП 70 %.

В низкорослом широколиственном кустарниково-травяном лесу на вершине горы встречаются дуб монгольский (*Quercus mongolica*), ольха японская (*Alnus japonica* (Thunb.) Steud.), береза даурская (*Betula daurica* Pall.), рододендрон мелколистный (*Rhododendron mucronulatum* Turcz.), полынь (*Artemisia* sp.), лук (*Allium* sp.), гвоздика китайская (*Dianthus chinensis* L.), осока (*Carex* sp.) и др. Высота древесного яруса 2 м, ОСК 80 %, высота кустарникового яруса 1 м, ОПП 45 %, высота травяного яруса 0.5 м, ОП 50 %. Исследованы участки восточной части Ботсада, прилегающие к экотропе «Седанка»: № 1. Дубняк; № 2. Дубняк с пихтой; № 3. Чернопихтово-широколиственный лес; № 4. Широколиственный лес; № 5. Широколиственный кустарниково-травяной лес; № 6. Чернопихтово-широколиственный разнокустарниково-травяной лес; № 7. Широколиственный лес (табл. 2). Дубняки сменяются на чернопихтово-широколиственный и широколиственный лес: дуб монгольский (*Quercus mongolica*), пихта цельнолистная

Таблица 1. Характеристика участков экотропы «Седанка»

№ участка	Почвенно-растительный покров	Экспозиция склона, высота над уровнем моря, м	Лесистость, %	Антропогенно измененные территории, %
1	Дубняк мертвopoкpoвный на буроземах типичных маломощных антропогенно эродированных	Ю-З, 71	85	80
2	Дубово-широколиственный кустарниково-разнотравный лес на буроземах типичных маломощных антропогенно эродированных	Ю, 99	70	75
3	Чернопихтово-широколиственный лес разнокустарниково-травяной лес на буроземах типичных	З, 135	90	40
4	Разреженный широколиственный лес на буроземах типичных	С-З, 178	65	80
5	Низкорослый широколиственный кустарниково-травяной лес на буроземах маломощных сильно скелетных с участками обнажения материнской породы	В, 189	80	60
6	Чернопихтарник на буроземах оподзоленных маломощных	В, 92	95	60
7	Чернопихтово-широколиственный разнокустарниково-травяной лес на буроземах типичных	Ю-В, 17	85	60

(*Abies holophylla*), клен ложнозибольдов (*Acer pseudosiboldianum*), элеутерококк сидячецветковый (*Eleuterococcus sessiliflorus*), береза даурская (*Betula daurica*), ильм мелколистный (*Ulmus pumila*), конский каштан (*Aesculus glabra* Willd.) (посадки), аралия высокая (*Aralia elata* (Miq.) Seem.), калапанакс семилопастной (*Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz.), граб сердцелистный (*Carpinus cordata*), липа амурская (*Tilia amurensis*), клен зеленокорый (*Acer tegmentosum*), ясень носолистный (*Fraxinus rhyncophylla*) (подрост); леспедеца двуцветная (*Lespedeza bicolor*), жимолость раннецветущая (*Lonicera praeflorens*), калина Саржента (*Viburnum sargentii*), лещина маньчжурская (*Corylus mandshurica*), рододендрон мелколистный (*Rhododendron mucronulatum*), астра татарская (*Aster tataricus* Turcz.), какалия копьевидная (*Cacalia hastata*) и др. Внеярусная растительность: лунносемянник даурский (*Menispermum dauricum* DC.). Высота древесного яруса 20 м, ОСК 85 %, высота кустарникового яруса 1.5 м, ОПП 40 %, высота травяного яруса 0.8 м, ОПП 30 %.

Обсуждение

Территория экотропы имеет более высокие показатели лесистости (81 %), чем при-

легающая территория Ботсада (69 %). Показатели антропогенно измененных территорий близки по значению: на экотропе (65 %) и в Ботсаду (70 %) (рис. 3).

Лихеноиндикационные исследования выявили небогатое видовое разнообразие лишайников на исследованных участках. Общий список составляет 22 вида. На экотропе «Седанка» выявлено 17 видов эпифитных лишайников, на прилегающей территории Ботсада – 21 вид. Среди жизненных форм 13 принадлежат листоватым видам и 9 накипным. Почти все виды являются устойчивыми к антропогенному воздействию. На всех участках присутствуют виды с угнетенным жизненным состоянием. Все это говорит о наличии значительного антропогенного влияния на территории в целом. На экотропе «Седанка» участки, характеризующиеся наименьшим видовым разнообразием лишайников и низким проективным покрытием, а также худшим жизненным состоянием, – 1, 2, 7. На участках 3 и 5 наблюдается наиболее высокое видовое разнообразие и покрытие. На территории Ботсада наибольшее богатство видов лишайников, высокое проективное покрытие и лучшее жизненное состояние отмечено на участках 5 и 6. На остальных участках показатели средние.

Таблица 2. Характеристика участков Ботсада

№ участка	Почвенно-растительный покров	Экспозиция склона, высота над уровнем моря, м	Лесистость, %	Антропогенно измененные территории, %
1	Дубняк на буроземах типичных маломощных антропогенно эродированных	Ю, 83	85	80
2	Дубняк с пихтой цельнолистной на буроземах типичных маломощных антропогенно эродированных	Ю-В, 90	60	65
3	Чернопихтово-широколиственный лес на буроземах оподзоленных маломощных	З, 145	80	60
4	Широколиственный лес на буроземах типичных	Ю-В, 185	50	75
5	Широколиственный кустарниково-травяной лес на буроземах типичных маломощных	В, 190	60	75
6	Чернопихтово-широколиственный разнокустарниково-травяной лес на буроземах оподзоленных маломощных	С-В, 102	80	75
7	Широколиственный лес на буроземах типичных	С-З, 65	85	60

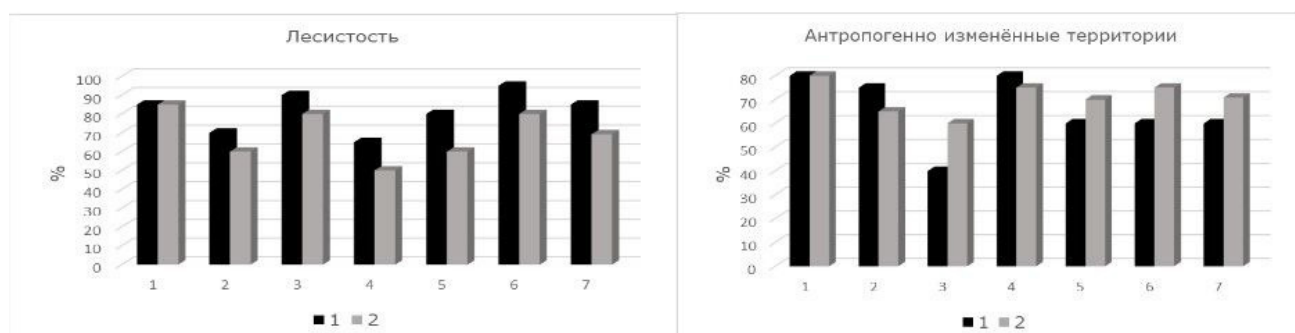


Рис. 3. Показатели лесистости и антропогенно измененных территорий экотропы «Седанка» и прилегающего участка Ботсада: 1 – экотропа «Седанка»; 2 – прилегающий участок Ботсада

Fig. 3. Indicators of forest cover and anthropogenically transformed areas of the Sedanka ecotrail and the adjacent area of the Botanical Garden: 1 – Sedanka ecotrail; 2 – the adjacent area of the Botanical Garden

Наиболее распространенными видами являются *Phaeophyscia hispidula* (Ach.) Moberg, *Myelochroa aurulenta* (Tuck.) Elix & Hale, *Opeltia flavorubescens* (Huds.) S. Y. Kondr. & Hur. Редко встречаются виды родов *Collema*, *Graphis*, *Pertusaria*.

Показатели содержания ртути в хвое пихты острова Русский, поселка Трудовое и экотропы «Седанка» варьируют от 10.6 до 45.3 нг/г. По средним показателям наименьшее содержание ртути в поселке Трудовом (21.5 нг/г), среднее значение на острове Русский (30.4 нг/г) и наибольшее на экотропе

«Седанка» (32.3 нг/г) (рис. 4). Превышают ПДК значения на острове Русский и экотропе как наиболее приближенные к густонаселенной территории г. Владивостока. На участке 3 экотропы более высокое содержание ртути в хвое по среднему значению (25.4 нг/г), чем на участке 6 (10.6 нг/г), т.к. участок 6 находится в наименее антропогенной и более залесенной восточной территории (рис. 5). На участке 6 отмечается большое значение стандартного отклонения (рис. 6) из-за разброса данных.

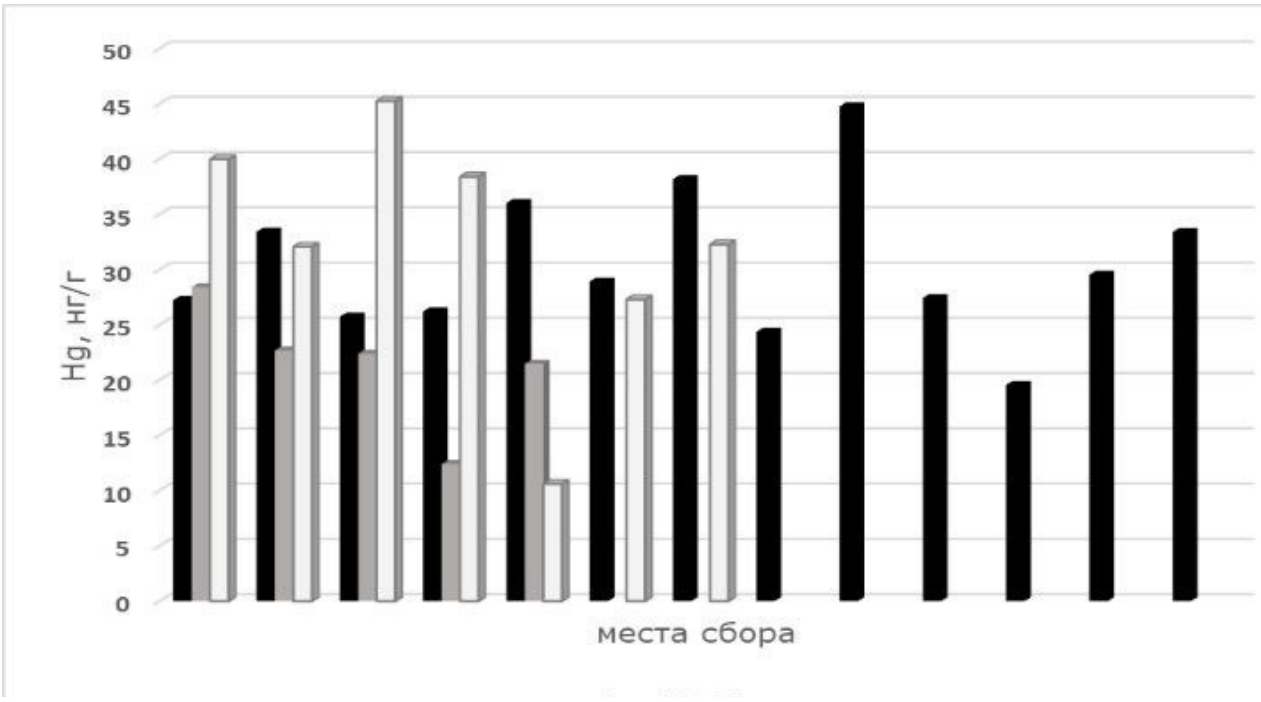


Рис. 4. Содержание ртути в хвое пихты цельнолистной в районах исследования: 1 – остров Русский; 2 – поселок Трудовое; 3 – экотропа «Седанка»

Fig. 4. Mercury content in the needles of *Abies holophilla* in the study areas: 1 – Russky island; 2 – v. Trudovoe; 3 – Sedanka ecotrail

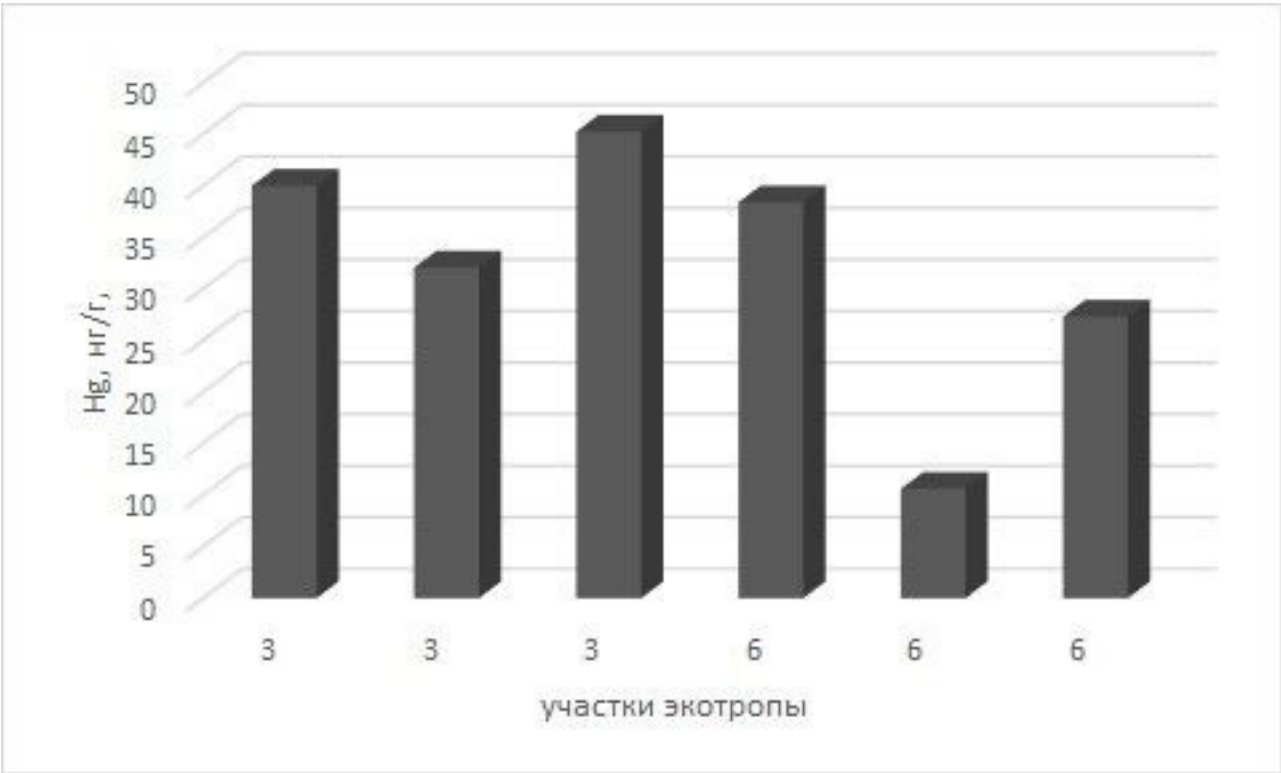


Рис. 5. Содержание ртути в хвое пихты цельнолистной на участках 3 и 6 экотропы «Седанка»

Fig. 5. Mercury content in the needles of *Abies holophilla* in sites 3 and 6 of the Sedanka ecotrail

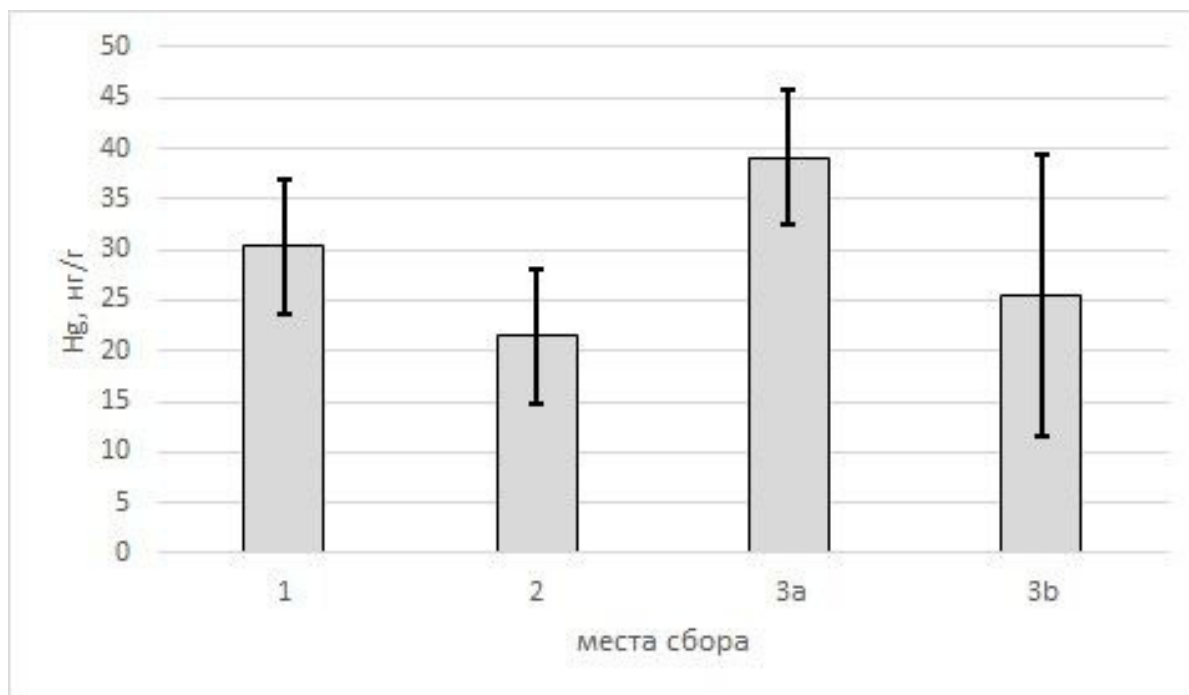


Рис. 6. Средние показатели концентрации ртути в хвое со стандартными отклонениями: 1 – остров Русский; 2 – поселок Трудовое; 3 – экотропа «Седанка» (3а – 3-й участок, 3б – 6-й участок)

Fig. 6. Average mercury concentrations in needles with standard deviations: 1 – Russky island; 2 – v. Trudovoe; 3 – Sedanka ecotrail (3a – 3 site, 3b – 6 sites)

Биоиндикация экологического состояния воздуха по показателям ртути в хвое сосны в Алтайском крае выявила наибольшую среднюю концентрацию (20 нг/г), среднюю (13 нг/г) – на торфяных месторождениях Томской области и в Республике Бурятия, наименьшую (12 нг/г) – в Иркутской области (Шворнева и др., 2017). Показатели г. Владивостока более высокие и указывают на загрязненность атмосферного воздуха. Анализ содержания ртути в ветках, на которых крепятся хвоинки, выявил меньшее накопление ртути: наименьшая средняя концентрация ртути в п. Трудовое (10.5 нг/г), средние значения на тропе «Седанка» (13.9 нг/г), наибольшая средняя концентрация на острове Русский (18.8 нг/г) (рис. 7).

По средним показателям содержания ртути, полученным ранее для граба сердцелистного (*Carpinus cordata*) – 26.3 нг/г, дуба монгольского (*Quercus mongolica*) – 24.5 нг/г, полыни Гмелина (*Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm.) – 9.1 нг/г (Ганзей и др., 2021), можно сказать, что в хвое по среднему содержанию 29.3 нг/г накапливается чуть больше ртути, потому что она находится на дереве пихты более 5 лет и лишь затем опадает, в отличие от листьев дуба, граба и полыни, которые отмирают осенью. Эти концентрации ртути близки по значениям и будут служить фоновыми для дальнейшего биомониторинга.

Заключение

В результате геоэкологических исследований, проведенных на экотропе «Седанка», получены данные по видовому составу растительности и лишайников, типу / подтипу почв, содержанию ртути в хвое и веточках пихты цельнолистной. По средним показателям большее содержание ртути в хвое на экотропе (32.3 нг/г), чем в поселке Трудовом (21.5 нг/г) и на острове Русский (30.4 нг/г), т.к. этот район наиболее приближен к г. Владивостоку. На участке 3 экотропы более высокое содержание ртути в хвое по среднему значению (25.4 нг/г), чем на участке 6 (10.6 нг/г), что связано с более близким нахождением к автотрассе и урбанизированным местам. Веточки накапливают меньше ртути, чем хвоя, наименьшая концентрация в п. Трудовое (10.5 нг/г), средние значения на тропе «Седанка» (13.9 нг/г), а наибольшая концентрация на острове Русский (18.8 нг/г). В сравнении с территорией Ботсада экотропа отличается большей лесистостью, но почти одинаковыми площадями антропогенно измененных территорий. Согласно данным лишеноиндикации, на данной антропогенно измененной территории присутствуют отдельные участки (3, 5), сохранившие большее биоразнообразие; наименьшее видовое разнообразие лишайников, низкое проективное покрытие и худшее жизненное

состояние наблюдается на участках 1, 2, 7 (близкие к поселению). Экотропа необходима для сохранения биоразнообразия корен-

ных чернопихтарников, охраняемых, лекарственных и медоносных растений и проведения биомониторинга экосистем.

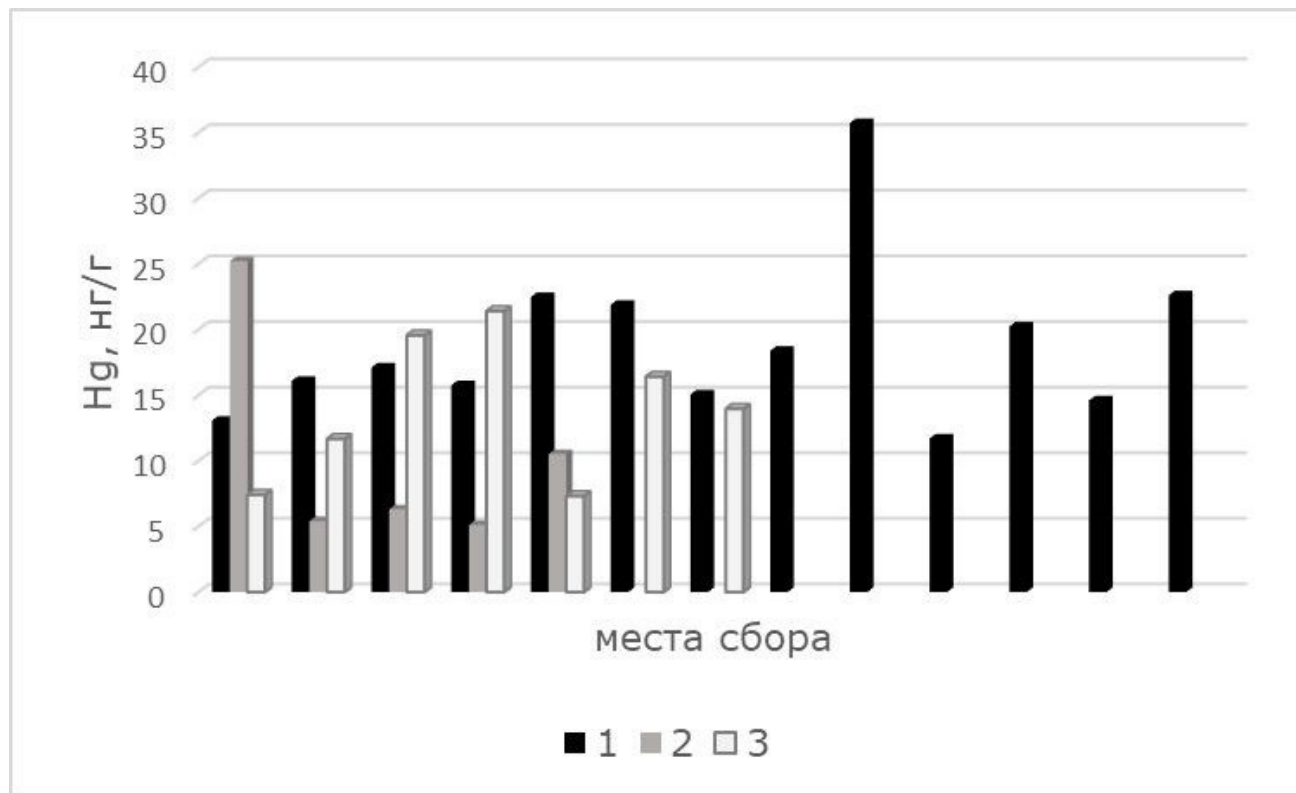


Рис. 7. Содержание ртути в ветках пихты цельнолистной в районах исследования: 1 – остров Русский; 2 – поселок Трудовое; 3 – экотропа «Седанка»

Fig. 6. Mercury content in the branches of *Abies holophilla* in the study areas: 1 – Russky island; 2 – v. Trudovoe; 3 – Sedanka ecotrail

Библиография

- Бутовский Р. О. Загрязнение ртутью окружающей среды Мурманской области // Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2024. Т. 5, № 2 (14). С. 52–65.
- Ганзей К. С., Пшеничникова Н. Ф., Киселёва А. Г., Юрченко С. Г., Родникова И. М. Содержание ртути в почвенно-растительном покрове островов Русский и Шкота (залив Петра Великого, Приморский край) // Геохимия. 2021. Т. 66, № 5. С. 473–480. DOI: 10.31857/S0016752521030043
- Киселёва А. Г., Пшеничникова Н. Ф. Экологическая тропа «Седанка» в пригороде Владивостока // Научное обозрение. Биологические науки. 2024. № 3. С. 37–41. DOI: 10.17513/srbs.1372. URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1372> (дата обращения: 24.09.2024).
- Ляпина Е. Е. Геоэкологические особенности ртутной нагрузки на территорию Томской области по данным биомониторинговых исследований // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19876> (дата обращения: 24.09.2024).
- Микшевич Л. А., Ковальчук Н. В. Тяжелые металлы и экологическая безопасность человека (свинец, ртуть, кадмий): Учебное пособие / Уральский государственный педагогический университет; Институт экологии растений и животных УрО РАН. Екатеринбург, 2020. 92 с.
- Прокопьев А. С., Чернова О. Д., Гришаева Е. С., Мачкинис Е. Ю., Титова К. Г., Ямбуров М. С., Лукьянова М. Г., Лысакова Е. Н., Коновалова А. М., Агафонова Г. И. Экологическая тропа: обустройство и назначение: Учебно-методическое пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. 133 с.
- Прохоренко Н. Б., Гумарова Р. Р., Верхолат В. П. Флористическая классификация лесов полуострова Муравьев-Амурский // Комаровские чтения. 1996. Вып. XLII. С. 79–100.
- Шворнева Е. В., Ляпина Е. Е., Воропай Н. Н. Содержание и особенности накопления ртути в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Двенадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов российской конференции / Под ред. М. В. Кабанова. Томск, 2017. С. 183–184.

Сосудистые растения Дальнего Востока / Под ред. С. С. Харкевич. СПб.: Наука, 1989. Т. 4. 380 с.

Усенко Н. В. Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока . Хабаровск: Хабаровское книжное издательство, 1984. 272 с.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Естественная и антропогенная динамика, трансформация и эволюция разноранговых геосистем и их компонентов в переходной зоне "суша-океан" в условиях возрастания природных и техногенных рисков; разработка методов и геоинформационных технологий их мониторинга и моделирования» (тема № 125021302113-3).

GEOECOLOGICAL STATE OF THE ECOLOGICAL TRAIL «SEDANKA» (VLADIVOSTOK)

KISELYOVA
Alyona Gennadyevna

PhD, Pacific Institute of Geography FEB RAS, Russia Vladivostok Radio St., 7, alena_kiseleva@mail.ru

PSHENICHNIKOVA
Nina Fyodorovna

PhD, Pacific Institute of Geography FEB RAS, Vladivostok, Radio st., 7, n.f.p@mail.ru

RODNIKOVA
Iлона Mironovna

PhD, Pacific Institute of Geography FEB RAS, Russia Vladivostok, Radio St., 7, rodnikova_ilona@mail.ru

YURCHENKO
Svetlana Grigoryevna

PhD, Pacific georafical institute FEB RAS, Russia Vladivostok, Radio st., 7, yurchenko@tigdvo.ru

Key words:
vegetation
lichens
soils
ecotrail
fir forests
mercury
pine needles
Vladivostok

Summary: Ecological trails are intended for environmental education, rational use of natural resources, protection of biogeocenoses, recreational and hiking trips. We propose to create Sedanka ecological trail to preserve the biodiversity of the ecosystems of the Muravyov-Amursky Peninsula of Vladivostok. In the work we carried out the research of the developed route. The work is aimed at assessing the geoeological state of the ecological trail in terms of soil and vegetation, lichen cover, forest cover, anthropogenically altered areas and the content of mercury in the needles of the Manchurian fir (to assess the air condition). Seven sections of the trail reflecting different degrees of anthropogenic disturbance of the territory and the ecosystem change were studied in 2024. Dead-soil-cover oak forests are replaced by broad-leaved, firry-broad-leaved, and low-growing forests. The soil cover of the trail is dominated by thin, strongly skeleton brown soil, and eroded brown soil on steep slopes. A section of a more anthropogenically altered territory and located close to buildings was identified for the high mercury content in needles of 25.4 ng/g. Meanwhile, at a site remote from the settlement, the mercury value in needles was lower, 10.6 ng/g. The trail has the highest content of mercury in needles of 2.3 ng/g (average value), compared to other areas: Trudovoy village (21.5 ng/g) and Russky island (30.4 ng/g). According to lichenindication data, there are the areas on the trail that support a higher species diversity compared to the surrounding area. A comparison of the soil and vegetation cover of the ecotrail and the adjacent area of the Botanical Garden was carried out. In the ecological trail the percentage of forest cover is higher (81 %). The territory of the Botanical Garden has the same degree of anthropogenically transformed area, as the ecological trail, namely (65–70 %). Rational use of natural resources in the ecological trail zone will contribute to the protection of indigenous firry-broad-leaved forests and natural ecosystems.

Reviewer: L. V. Kubrina

Received on: 14 June 2025

Published on: 10 December 2025

References

- Butovskiy R. O. Mercury environmental pollution of the Murmansk region, Ohrana okruzhayuschey sredy i zapovednoe delo. 2024. T. 5, No. 2 (14). P. 52–65.
- Ganzev K. S. Pshenichnikova N. F. Yurchenko S. G. Rodnikova I. M. Mercury content in the soil-vegetation cover of Russky and Shkot Islands (Peter the Great Bay, Primorsky territory), Geohimiya. 2021. T. 66, No. 5. P. 473–480. DOI: 10.31857/S0016752521030043
- Lyapina E. E. Geoecological features of mercury load of the territory of the Tomsk region according to biomonitoring research, Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. No. 1–2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19876> (data obrascheniya: 24.09.2024).
- Mikshevich L. A. Koval'chuk N. V. Heavy metals and human ecological safety (lead, mercury, cadmium):

- A study guide, Ural'skiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet; Institut ekologii rasteniy i zhivotnyh UrO RAN. Ekaterinburg, 2020. 92 p.
- Prohorenko N. B. Gumarova R. R. Verholat V. P. Floristic classification of forests of the Muravyov-Amursky Peninsula, Komarovskie chteniya. 1996. Vyp. XLII. P. 79–100.
- Prokop'ev A. S. Chernova O. D. Grishaeva E. S. Machkinis E. Yu. Titova K. G. Yamburov M. S. Luk'yanova M. G. Lysakova E. N. Konovalova A. M. Agafonova G. I. Ecological trail: arrangement and purpose. Tomsk: Izdatel'skiy Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018. 133 c.
- Pshenichnikova N. F. Ecological trail "Sedanka" in the suburb of Vladivostok, Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki. 2024. No. 3. P. 37–41. DOI: 10.17513/srbs.1372. URL: <https://science-biology.ru/ru/article/view?id=1372> (data obrascheniya: 24.09.2024).
- Shvorneva E. V. Lyapina E. E. Voropay N. N. Content and features of mercury accumulation in the needles of *Pinus sylvestris* L.), Dvenadcatoe Sibirskoe soveshanie i shkola molodyh uchenykh po klimato-ekologicheskomu monitoringu: Tezisy dokladov rossiyskoy konferencii, Pod red. M. V. Kabanova. Tomsk, 2017. P. 183–184.
- Usenko N. V. Trees, shrubs and vines of the Far East. Habarovsk: Habarovskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1984. 272 p.
- Vascular plants of the Far East, Pod red. P. P. Harkevich. SPb.: Nauka, 1989. T. 4. 380 p.



УДК 574.583

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ПЕЛАГИЧЕСКОГО ЗООПЛАНКТОНА КОНДОПОЖСКОГО ЗАЛИВА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

КОНОВАЛОВ
Даниил Сергеевич

Карельский научный центр РАН, г. Петрозаводск, проспект Александра Невского, 50, konov.daniil1998@gmail.com

Ключевые слова:

сезонная изменчивость
термический режим
озерные экосистемы
морфометрия
антропогенное
эвтрофирование

Аннотация: Проведен анализ сезонных изменений зоопланктона пелагиали Кондопожского залива Онежского озера. Основой для анализа послужили данные сетных уловов в вегетационный период с 1989 по 2021 г. в трех районах, различающихся по морфометрическим характеристикам, трофическим условиям и термическому режиму. Дана характеристика сезонных изменений структуры зоопланктонных сообществ и доминантного комплекса. Методом скользящего среднего были получены среднемноголетние траектории изменения соотношения численности (экз./м²) основных групп зоопланктона. Сезонная сукцессия зоопланктона связана в основном с изменением термического режима и трофических условий. Термический режим определяет сроки наступления и окончания сезонных фаз, связанных с доминантным комплексом и соотношением основных групп зоопланктона. Трофические условия определяют количественные характеристики сообществ. Благодаря разному масштабу влияния этих факторов в исследуемых районах сезонные изменения зоопланктона характеризуются пространственной неоднородностью. В мелководной вершинной части, испытывающей многолетнюю антропогенную нагрузку сточными водами Кондопожского ЦБК, период с преобладанием ветвистоусых рачков длится дольше, чем в пелагиали глубоководных районов, а общая численность зоопланктона выше. Для пелагиали глубоководных районов характерна высокая доля копепода в вегетационный период. Отличие центральной части Кондопожского залива от олиготрофного залива Большое Онего связано с более высокой долей коловраток и ветвистоусых рачков в вегетационный период. Несмотря на выраженную стабильность планктонной системы Онежского озера, спорадически наблюдаются аномалии в сезонной сукцессии сообществ, связанные с нехарактерной для наблюдаемого периода структурой. Полученные результаты вносят вклад в изучение сезонных процессов зоопланктона Онежского озера и могут быть использованы для моделирования динамики экосистемы.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 17 октября 2025 года

Подписана к печати: 26 декабря 2025 года

Введение

Зоопланктон как центральный компонент пелагиали озер играет в них ключевую роль. Благодаря зоопланктону осуществляется транспортная функция энергии и вещества в трофических сетях (Pinel-Alloul et al., 1988); зоопланктон имеет высокое индикаторное значение в определении изменений экосистемы (Wagner, Adrian, 2011). Одной

из особенностей планктонных систем является их сезонная динамика, которая синхронизирована с термическим и трофическим режимом. Основная часть продукционно-деструкционных процессов в планктоне происходит в вегетационный период (Онежское озеро..., 2010). Сезонные изменения зоопланктонных сообществ, проявляющиеся в последовательной смене видов в доминирующей

нантном комплексе и соотношении основных таксономических групп, лежат в основе фенологического подхода к изучению экосистемы Онежского озера (Сярки, Фомина, 2014; Сярки, 2024). Кроме того, ответной реакцией на климатические изменения, исследования которых стали актуальными во всем мире (Winder, Schindler, 2004; Adrian et al., 2006; Carter et al., 2017), могут служить сдвиги сезонных явлений и изменение продолжительности сезонов (Rusak et al., 2008; Фомина, Сярки, 2018; Сярки, Фомина, 2019).

Сукцессионные изменения в зоопланктоне связаны с экзогенными и эндогенными факторами (Уиттекер, 1980). Сезонная сукцессионная смена сообществ отражается в последовательности смены видов и вызывается изменением условий среды, ограничением ресурсов, биологией видов и межвидовой конкуренцией, а также хищничеством (Gliwicz, Pijanowska, 1989; Donet, Hoffman, 1995; Гаврилко, 2024). Исследованию особенностей сезонной динамики зоопланктона пелагиали Онежского озера уделено большое внимание. Выявлены траектории среднемноголетней сезонной динамики общей численности и биомассы зоопланктона и определены сроки начала и окончания фенологических фаз и доминантный комплекс в них (Куликова и др., 1997; Сярки, 2013; Сярки, Фомина, 2014, 2015, 2019; Фомина, 2020). Сезонные изменения зоопланктонных сообществ, проявляющиеся в последовательной смене видов в доминантном

комплексе и соотношении основных таксономических групп, лежат в основе фенологического подхода к изучению экосистемы Онежского озера (Сярки, Фомина, 2014; Сярки, 2024). В настоящей работе продолжается исследование основных закономерностей сезонной динамики зоопланктона пелагиали Кондопожского залива, но акцент делается на детальном анализе изменений его структуры и доминантного комплекса.

Цель работы – выявить основные закономерности динамики структуры зоопланктонных сообществ пелагиали Кондопожского залива Онежского озера.

Материалы

Основу для анализа составили данные, полученные в результате комплексных гидробиологических съемок в Онежском озере с 1989 по 2021 г. на постоянных точках (рис. 1) и организованные в базы данных (Сярки, Куликова, 2012; Сярки и др., 2015). Анализ среднемноголетних закономерностей сезонной динамики проводился по данным гидробиологических съемок (в вегетационный период) на постоянных станциях в центральной (К6) и вершинной части (К3) Кондопожского залива. Для сравнения были использованы данные по зоопланктону залива Большое Онего (В1). Районы исследования различались по морфометрическим особенностям, характеристикам водообмена, термическому режиму и трофическим условиям, определяемым содержанием фито- и бактериопланктона.

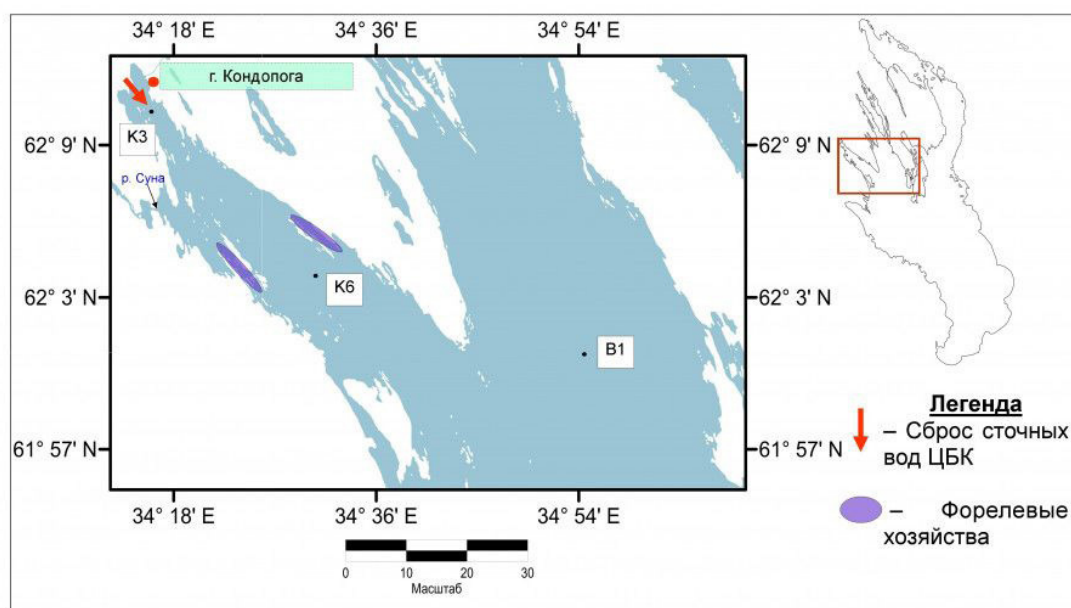


Рис. 1. Станции отбора проб
Fig. 1. Sampling stations

Таблица 1. Материалы для анализа

Станция	<i>n</i>	Средняя глубина, м (min–max)	Прозрачность по диску Секки, м*	Концентрация общего фосфора в поверхностном слое в летний период, мкг/л*	Годовая первичная продукция, г С/м ² год**
K3	80	12.5 (9–17)	1–2	>30	69.9
K6	143	75 (60–81.5)	2–3	15–20	36.2
B1	147	80 (65–110)	3–4	5–10	15.5

Примечание. *n* – число проб, * – данные по: Онежское озеро..., 2010, ** – данные по: Теканова, 2019.

Гидротермический режим Онежского озера является типичным для димиктических водоемов: в годовом цикле выделяются два перемешивания (весеннее и осеннее), прямая летняя температурная стратификация и обратная зимняя, а также два раза в год наблюдается явление термического бара, разделяющее акваторию на две области – стратифицированную и с изотермией (Онежское озеро..., 2010). Основные фазы гидротермического режима наступают раньше в прибрежных районах (вершинная часть Кондопожского залива), а прямая летняя температурная стратификация и «биологическое лето» длятся дольше. Температурные условия поверхностного слоя воды (0.5 м) в пик вегетационного периода (конец июля – начало августа) однородны по всей акватории озера. По среднемноголетним данным (Онежское озеро..., 2010), поверхностный слой воды прогревается к этому времени до 17 °С.

Кондопожский залив характеризуется значительной многолетней антропогенной нагрузкой (Калинкина и др., 2021; Зобкова, 2024). В вершинной части залива (см. рис. 1, станция K3) расположен целлюлозно-бумажный комбинат, сточные воды которого проходят биологическую очистку и сбрасываются в залив, благодаря чему здесь наблюдаются высокие концентрации растворенных и взвешенных органических веществ и общего фосфора (Калинкина и др., 2011), что благоприятно влияет на развитие кормовой базы зоопланктона. Объем сточных вод в 2019–2020 гг. в среднем составил около 47 млн м³/год (Государственный доклад..., 2021). С начала 1990-х гг. по настоящее время фосфорная нагрузка сточных вод значительно сократилась – с 109 до 12 т/год (Тимакова и др., 2014; Литвинова и др., 2021). В центральной части залива (см. рис. 1, станция K6) расположено 11 форелевых хозяйств с общей мощностью 3870 т/год (Смирнова и др., 2024). Кроме того, по сравнению с дру-

гими крупными заливами Онежского озера, в Кондопожском заливе водообмен с открытым плесом более ограничен (Галахина, Зобков, 2022), а период условного водообмена составляет 1.03 года (Лозовик и др., 2019). Залив Большое Онего характеризуется свободным водообменом с центральным плесом Онежского озера, олиготрофным статусом, высоким качеством воды и низким ($P_{\text{общ}}$ 7–10 мкг/л) содержанием биогенных элементов (Крупнейшие озера-водохранилища..., 2015; Теканова и др., 2019).

Таким образом, было проведено сравнение сезонных изменений структуры зоопланктонных сообществ в различающихся по температурным и трофическим условиям районах: мелководной вершинной части залива и глубоководных районах (центральная часть залива и залив Большое Онего).

Методы

Зоопланктон отбирался сетью Джеди с установленным замыкателем (диаметр 19 или 25 см с диаметром пор 100 мкм). Отборы производились в зависимости от глубины станции на стандартных горизонтах (0–5, 5–10, 10–25, 25–50, 50–75, 75–дно). Камеральная обработка проб проводилась по стандартной методике с учетом индивидуальных весов массовых видов Онежского озера (Куликова, Сярки, 1994; Методы гидробиологических исследований..., 2024). Идентификация видов выполнялась согласно «Определителю зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России» (2010).

Анализировались данные о численности (экз./м²) во всем столбе воды трех основных групп зоопланктона: Copepoda (с науплиями), Cladocera и Rotifera. Для выявления среднемноголетней траектории сезонной динамики структуры сообществ исходные данные были сглажены с помощью метода скользящего среднего в модификации двойного сглаживания для нерегулярных рядов

с шагом в 7 элементов ряда (Сярки, 2013). Вычислялась доля (%) группы в сообществе и по ним строилась треугольная диаграмма Гиббса – Розебома (Ларичева, 2015). Кроме того, был определен доминантный комплекс: за нижнюю границу доминирования принимали обилие вида выше 10 % (субдоминанты – от 5 до 10 %) от общей численности и биомассы. После этого рассчитывалась частота встречаемости вида в доминантном комплексе. Данные обрабатывались в среде *Excel for Windows*.

Результаты

В составе зоопланктона Онежского озера выявлено 209 таксонов рангом до рода и ниже: Calanoida (5), Cyclopoida (24), Cladocera (67), Rotifera (113) (Куликова и др., 1997). В пелагиали исследуемых районов, по данным настоящей работы и архивным материалам (Сярки, Куликова, 2012; Сярки и др., 2015), в составе зоопланктона было выделено 104, 82 и 62 таксона рангом до рода и ниже в вершинной, центральной частях Кондопожского залива и в заливе Большое Онего соответственно.

В вершинной части залива в рассматриваемый период (с июня по сентябрь) обычно в составе зоопланктона были коловратки *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Keratella cohlearis* (Gosse, 1851), *Keratella quadrata* (Müller, 1786), *Polyarthra dolichoptera* Idelson, 1925 и представители рода *Asplanchna* Gosse, 1850. Рачковый зоопланктон был представлен преимущественно *Bosmina* (*Eubosmina*) *coregoni* Baird, 1857, *Daphnia* (*Daphnia*) *cristata* Sars, 1862, *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863) и *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863) и науплиями копепод. Спорадически в доминантном комплексе появлялись коловратки *Polyarthra dolichoptera* Idelson, 1925 и виды рода *Notholca* Gosse, 1886, а также представители рачкового планктона – *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863, *Eurytemora lacustris* (Poppe, 1887) и *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857).

Состав структурообразующих видов коловраток в пелагиали глубоководного центрального района Кондопожского залива не отличается от такового в вершинной части. Однако в составе рачкового зоопланктона есть ряд отличий. Типичным представителем зоопланктона этого района является *L. macrurus*, который в вершинной части встречается редко. Кроме того, в составе циклопов, помимо указанных для вершинной части видов, в этом районе часто встречается

более крупный *Cyclops abbyssorum* Sars, 1863. Спорадически в доминантный комплекс попадает *Heterocope appendiculata* Sars, 1863.

Видовой состав сообществ зоопланктона в заливе Большое Онего беднее, чем в Кондопожском заливе. Структурообразующие виды рачкового планктона не отличаются от центральной части залива. А среди коловраток можно выделить только *K. longispina* и виды рода *Asplanchna*.

Сезонные изменения видового состава зоопланктона лежат в основе динамики соотношения основных его групп. Общие закономерности сезонных изменений структуры сообществ зоопланктона, без влияния межгодовой изменчивости, можно представить в виде треугольной диаграммы (рис. 2). Детализация диаграммы сезонных изменений структуры сообществ по месяцам вегетационного периода представлена в табл. 2–5.

В начале июня структура сообществ исследуемых районов неоднородна: в вершинной и центральной частях залива представлены преимущественно коловратки с долей около 65–75 %. В мелководной вершинной части в этот период доля кладоцер достигает 30 %. В заливе Большое Онего наблюдается иное состояние сообщества, с преобладанием копепод; доля двух других таксономических групп не превышает 10 %. В июне снижается доля копепод в сообществе и растет доля коловраток и кладоцер. В доминантном комплексе в этот период также наблюдаются различия (см. табл. 2): в вершинной и центральной частях залива он представлен преимущественно коловратками, тогда как в заливе Большое Онего – копеподами.

Июль в целом характеризуется снижением доли коловраток в сообществе и увеличением доли кладоцер и копепод. В доминантном комплексе вершинной части по-прежнему представлены коловратки, но большую роль играют и ветвистоусые рачки родов *Bosmina* (*B.*), *Bosmina* (*E.*) и *Daphnia* (*D.*). В центральной части залива и в заливе Большое Онего доминантный комплекс в июле в целом представлен теми же видами, что и в июне, однако в нем появляются коловратки из рода *Synchaeta* Ehrenberg, 1832 и ветвистоусые рачки рода *Bosmina* (*E.*).

В августе снижается доля кладоцер и коловраток в сообществах, увеличивается доля копепод. Доминантный комплекс зоопланктона исследуемых районов в августе приобретает общие черты с преобладанием

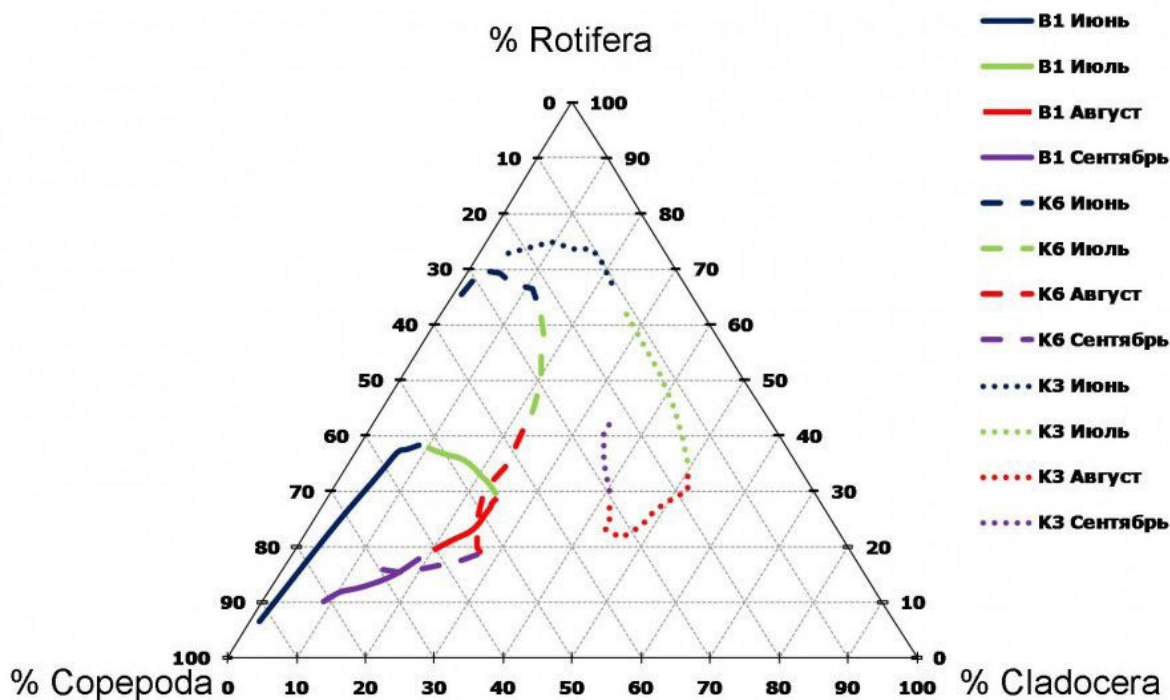


Рис. 2. Сезонные изменения структуры сообщества в столбе воды
Fig. 2. Seasonal changes in the structure of the community in the water column

ветвистоусых рачков из родов *Bosmina* (E.) и *Daphnia* (D.), а также с высокой долей мелких коловраток из родов *Kellicottia* и *Synchaeta*.

Характер сезонных изменений структуры сообщества в сентябре неоднороден в исследуемых районах. В вершинной части растет доля коловраток при снижении доли копепоид. В двух других районах в сообществах преобладают копепоиды при общей низкой

доле кладоцер и коловраток. В доминантном комплексе зоопланктона исследуемых районов в сентябре наблюдаются различия: в мелководной вершинной части по-прежнему большую роль играют ветвистоусые рачки родов *Bosmina* (E.) и *Daphnia* (D.), тогда как в глубоководных районах Кондопожского залива и в Большом Онего – копепоиды.

Таблица 2. Структура сообществ зоопланктона в июне

Показатель / район	Вершинная часть Кондопожского залива	Центральная часть Кондопожского залива	Залив Большое Онего
Среднемноголетнее соотношение численности (%) Copepoda:Cladocera:Rotifera*	23:4:73/11:22:67	33:1:65/23:13:64	92:1:6/53:9:38
Доминанты по численности (>10 %)	<i>K. longispina</i> , <i>K. cohlearis</i> , <i>P. dolichoptera</i>	<i>K. longispina</i> , <i>Asplanchna</i> sp.	<i>E. gracilis</i> , <i>L. macrurus</i> , науплии копепоид
Субдоминанты по численности (5–10 %)	<i>B.(E.) coregoni</i> , <i>M. leuckarti</i> , <i>Asplanchna</i> sp.	<i>E. gracilis</i> , <i>K. cohlearis</i>	<i>T. oithonoides</i> , <i>N. cinetura</i>
Доминанты по биомассе (>10 %)	<i>B.(E.) coregoni</i> , <i>Asplanchna</i> sp.	<i>Asplanchna</i> sp., <i>L. macrurus</i>	<i>E. gracilis</i> , <i>L. macrurus</i>
Субдоминанты по биомассе (5–10%)	<i>M. leuckarti</i> , <i>T. oithonoides</i>	<i>E. gracilis</i> , <i>T. oithonoides</i> , <i>C. abyssorum</i>	<i>B.(E.) coregoni</i>

Примечание. * – здесь и далее в числителе – соотношение в начале периода, в знаменателе – в конце периода.

Таблица 3. Структура сообществ зоопланктона в июле

Показатель / район	Вершинная часть Кондопожского за- лива	Центральная часть Кондопожского за- лива	Залив Большое Онего
Среднемноголетнее соот- ношение численности (%) Copepoda:Cladocera:Rotifera	11:22:67/16:50:34	23:13:64/35:22:43	53:9:38/46:24:30
Доминанты по численности (>10 %)	<i>B.(E.) coregoni</i> , <i>K. longispina</i> , <i>K.</i> <i>cochlearis</i>	<i>K. longispina</i> , <i>A.</i> <i>priodonta</i>	<i>E. gracilis</i> , <i>K.</i> <i>longispina</i>
Субдоминанты по численности (5–10 %)	<i>K. quadrata</i> , <i>T.</i> <i>oithonoides</i>	<i>B.(E.) coregoni</i> , <i>T.</i> <i>oithonoides</i>	<i>B.(E.) coregoni</i>
Доминанты по биомассе (>10 %)	<i>B.(E.) coregoni</i> , <i>D.</i> <i>(D.) cristata</i>	<i>Asplanchna sp.</i> , <i>L.</i> <i>macrurus</i>	<i>Asplanchna sp.</i> , <i>E.</i> <i>gracilis</i> , <i>L. macrurus</i>
Субдоминанты по биомассе (5–10 %)	<i>L. macrurus</i>	<i>H. appendiculata</i> , <i>B.</i> <i>(E.) coregoni</i>	<i>B.(E.) coregoni</i> , <i>E.</i> <i>gracilis</i>

Таблица 4. Структура сообществ зоопланктона в августе

Показатель / район	Вершинная часть Кондопожского залива	Центральная часть Кондопожского залива	Залив Большое Онего
Среднемноголетнее соотношение численности (%) Copepoda:Cladocera:Rotifera	16:50:34/31:42:27	35:22:43/54:27:19	46:24:30/61:20:19
Доминанты по численности (>10 %)	<i>D. (D.) cristata</i> , <i>B.</i> <i>(E.) coregoni</i> , <i>K.</i> <i>longispina</i>	<i>B. (E.) coregoni</i> , <i>K.</i> <i>longispina</i> , <i>D. (D.)</i> <i>cristata</i> , <i>E. gracilis</i>	<i>K. longispina</i> , <i>T.</i> <i>oithonoides</i> , <i>D. (D.)</i> <i>cristata</i>
Субдоминанты по численности (5–10 %)	Науплии циклопов, <i>T.</i> <i>oithonoides</i> , <i>E.</i> <i>gracilis</i>	Науплии копепод, <i>T.</i> <i>oithonoides</i>	Науплии каляноид, <i>M.</i> <i>leuckarti</i> , <i>T.</i> <i>oithonoides</i> , <i>E.</i> <i>gracilis</i>
Доминанты по биомассе (>10 %)	<i>B.(E.) coregoni</i> , <i>D.</i> <i>(D.) cristata</i> , <i>E.</i> <i>gracilis</i>	<i>D. (D.) cristata</i> , <i>L.</i> <i>macrurus</i> , <i>E. gracilis</i>	<i>D. (D.) cristata</i> , <i>L.</i> <i>macrurus</i> , <i>E. gracilis</i>
Субдоминанты по биомассе (5–10 %)	<i>T. oithonoides</i>	<i>B. (E.) coregoni</i> , <i>E.</i> <i>lacustris</i>	<i>B.(E.) coregoni</i>

Таблица 5. Структура сообществ зоопланктона в сентябре

Показатель / район	Вершинная часть Кондопожского за- лива	Центральная часть Кондопожского за- лива	Залив Большое Онего
Среднемноголетнее соотношение численности (%) Copepoda:Cladocera:Rotifera	31:42:27/23:34:43	54:27:19/70:14:16	61:20:19/81:9:10
Доминанты по численности (>10 %)	<i>D. (D.) cristata</i> , <i>B.</i> <i>(E.) coregoni</i>	<i>D. (D.) cristata</i> , <i>T.</i> <i>oithonoides</i>	<i>E. gracilis</i> , <i>T.</i> <i>oithonoides</i> , на- уплии копепод
Субдоминанты по численности (5–10 %)	<i>T. oithonoides</i>	<i>E. gracilis</i> , <i>M.</i> <i>leuckarti</i>	<i>K. longispina</i>
Доминанты по биомассе (>10 %)	<i>D. (D.) cristata</i>	<i>D. (D.) cristata</i>	<i>L. macrurus</i> , <i>E.</i> <i>gracilis</i>
Субдоминанты по биомассе (5–10 %)	<i>B. (E.) coregoni</i>	<i>B. (E.) coregoni</i> , <i>E.</i> <i>lacustris</i> , <i>E. gracilis</i>	<i>M. leuckarti</i> , <i>T.</i> <i>oithonoides</i>

В сезонном цикле зоопланктонных сообществ олиготрофного и глубоководного залива Большое Онего преобладающее значение имеют копеподы: большую часть рассмотренного периода, за исключением периода с конца июля по начало августа, их доля в сообществе превышает 50 %. И наоборот, коловраточный планктон в этом районе не достигает высокого развития: их среднемноголетний максимум отмечается в конце июня и не превышает 40 % от общей численности зоопланктона. В центральной части Кондопожского залива, имеющей схожий термический режим и глубину, наблюдается обратное явление: здесь коловратки занимают преобладающую роль в тот же период, достигая среднемноголетней доли 70 % от общей численности. В мелководной вершинной части высокую долю в сообществе занимают ветвистоусые рачки, их среднемноголетняя доля достигает 50 % от общей численности.

В доминантном комплексе исследуемых районов отмечен ряд особенностей. Характерной чертой в сезонном цикле планктонных сообществ олиготрофного и глубоководного залива Большое Онего является преобладающая роль науплий копепод во все исследуемые периоды: их среднемноголетняя численность за июнь – сентябрь составляет 39.5 ± 2.5 тыс. экз./м². Кроме того, отмечено доминирующее положение по биомассе крупного реликтового рачка *L. macrurus* в сообществах глубоководных районов: в центральной части залива и в Большом Онего.

Обсуждение

Полученные результаты соответствуют сезонной сукцессии зоопланктонных сообществ других водоемов умеренной зоны с закономерным переходом структуры с преобладание сначала коловраток, а затем ветвистоусых рачков (Лазарева, 2010; Шевелева, Кривенкова, 2010; Хаберман и др., 2012; Баянов, Макеев, 2016). В исчерпывающем обзоре сезонной динамики зоопланктона Рыбинского водохранилища (Лазарева, Лазарев, 2010) период открытой воды разделен на три периода: весенний, летний и осенний со схожими сезонными изменениями структуры зоопланктонных сообществ.

Для зоопланктона пелагиали Онежского озера характерно закономерное изменение структуры сообществ от преобладающих весной копепод и переход к сообществам с высокой долей коловраток, а затем ветвистоусых рачков (Куликова и др., 1997; Онежское озеро..., 2010; Сярки, Фомина, 2014).

Продолжительность этих периодов зависит от температурного режима, а количественные характеристики развития сообществ – от трофических условий акватории. В мелководной вершинной части, благодаря более длительному периоду биологического лета, период с преобладанием ветвистоусых рачков, типичных для летнего планктонного комплекса, длится дольше. Кроме того, общее обилие зоопланктона в этом районе выше: благодаря влиянию сточных вод ЦБК здесь происходит накопление органического вещества, поэтому хорошо развита кормовая база зоопланктона (Калинкина и др., 2011).

Благодаря ограниченному водообмену вод залива с водами открытого плеса влияние сточных вод ЦБК прослеживается и в центральной части залива (Крупнейшие озера-водохранилища..., 2015). Так, по среднемноголетним данным, общая численность зоопланктона центральной части Кондопожского залива выше, чем в заливе Большое Онего. Кроме того, для сообществ зоопланктона этого района характерна более высокая доля коловраток в начале летнего периода, что, вероятно, указывает на его трофность (Андронникова, 1996). В начале 2000-х гг. в прибрежных районах центральной части залива появился новый источник антропогенной нагрузки – форелевые хозяйства, влияние которых прослеживается в экосистеме залива: в частности, отмечено высокое обилие фитопланктона по сравнению с периодом до развития форелеводства (Смирнова и др., 2024).

Построенные траектории сезонной динамики зоопланктонных сообществ отражают среднемноголетние закономерности и синхронизированы, в первую очередь, с термическим и трофическим режимами. Однако отмечаемые в отдельные годы отклонения могут существенно повлиять на траектории. Одной из вероятных причин подобных отклонений может служить изменение климата, которое стало актуальным в последние десятилетия (Назарова, 2014; Калинкина и др., 2017). Планктонная система Онежского озера также реагирует на изменение внешних факторов: в ее функционировании периодически возникают состояния, отличные от среднемноголетнего сезонного хода. Это проявляется, например, во вспышках обилия (Калинкина и др., 2017; Фомина, Сярки, 2018), а также в нехарактерной для определенного сезона структуре сообщества (Сярки, Фомина, 2019).

Заключение

Несмотря на схожесть общих закономерностей сезонных изменений структуры сообществ зоопланктона пелагиали исследуемых районов с другими озерами умеренной зоны, были выявлены особенности, характерные для Онежского озера. Короткое «биологическое лето» и холодноводность пелагиали открытой части Онежского озера обуславливают короткий вегетационный период этого района. А олиготрофный статус – низкое обилие зоопланктона. В центральной части Кондопожского залива, характеризующейся таким же коротким вегетационным периодом, прослежена антропогенная трансформация зоопланктона. В вершинной части залива «биологическое лето» длит-

ся дольше, а благодаря развитой кормовой базе зоопланктона он достигает высокого развития, особенно за счет высокопродуктивных фильтраторов – ветвистоусых рачков.

Сезонная сукцессия является циклическим процессом и характеризуется ежегодной повторяемостью. Несмотря на это, спорадически наблюдаются состояния, отличные от среднемноголетней траектории. Для понимания причин этих аномалий требуются дальнейшие исследования.

Полученные результаты могут служить основой для построения эмпирической модели сезонной динамики пелагического зоопланктона, сопряженной с термическим режимом и трофическими условиями отдельных акваторий Онежского озера.

Библиография

- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
- Баянов Н. Г., Макеев И. С. Межсезонная динамика массовых видов метазойного планктона озера Светлояр в 2000–2001 годах // Труды Государственного природного заповедника Керженский. Н. Новгород, 2016. Т. 8. С. 39–67.
- Гаврилко Д. Е. Сезонная сукцессия сообществ зоопланктона зарослей макрофитов малой реки (на примере р. Левинки г. Нижнего Новгорода) // Принципы экологии. 2024. №2 (52). С. 4–17. DOI: 10.15393/j1.art.2024.14942
- Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Гидрохимические исследования в районе расположения форелевых хозяйств в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 года // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2022. № 6. С. 76–87. DOI: 10.17076/lim1599
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 году / Ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск, 2021. 277 с.
- Зобкова М. В. Оценка автохтонной, аллохтонной и антропогенной составляющей органического вещества в поверхностных водах (на примере водных объектов Карелии) : Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Петрозаводск, 2024. 20 с.
- Калинкина Н. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Тимакова Т. М., Чекрыжева Т. А. Биоиндикация загрязнения вод и донных отложений в Кондопожской губе Онежского озера // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 3. С. 265–274.
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Белкина Н. А., Назарова Л. Е., Макарова Е. М., Ефремова Т. В., Георгиев А. П., Здоровеннов Р. Э., Потахин М. С., Рябинкин А. В. Результаты экспедиционных исследований в 2020 году на Онежском озере и Выгозерском водохранилище с целью изучения отклика крупных водоемов на антропогенное воздействие и изменение климата // Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах: Тез. докл. Всерос. научной конф. (Москва, 24–26 февр. 2021 г.). Севастополь, 2021. С. 164–171.
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4–18. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-1-1
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 375 с.
- Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1997. 112 с.
- Куликова Т. П., Сярки М. Т. Размерно-весовая характеристика массовых видов ракообразных и коловраток Онежского озера: Справочно-информационный материал. Петрозаводск: Карельск. фил. АН СССР, 1994. 15 с.
- Лазарева В. И. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 183 с.
- Ларичева В. С., Ларичев Т. А. Химическая термодинамика : Учебное пособие. Кемерово: КемГУ,

2015. 240 с.

- Литвинова И. А., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Макарова Е. М., Ефимова А. Н. Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). База данных : Свидетельство о государственной регистрации № 2021620975. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (RU). Дата регистрации в Реестре баз данных 17 мая 2021 г.
- Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 91–101. DOI: 10.31857/S0321-059646191-101
- Методы гидробиологических исследований внутренних вод / Ред. А. В. Крылов. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.
- Назарова Л. Е. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, № 1. С. 746–749.
- Онежское озеро: Атлас / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Ред. В. Р. Алексеев, С. Я. Цалолихин. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 495 с.
- Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинкина Н. М. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях садкового выращивания форели // Трансформация экосистем. 2024. Т. 7, № 1. С. 177–195. DOI: 10.23859/estr-220822
- Сярки М. Т. Изучение траектории сезонной динамики планктона с помощью метода двойного сглаживания // Принципы экологии. 2013. Т. 2, № 1. С. 61–67. DOI: 10.15393/j1.art.2013.2141
- Сярки М. Т. Подходы и методы исследования сезонной динамики зоопланктона крупного озера // Принципы экологии. 2024. № 4 (54). С. 48–58. DOI: 10.15393/j1.art.2024.15263
- Сярки М. Т., Куликова Т. П. Зоопланктон Онежского озера : Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012621150. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU). Дата регистрации в Реестре баз данных 9 ноября 2012 г.
- Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Планктон пелагиали Онежского озера : Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620274. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU). Дата регистрации в Реестре баз данных 13 февраля 2015 г.
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Зоопланктон Онежского озера, его центрального плеса и залива Большое Онего в различные по температурному режиму годы // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2019. № 9. С. 104–115. DOI: 10.17076/lim982
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Особенности сезонных явлений в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Принципы экологии. 2014. № 3 (11). С. 40–48. DOI: 10.15393/j1.art.2014.3682
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2015. № 1. С. 63–68. DOI: 10.17076/eco37
- Теканова Е. В. Многолетние изменения первичной продукции в Кондопожской губе Онежского озера (Россия) под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Sciences of Europe. 2019. № 35-2 (35). С. 26–30.
- Теканова Е. В., Рыжаков А. В., Калинкина Н. М., Дмитриева Д. А., Фомина Ю. Ю., Макарова Е. М. Состояние экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань, 2019. С. 190–194.
- Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82.
- Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 328 с.
- Фомина Ю. Ю. Фенологические фазы зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика). Петрозаводск, 2020. С. 128–131.
- Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Современное состояние зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера и его отклик на изменение климата // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2018. № 9. С. 54–64. DOI: 10.17076/lim820
- Хаберман Ю., Вирро Т., Бланк К. Зоопланктон // Псковско-Чудское озеро. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. С. 285–306.
- Шевелева Н. Г., Кривенкова И. Ф. Состав и структура зоопланктона озера Котокельское // Журнал

- Сибирского федерального университета. Биология. 2010. № 3. С. 278–291.
- Adrian R., Wilhelm S. and Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming // *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. P. 652–661.
- Carter J. L., Schindler D. E., Francis T. B. Effects of climate change on zooplankton community interactions in an Alaskan lake // *Climate Change Responses*. 2017. Vol. 4, No 1. P. 3.
- Donet A., Hoffman L. Seasonal succession and spatial distribution of the zooplankton community in the reservoir of Esch-Sur-Sûre (Luxembourg) // *Belg. J. Zool.* 1995. Vol. 125. P. 109–123.
- Gliwicz Z. M., Pijanowska J. The role of predation in zooplankton succession // Sommer U. (ed.). *Plankton ecology: Succession in Plankton Communities*. Brockj Springer series in contemporary bioscience. Berlin: Springer-Verlag, 1989. P. 253–296.
- Pinel-Alloul B., Downing J. A., Perusse M., Codin-Blumer G. Spatial heterogeneity in freshwater zooplankton: variation with body size, depth and scale // *Ecology*. 1988. Vol. 69, No 5. P. 1393–1400.
- Rusak J. A., Yan N. D., Somers K. M. Regional climatic drivers of synchronous zooplankton dynamics in north-temperate lakes // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2008. Vol. 65, No 5. P. 878–889.
- Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale // *Freshwater Biology*. 2011. Vol. 56. P. 1949–1961. DOI: 10.1111/j.1365- 2427.2011.02623.x
- Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes // *Global Change Biology*. 2004. Vol. 10, No 11. P. 1844–1856.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Карельского научного центра РАН по теме «Диагноз состояния и долгосрочный прогноз изменений экосистем крупнейших озер-водохранилищ Севера ЕЧР (Онежского и Выгозера), входящих в систему Беломоро-Балтийского водного пути» (госрегистрация № 121021700117-3).

SEASONAL DYNAMICS OF PELAGIC ZOOPLANKTON STRUCTURE IN THE KONDOPOGA BAY OF LAKE ONEGA

**KONOVALOV
Daniil Sergeevich**

Karelian Research Center RAS, 50, Nevsky Ave., Petrozavodsk., Republic of Karelia, Russia, konovalov.daniil1998@gmail.com

Key words:

seasonal variability
thermal regime
lake ecosystems
morphometry
anthropogenic
eutrophication

Summary: We analyzed the seasonal changes in zooplankton of the pelagial of the Kondopoga Bay of Lake Onega. The analysis was based on data from net hauls during the growing season from 1989 to 2021 in three areas, differing in morphometrical characteristics, trophic conditions and thermal regime. Seasonal changes in the structure of zooplankton communities and the dominant complex were characterized. The average annual trajectories of changes in the abundance ratio (ind./m²) of the main zooplankton groups were obtained using the moving average method. Seasonal succession of zooplankton is mainly associated with changes in the thermal regime and trophic conditions. The thermal regime determines the timing of the onset and end of seasonal phases associated with the dominant complex and the ratio of the main groups of zooplankton. Trophic conditions determine the quantitative characteristics of communities. Due to the different scales of influence of these factors in the studied areas, seasonal changes in zooplankton are characterized by spatial heterogeneity. In the shallow top part, which is experiencing long-term anthropogenic stress by wastewater from the Kondopoga Pulp and Paper Mill, the period with predominance of cladocerans lasts longer than in the pelagic areas of deep-water areas, and the total number of zooplankton is higher. Deep-sea pelagic areas are characterized by a high proportion of copepods during the growing season. The difference between the central part of the Kondopoga Bay and the oligotrophic Big Onega is associated with a higher proportion of rotifers and cladocerans during the growing season. Despite the pronounced stability of the plankton system of Lake Onega, anomalies in the seasonal succession of communities associated with an unusual structure for the observed period are sporadically observed. The obtained results contribute to the study of seasonal processes in the zooplankton of Lake Onega and can be used to model ecosystem dynamics.

Received on: 17 October 2025

Published on: 26 December 2025

References

- Adrian R., Wilhelm S. and Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming, *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. P. 652–661.
- Andronikova I. N. Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems of various trophic types. SPb.: Nauka, 1996. 189 p.
- Bayanov N. G. Makeev I. S. The interseasonal dynamics of the mass species of metazoan plankton of Lake Svetloyar in 2000–2001, *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika Kerzhenskiy. N. Novgorod*, 2016. T. 8. P. 39–67.
- Carter J. L., Schindler D. E., Francis T. B. Effects of climate change on zooplankton community interactions in an Alaskan lake, *Climate Change Responses*. 2017. Vol. 4, No 1. P. 3.
- Determinant of zooplankton and zoobenthos in fresh waters of European Russia. Vol. 1. Zooplankton, Red. V. R. Alekseev, P. Ya. Calolihin. M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2010. 495 p.
- Donet A., Hoffman L. Seasonal succession and spatial distribution of the zooplankton community in the reservoir of Esch-Sur-Sûre (Luxembourg), *Belg. J. Zool.* 1995. Vol. 125. P. 109–123.
- Fomina Yu. Yu. Syarki M. T. The current state of zooplankton in the Petrozavodsk Bay of Lake Onega and its response to climate change, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk*. 2018. No. 9. P. 54–64. DOI: 10.17076/lim820
- Fomina Yu. Yu. Phenological phases of zooplankton in the Petrozavodsk Bay of Lake Onega, *Vodnye resursy: izuchenie i upravlenie (shkola-praktika)*. Petrozavodsk, 2020. P. 128–131.
- Galahina N. E. Zobkov M. B. Hydrochemical studies in the area of trout farms in the Kondopoga Bay of Lake Onega in the winter of 2022, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk*. 2022. No. 6. P. 76–87. DOI: 10.17076/lim1599
- Gavrillo D. E. Seasonal succession of zooplankton communities in macrophyte thickets of the Malaya

- River (on the example of the Levinka River in Nizhny Novgorod), Principy ekologii. 2024. No.2 (52). P. 4–17. DOI: 10.15393/j1.art.2024.14942
- Gliwicz Z. M., Pijanowska J. The role of predation in zooplankton succession, Sommer U. (ed.). Plankton ecology: Succession in Plankton Communities. Brockj Springer series in contemporary bioscience. Berlin: Springer-Verlag, 1989. P. 253–296.
- Haberman Yu. Virro T. Blank K. Zooplankton, Pskovsko-Chudskoe ozero. Tartu: Eesti Loodusfoto, 2012. P. 285–306.
- Kalinkina N. M. Kulikova T. P. Litvinova I. A. Polyakova T. N. Syarki M. T. Tekanova E. V. Timakova T. M. Chekryzheva T. A. Bioindication of water and sediment pollution in the Kondopoga Bay of Lake Onega, Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2011. No. 3. P. 265–274.
- Kalinkina N. M. Tekanova E. V. Belkina N. A. Nazarova L. E. Makarova E. M. Efremova T. V. Georgiev A. P. Zdorovenov R. E. Potahin M. S. Ryabinkin A. V. The results of expedition research in 2020 on Lake Onega and the Vygozersk reservoir in order to study the response of large reservoirs to anthropogenic impact and climate change, Itogi ekspeditsionnykh issledovaniy v 2020 godu v Mirovom okeane i vnutrennih vodah: Tez. dokl. Vserop. nauchnoy konf. (Moskva, 24–26 fevr. 2021 g.). Sevastopol', 2021. P. 164–171.
- Kalinkina N. M. Tekanova E. V. Syarki M. T. Ecosystem of Lake Onega: reaction of aquatic communities to anthropogenic factors and climatic changes, Vodnoe hozyaystvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie. 2017. No. 1. P. 4–18. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-1-1
- Kulikova T. P. Kustovlyankina N. B. Syarki M. T. Zooplankton as a component of the ecosystem of Lake Onega. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 1997. 112 p.
- Kulikova T. P. Syarki M. T. Size and weight characteristics of the mass species of crustaceans and rotifers of Lake Onega: Reference and information material. Petrozavodsk: Karel'sk. fil. AN SSSR, 1994. 15 p.
- Lake Onega. Atlas, Red. N. N. Filatov. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2010. 151 p.
- Laricheva V. S. Larichev T. A. Chemical thermodynamics: Uchebnoe posobie. Kemerovo: KemGU, 2015. 240 p.
- Lazareva V. I. Structure and dynamics of zooplankton of the Rybinsk reservoir. M.: Tovarischestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010. 183 p.
- Litvinova I. A. Kalinkina N. M. Tekanova E. V. Makarova E. M. Efimova A. N. Anthropogenic load and bioindication of the state of Lake Onega (Verkhne-Svir reservoir). The database: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii No. 2021620975. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Federal'nyy issledovatel'skiy centr «Karel'skiy nauchnyy centr Rossiyskoy akademii nauk» (RU). Data registracii v Reestre baz dannykh 17 maya 2021 g.
- Lozovik P. A. Zobkov M. B. Borodulina G. S. Tokarev I. V. Assessment of the external water exchange of lake bays by water chemical parameters, Vodnye resursy. 2019. T. 46, No. 1. P. 91–101. DOI: 10.31857/S0321-059646191-101
- Methods of hydrobiological studies of inland waters, Red. A. V. Krylov. Yaroslavl': Filigran', 2024. 592 p.
- Nazarova L. E. Climate of the Republic of Karelia (Russia): air temperature, variability and changes, Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2014. T. 10, No. 1. P. 746–749.
- Pinel-Alloul B., Downing J. A., Perusse M., Codin-Blumer G. Spatial heterogeneity in freshwater zooplankton: variation with body size, depth and scale, Ecology. 1988. Vol. 69, No 5. P. 1393–1400.
- Rusak J. A., Yan N. D., Somers K. M. Regional climatic drivers of synchronous zooplankton dynamics in north-temperate lakes, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2008. Vol. 65, No 5. P. 878–889.
- Sheveleva N. G. Krivenkova I. F. Composition and structure of zooplankton of Lake Kotokelskoye, Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya. 2010. No. 3. P. 278–291.
- Smirnova V. S. Tekanova E. V. Kalinkina N. M. Phytoplankton as an indicator of the ecosystem status of the Kondopoga Bay of Lake Onega in the conditions of trout cage farming, Transformatsiya ekosistem. 2024. T. 7, No. 1. P. 177–195. DOI: 10.23859/estr-220822
- Syarki M. T. Fomina Yu. Yu. Features of seasonal phenomena in zooplankton of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega, Principy ekologii. 2014. No. 3 (11). P. 40–48. DOI: 10.15393/j1.art.2014.3682
- Syarki M. T. Fomina Yu. Yu. Seasonal changes in zooplankton of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega, Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2015. No. 1. P. 63–68. DOI: 10.17076/eco37
- Syarki M. T. Fomina Yu. Yu. Zooplankton of Lake Onega, its central pool and Bolshoe Onego Bay in years of varying temperature conditions, Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2019. No. 9. P. 104–115. DOI: 10.17076/lim982
- Syarki M. T. Kulikova T. P. Zooplankton of Lake Onega: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii bazy dannykh No. 2012621150. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut vodnykh problem Severa Karel'skogo nauchnogo centra RAN (IVPS KarNC RAN) (RU). Data registracii v Reestre baz dannykh 9 noyabrya 2012 g.

- Syarki M. T. Tekanova E. V. Chekryzheva T. A. Plankton of the pelagial of Lake Onega: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii bazy dannyh No. 2015620274. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut vodnyh problem Severa Karel'skogo nauchnogo centra RAN (IVPS KarNC RAN) (RU). Data registracii v Reestre baz dannyh 13 fevralya 2015 g.
- Syarki M. T. Approaches and methods for studying the seasonal dynamics of zooplankton in a large lake, Principy ekologii. 2024. No. 4 (54). P. 48–58. DOI: 10.15393/j1.art.2024.15263
- Syarki M. T. Studying the trajectory of seasonal plankton dynamics using the double smoothing method, Principy ekologii. 2013. T. 2, No. 1. P. 61–67. DOI: 10.15393/j1.art.2013.2141
- Tekanova E. V. Ryzhakov A. V. Kalinkina N. M. Dmitrieva D. A. Fomina Yu. Yu. Makarova E. M. The state of the ecosystem of the Kondopoga Bay of Lake Onega under conditions of multifactorial impact, Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya: Materialy II Mezhdunar. konf. (Kazan', 19–24 maya 2019 g.). Kazan', 2019. P. 190–194.
- Tekanova E. V. Long-term changes in primary production in the Kondopoga Bay of Lake Onega (Russia) under the influence of waste water from pulp and paper production, Sciences of Europe. 2019. No. 35-2 (35). P. 26–30.
- The largest lakes-reservoirs in the North-West of the European territory of Russia: current state and changes of ecosystems under climatic and anthropogenic influences. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2015. 375 p.
- The state report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2020, Red. A. N. Gromcev. Petrozavodsk, 2021. 277 p.
- Timakova T. M. Kulikova T. P. Litvinova I. A. Polyakova T. N. Syarki M. T. Tekanova E. V. Chekryzheva T. A. Changes in biocenoses of the Kondopoga Bay of Lake Onega under the influence of waste water from a pulp and paper mill, Vodnye resursy. 2014. T. 41, No. 1. P. 74–82.
- Uitteker R. Communities and ecosystems. M.: Progress, 1980. 328 p.
- Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale, Freshwater Biology. 2011. Vol. 56. P. 1949–1961. DOI: 10.1111/j.1365- 2427.2011.02623.x
- Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes, Global Change Biology. 2004. Vol. 10, No 11. P. 1844–1856.
- Zobkova M. V. Assessment of the autochthonous, allochthonous and anthropogenic components of organic matter in surface waters (using the example of Karelian water bodies): Avtoref. dip. ... kand. him. nauk. Petrozavodsk, 2024. 20 p.



УДК 631.416.8:631.86:502.05(470.62)

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ РТУТИ И МЫШЬЯКА В СИСТЕМЕ «ПОЧВА – РАСТЕНИЕ» В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

КОРОЛЁВ
Александр Николаевич

кандидат биологических наук, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 644080, Омская область, г. Омск, проспект Мира, д. 5, korolev66.66@mail.ru

Ключевые слова:

ртуть
мышьяк
лугово-черноземная почва
жидкое органическое удобрение
свиной навоз
пшеница яровая

Аннотация: : Неграммотное использование в качестве удобрений жидких отходов животноводства может приводить к увеличению содержания в почве подвижных форм тяжелых металлов и металлоидов. Цель исследования – рассмотрение особенностей поведения Hg и As в системе «почва – растение» и эколого-агрохимическая оценка применения жидкой фракции свиного бесподстилочного навоза в качестве органического удобрения. В полевом опыте в подзоне южной лесостепи Омской области на лугово-черноземной почве исследовано действие и последствие (в течение двух лет) органического удобрения на урожайность сорта яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева и поведение ртути и мышьяка в системе «почва – растение». Предшественником яровой пшеницы являлся горох. Установлено, что оптимальная доза жидкой фракции свиного навоза на лугово-черноземной почве под яровую пшеницу – 200 т/га. Как при действии, так и при последствии в этом варианте была получена наивысшая прибавка урожайности. Однако внесение свиного бесподстилочного навоза ведет к увеличению содержания в почве Hg и As как в год действия, так и в ближайшие годы последствия. Внесение удобрения в дозе 300 т/га в год действия приводит к увеличению валового содержания ртути в 1.36 раза, мышьяка – 1.1 раза. Это сопровождается увеличением содержания данных элементов во всех органах пшеницы (корень, солома, зерно) в период вегетации и сбора урожая. Распределение элементов по органам пшеницы как на контрольной, так и на почве с использованием удобрения следующее: корни > солома > зерно. Корни являются защитным барьером, препятствующим поступлению и накоплению металлов в генеративных органах. Вынос элементов с зерном в год действия и два ближайших года последствия не превышает 0.01 % от валового содержания их в почве и 15 % от количества, поступившего с органическим удобрением. Предлагается проводить расчет коэффициента накопления Hg и As с учетом всей группы подвижных форм соединений данных элементов в почве.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 03 августа 2025 года

Подписана к печати: 14 декабря 2025 года

Введение

Основными критериями современного растениеводства являются ресурсоэнергоёмкость, экологическая устойчивость, природоохранность и рентабельность. При ведении сельскохозяйственного производства важна не только продукционная, но и средообразующая, ресурсовосстанавливающая, почвозащитная и почвоулучшающая агротехнология (Дышко, 2023). Для России, где свыше 70 % сельскохозяйственных земель находятся в зоне температурного и водного дефицита, способность растений обеспечивать устойчивую продуктивность в неблагоприятных и даже экстремальных условиях среды имеет первостепенное значение.

Жидкий навоз – это сложное удобрение. При определении дозы следует исходить, прежде всего, из потребности растений в основных элементах питания (Кольга и др., 2017; Бобренко и др., 2018, 2019, 2023; Комякова и др., 2020). Однако при неграмотном использовании жидких отходов животноводства в качестве удобрений происходит перенасыщение пахотного слоя почвы питательными веществами, а также увеличение содержания в нем подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) и металлоидов (Тиво, 2019; Бобренко и др., 2021а).

Актуальность темы заключается в том, что с увеличением дозы внесения бесподстилочного навоза повышаются риски роста токсичности почвы в результате накопления таких ТМ, как Zn, Pb, Cd, Hg и др., способных к миграции в ландшафте (Тарасов и др., 2020; Тарасов, 2020а). Поскольку ТМ поступают в организм человека и травоядных животных в основном с растительной пищей, исследования особенностей содержания, накопления и поведения ТМ в почвах приобретают важное значение (Тарасов и др., 2018; Тарасов, 2020б).

Цель исследования – агроэкологическая оценка поведения Hg и As в системе «почва – растение» в результате применения жидкого органического удобрения (ЖОУ) на основе свиного бесподстилочного навоза (СБН).

Материалы

Согласно требованиям ГОСТ 17.4.3.06-2020, краткосрочные исследования не позволяют достоверно определить влияние длительного систематического применения высоких доз бесподстилочного навоза на изменение физических, агрохимических, токсикологических, биологических свойств по-

чвы, на урожайность сельскохозяйственных культур, качество, безопасность продукции растениеводства. В связи с этим исследования проводились в 2015–2017 гг. на опытном поле ООО «РУСКОМ-Агро» Кормиловского района Омской области в рамках Проекта на применение жидких органических удобрений с учетом естественного плодородия почв в подзоне южной лесостепи Омской области на лугово-черноземной почве (Бобренко и др., 2018, 2019; Погуляй и др., 2018).

Название почвы: лугово-черноземная глыбкосолончаковатая маломощная среднегумусовая, расположена в южной лесостепной зоне Западной Сибири. По морфологическим признакам лугово-черноземная почва в пределах первого метра не отличается от черноземов. Для почвенного профиля характерны: глыбисто-комковатая структура и трещиноватое сложение. По мощности гумусового слоя (28 см) относится к маломощным. Содержание гумуса в слое 0–28 см – 5.9 % (среднегумусовая почва); с глубиной его содержание резко уменьшается и в горизонте В1 его уже 1.8 %. В горизонте Апах в составе поглощенных оснований преобладает кальций – 23.6–20.4 мг-экв/100 г, pH водной вытяжки равна 6.8.

Глубина залегания грунтовых вод – 3.5–4 м. По структурному составу почва является хорошо агрегатированной (по результатам определения количества водопрочных агрегатов методом «мокрого» агрегатного анализа, водопроницаемости почвы – методом трубок по Качинскому); по водопрочности – средневодопрочной и, следовательно, агрономически ценной. Почвообразующие породы – покровные карбонатные и засоленные тяжелые суглинки и глины.

В опыте изучали действие и последствие (в течение двух лет) ЖОУ на основе СБН на урожайность и качество зерна, а также на содержание ртути (Hg) и мышьяка (As) в почве, миграцию данных элементов в сельскохозяйственную культуру (сорт пшеницы мягкой яровой Памяти Азиева) и накопление их в зерне. Предшественником яровой пшеницы являлся горох. Закладку опыта, все учеты и наблюдения производили по общепринятым методикам. Агротехника общепринятая для зоны. Опыт был заложен в трехкратной повторности. Размер каждой делянки: ширина 6 м, длина 20 м. Расположение делянок систематическое. Срок внесения органического удобрения – май в год действия перед посевом; подача ЖОУ СБН производилась с помощью дизельной насо-

сной станции JD 6068HF158 с насосом Cornell 4NHTV по шланговой системе с использованием культиватора с инжектированием. Отбор растительных образцов (корни, зеленая масса / солома, зерно) был приурочен к фазам цветения и полной спелости, а почвенных – в октябре соответствующего года действия и двух лет последействия органиче-

ского удобрения. ЖОУ СБН вносилось на все делянки с разной нормой внесения по схеме полевого опыта, кроме первого – контроля. Схема опыта: 1) без удобрений (контроль); 2) 50 т/га; 3) 100 т/га; 4) 150 т/га; 5) 200 т/га; 6) 250 т/га; 7) 300 т/га. Физико-химические свойства ЖОУ на основе СБН представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Год	Сухое в-во, %	pH	Орг. в-во, %	Содержание элементов питания, %			Валовое содержание ТМ, мг/кг сухого в-ва			
				N _{общ}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Pb	Cd	Hg	As
Жидкая фракция свиного навоза										
2015	0.5	8.3	1.7	0.24	0.03	0.1	5.73	0.71	0.007	1.0
Твердая фракция свиного навоза										
2015	26.1	8.2	81.0	0.58	0.97	0.2	1.58	0.34	0.01	1.2

Методы

Валовое содержание и формы соединений Hg и As в почве в слой почвы 0–20 см определено методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС). Легкодоступные формы: подвижные (обменные) – в вытяжке аммонийно-ацетатного буфера (ААБ) при pH 4.8 (при соотношении почва:раствор 1:5, время экстракции 18 часов), характеризующие актуальный запас элементов в почве; водорастворимые, извлекаемые дистиллированной водой; кислоторастворимые – извлекаемые 1М раствором HNO₃ (Методические указания..., 1992). Тяжелые металлы в растениях определены методом мокрого озоления в смеси кислот HNO₃ + HCl с последующим определением на ААС.

Статистическая обработка данных включала расчет среднего арифметического значения и стандартной ошибки среднего и была произведена с помощью программного обеспечения StatSoft, Inc. (2011) Statistica (data analysis software system), version 10.

Результаты

В результате физико-химического исследования ЖОУ СБН установлено, что концентрация сухого вещества в нем составляет 0.8 %, содержание тяжелых металлов (мг/кг сух. в-ва): Pb – 5.73, Cd – 0.71, Hg – 0.007, As – 1.0. В соответствии с нормативными документами (ГОСТ Р 17.4.3.07-2001, ГОСТ Р 53117-2008) при применении органических удобрений на основе отходов животноводства нормативами для вышеперечисленных ТМ и металлоидов являются (не более мг/кг): Pb – 130, Cd – 2, Hg – 2.1, As – 10. Таким

образом, применяемое ЖОУ СБН с санитарных и экологических позиций является безопасным и пригодным для использования в сельскохозяйственном обороте (Бобренко и др., 2021б; Бобренко и др., 2022).

Исследованием установлено, что оптимальная доза жидкой фракции свиного навоза на лугово-черноземной почве под яровую пшеницу – 200 т/га (Бобренко и др., 2022; Шалак, 2023). Яровая пшеница в условиях лесостепи Омской области за вегетацию сформировала урожайность в среднем за годы исследований без внесения удобрений 2.70 т/га, при внесении удобрений – 3.06–4.14 т/га. Наиболее эффективным было применение 200 т/га – прибавка урожая составила 1.43 т, или 53.02 %. Увеличение дозы до 250 т/га было менее эффективно, а при внесении 300 т/га отмечалось существенное снижение урожайности культуры по сравнению с дозой 200 т/га (рис. 1).

Применение ЖОУ СБН приводит к увеличению валового содержания мышьяка и ртути и форм их соединений в слой 0–20 см (табл. 2).

Обсуждение

Установлено, что валовое содержание As в почве было максимальным при дозе внесения ЖОУ СБН 300 т/га (6.9 мг/кг). При этом в контрольном варианте содержание As составляло 6.2 мг/кг. Оба значения не превышают фоновое для региона (10.0 мг/кг) и ОДК для нейтральных суглинистых и глинистых почв (10.0 мг/кг), но превышают величину ПДК (2.0 мг/кг). В аналогичных условиях содержание Hg на контроле составляло

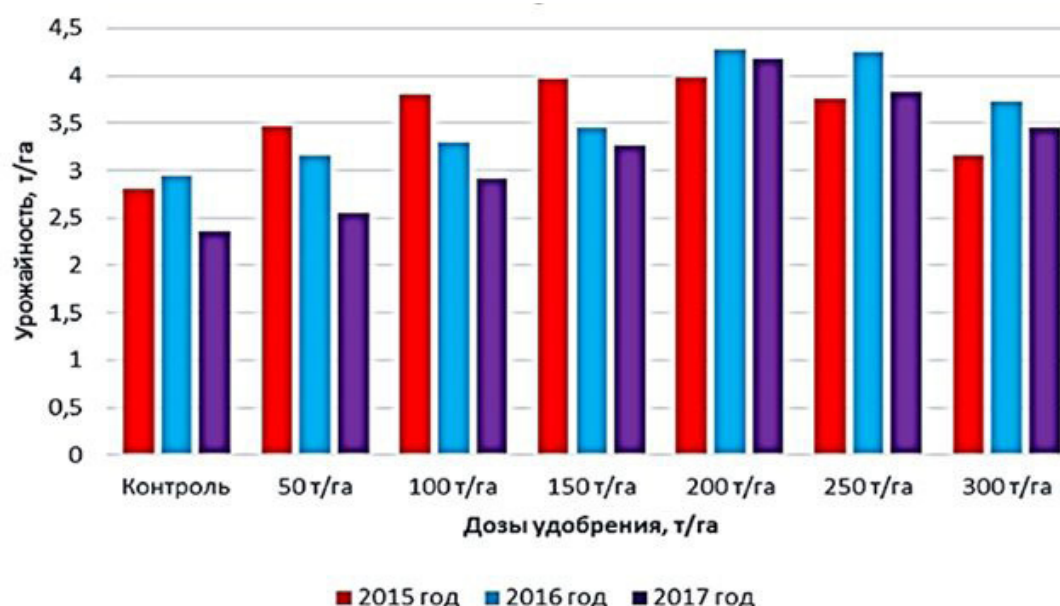


Рис. 1. Урожайность яровой пшеницы при действии и последействии ЖОУ СБН на лугово-черноземной почве в условиях юга Западной Сибири (2015–2017 гг.)

Fig. 1. The yield of spring wheat under the action and aftereffect of liquid organic fertilizer based on pig manure in meadow-chernozem soil in the conditions of the south of Western Siberia (2015–2017)

0.014 мг/кг. Внесение удобрения приводило к возрастанию валового содержания элемента в почве и при дозе внесения 300 т/га составляло 0.019 мг/кг. Содержание Hg во всех вариантах опыта находилось в пределах как фонового значения (0.02 мг/кг), так и ПДК (2.1 мг/кг) (рис. 2, 3). Особенность почв Омской области заключается в том, что при оценке загрязнений необходимо сравнивать результат не с ПДК, а с величиной фона по Омской области, равной 10.0 мг/кг. Поскольку ПДК Hg выше кларка элемента по А. П. Виноградову в 42 раза, ОДК As для нейтральных суглинистых почв выше кларка в 2 раза, а регионального фонового значения в 4.55 раза и ПДК в 2 раза, у ученых и практиков возникает много вопросов по научной обоснованности отечественных нормативов (Безуглова и др., 2012) и требует их корректировки.

Внесение ЖОУ СБН приводило к возрастанию как валового содержания As в почве, так и форм его соединений. Однако в два ближайших года последействия удобрения отмечена тенденция к уменьшению как валового содержания As в почве, так и форм его соединений. При этом содержание форм соединений данного элемента в почве можно выразить следующим рядом: водорастворимые формы < кислоторастворимые формы < обменные формы. Содержание обменных форм As в почве составляло 16.9–21.7 % от валового содержания элемента в год дей-

ствия и 21.0–22.8 % – в два ближайших года последействия. Максимальным оно было при внесении в почву ЖОУ СБН в дозе 300 т/га. Содержание водорастворимых форм As в год действия и в два ближайших года последействия не превышало 0.11 %, а кислоторастворимых форм – 0.28 % от валового содержания элемента.

Аналогично мышьяку внесение ЖОУ СБН приводило к возрастанию как валового содержания Hg в почве, так и форм его соединений. Ввиду ограниченной чувствительности прибора не удалось наблюдать динамику содержания водорастворимых и обменных форм Hg в почве. Однако кислоторастворимые формы, как и валовое содержание, с увеличением дозы внесения ЖОУ СБН имели тенденцию к накоплению. При этом содержание форм соединений данного элемента в почве можно выразить следующим рядом: водорастворимые формы ≈ обменные формы < кислоторастворимые формы. В отличие от мышьяка при внесении ЖОУ СБН в почву накапливаются кислоторастворимые формы ртути; их содержание составляло 28.6–31.6 % от валового содержания элемента в год действия (в зависимости от дозы внесения ЖОУ СБН) до 33.3 % – в два ближайших года последействия.

Таким образом, накопление Hg и As в почве в год внесения (2015 г.) и в два года последействия (2016–2017 гг.) носило относительно стабильный характер. С увеличением

Таблица 2. Содержание форм соединений Hg и As в почве (мг/кг) при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	Металл / формы соединений ¹							
	Hg				As			
	1	2	3	4	1	2	3	4
2015 год (действие)								
Контроль	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	6.2± 0.87	0.006±0.001	0.015±0.001	1.05±0.12
50 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	6.3± 0.77	0.006±0.001	0.017±0.002	1.05±0.1
100 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	6.5± 0.74	0.006±0.001	0.017±0.002	1.41±0.1
150 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.005±0.001	менее 0.0002	6.6± 0.71	0.006±0.001	0.017±0.002	1.45±0.14
200 т/га	0.017±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.7± 0.67	0.006±0.001	0.015±0.002	1.47±0.14
250 т/га	0.018±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.8± 0.72	0.006±0.001	0.016±0.002	1.45±0.16
300 т/га	0.019±0.003	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.9± 0.77	0.007±0.001	0.019±0.004	1.5±0.18
2016 год (1-й год последствий)								
Контроль	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.6± 0.7	0.004±0.001	0.015±0.001	1.05±0.1
50 т/га	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.9± 0.77	0.005±0.001	0.015±0.002	1.15±0.12
100 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	5.6± 0.64	0.005±0.001	0.016±0.002	1.31±0.15
150 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.005±0.001	менее 0.0002	5.9± 0.71	0.006±0.001	0.016±0.002	1.4±0.14
200 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.3± 0.67	0.006±0.001	0.017±0.002	1.4±0.17
250 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.7± 0.7	0.006±0.001	0.017±0.002	1.45±0.17
300 т/га	0.018±0.003	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.9± 0.71	0.007±0.001	0.019±0.004	1.49±0.19
2017 год (2-й год последствий)								
Контроль	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.9± 0.7	0.005±0.001	0.015±0.001	1.03±0.1
50 т/га	0.012±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	4.9± 0.57	0.005±0.001	0.015±0.002	1.1±0.1
100 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.004±0.001	менее 0.0002	5.3± 0.64	0.005±0.001	0.015±0.002	1.21±0.17
150 т/га	0.014±0.002	менее 0.0002	0.005±0.001	менее 0.0002	5.5± 0.51	0.005±0.001	0.016±0.002	1.3±0.15
200 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	5.7± 0.61	0.006±0.001	0.017±0.002	1.35±0.15
250 т/га	0.015±0.002	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	5.9± 0.62	0.006±0.001	0.017±0.002	1.39±0.16
300 т/га	0.018±0.003	менее 0.0002	0.006±0.001	менее 0.0002	6.4± 0.7	0.006±0.001	0.017±0.003	1.45±0.18
Фон ³ (мг/кг)	0.02				9.1			
Кларк ⁴ (мг/кг)	0.12				5			
ОДК, мг/кг ⁵					10			
ПДК, мг/кг ⁶	2.1				2			
Нормативы для ЖОУ СБН, не более ²	2.1				10			

Примечание. Здесь и в табл. 3 приведены значения среднего арифметического и стандартная ошибка среднего; ¹ – 1) валовое содержание; 2) водорастворимые формы (извлекаемые дистил. водой); 3) кислоторастворимые формы (извлекаемые 1М раствором HNO₃ для ртути – 1М HCl); 4) обменные формы (извлекаемые ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8 (по Крупскому); ² – нормативы по ГОСТ Р 53117-2008; ³ – региональное фоновое содержание (по: Ежегодник. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011; О состоянии..., 2010); ⁴ – кларк в почвах мира по А. П. Виноградову (Виноградов, 1993); ⁵ – ГН 2.1.7.2511-09; ⁶ – СанПин 1.2.3685-21.

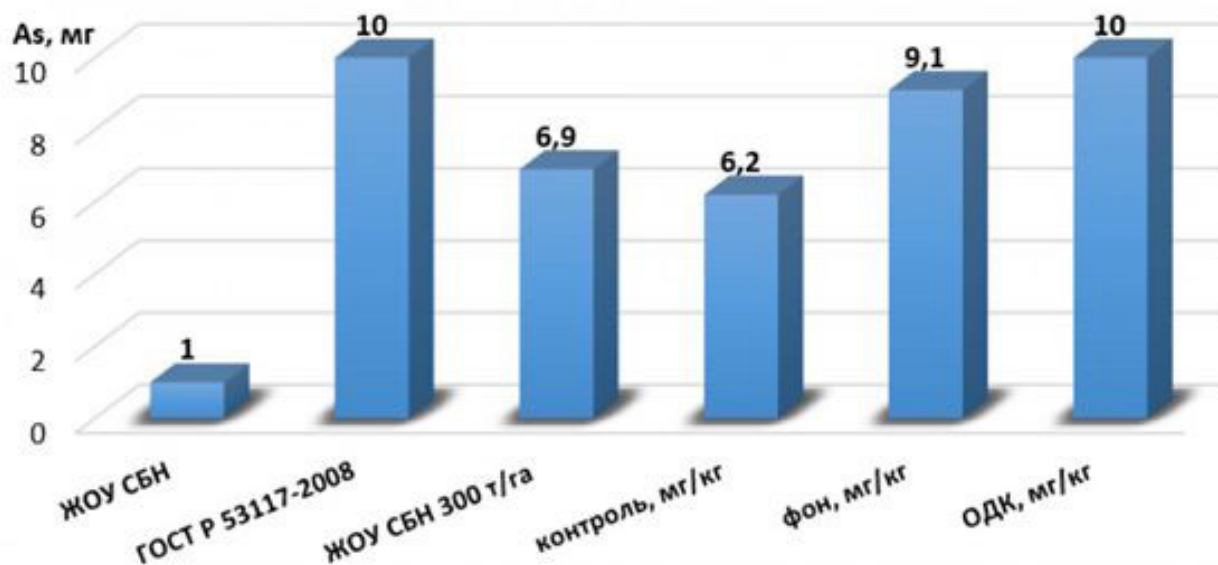


Рис. 2. Накопление мышьяка в лугово-черноземной почве при максимальной дозе внесения ЖОУ СБН (300 т/га) в год внесения удобрения (2015 г.)

Fig. 2. Accumulation of arsenic in meadow-chernozem soil at the maximum dose of liquid organic fertilizer based on pig manure (300 t/ha) per year of fertilization (2015)

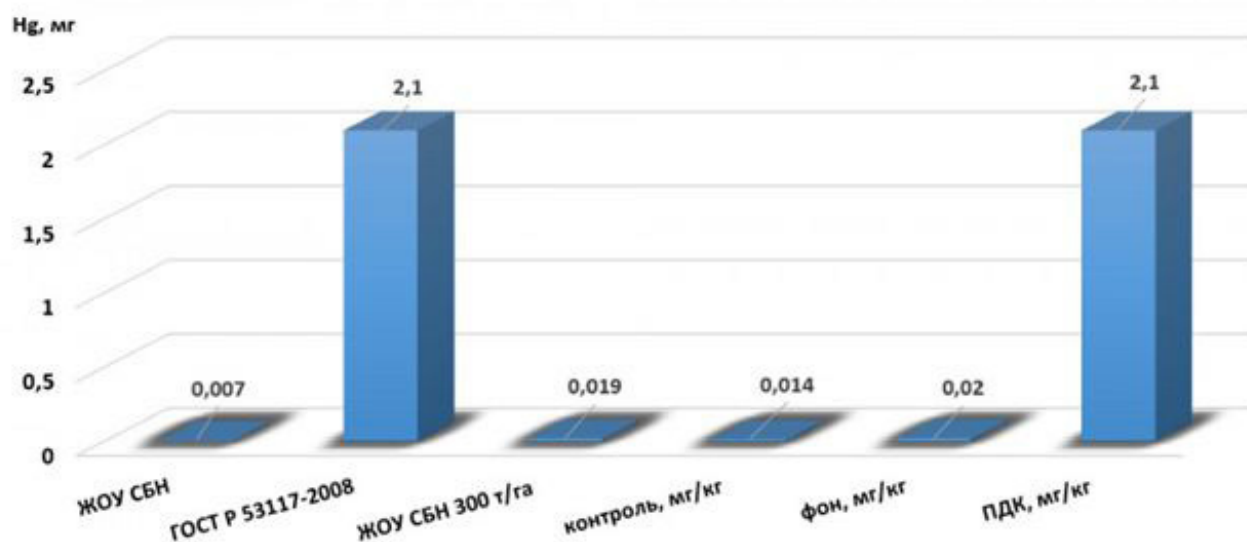


Рис. 3. Накопление ртути в лугово-черноземной почве при максимальной дозе внесения ЖОУ СБН (300 т/га) в год внесения удобрения (2015 г.)

Fig. 3. Accumulation of mercury in meadow-chernozem soil at the maximum dose of liquid organic fertilizer based on pig manure (300 t/ha) per year of fertilization (2015)

дозы внесения ЖОУ СБН валовое содержание Hg и As в почве в год внесения пропорционально возрастало. Внесение удобрения в дозе 300 т/га привело к увеличению валового содержания Hg в 1.36 раза, а As – 1.1 раза по сравнению с контрольным вариантом. Несмотря на то что валовое содержание Hg в почве увеличивалось, содержание водорастворимых форм было незначительным (менее 0.2 мкг/кг). Содержание обменных форм ртути также было менее 0.2 мкг/кг. Изучение содержания исследуемых элементов в почве в два года последствий ЖОУ СБН показало, что валовое содержание и содержание форм соединений носило тенденцию к снижению. Это может быть объяснено несколькими причинами, например, выносом элементов с урожаем, а также трансформацией форм соединений элементов с протекающими в почве различными процессами. Сравнительные данные свидетельствуют,

что превышений ПДК/ОДК по изучаемым элементам как в год действия, так и в два года последствий ЖОУ СБН не отмечалось. Поскольку ртуть, как правило, концентрируется в верхнем слое почв, так как связана с уровнем содержания органики, железа, серы (Гладышев, 2000), то контроль за поступлением элемента имеет очень важное экологическое значение.

Установлено, что для растений пшеницы характерен акропетальный характер накопления Hg и As. Распределение данных элементов по органам пшеницы как на контрольной почве, так и на почве с использованием ЖОУ СБН было следующим: корни > солома > зерно.

Содержание Hg в корнях в фазу цветения на контрольном варианте было минимальное – 0.3 мкг/кг; максимум – при внесении удобрения в дозе 300 т/га – 0.33 мкг/кг (табл. 3).

Таблица 3. Содержание Hg и As в растениях яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстильного навоза

Вариант опыта	Металл / вегетативный орган ¹					
	Hg (мкг/кг)			As (мг/кг)		
	1	2	3	1	2	3
2015 год (действие)						
Фаза цветения						
Контроль	0.3±0.031	0.015±0.001	–	0.16±0.01	0.026±0.002	–
50 т/га	0.27±0.03	0.017±0.001	–	0.14±0.01	0.021±0.002	–
100 т/га	0.31±0.03	0.017±0.002	–	0.16±0.01	0.024±0.002	–
150 т/га	0.31±0.03	0.019±0.002	–	0.17±0.01	0.027±0.003	–
200 т/га	0.3±0.03	0.021±0.002	–	0.15±0.01	0.023±0.002	–
250 т/га	0.32±0.03	0.02±0.002	–	0.18±0.01	0.026±0.002	–
300 т/га	0.33±0.03	0.026±0.003	–	0.19±0.02	0.029±0.003	–
Фаза полной спелости						
Контроль	0.3±0.031	0.017±0.002	0.005	0.16±0.01	0.029±0.003	0.021±0.002
50 т/га	0.3±0.03	0.021±0.002	0.01	0.14±0.01	0.026±0.002	0.02±0.002
100 т/га	0.33±0.03	0.021±0.002	0.006	0.16±0.01	0.026±0.002	0.019±0.002
150 т/га	0.33±0.03	0.024±0.002	0.006	0.17±0.01	0.029±0.003	0.02±0.001
200 т/га	0.31±0.03	0.026±0.003	0.01	0.15±0.01	0.027±0.002	0.018±0.001
250 т/га	0.34±0.03	0.025±0.003	0.005	0.16±0.01	0.03±0.003	0.019±0.002
300 т/га	0.36±0.03	0.028±0.003	0.007	0.16±0.02	0.03±0.003	0.015±0.001
2016 год (1-й год последствий)						
Фаза цветения						
Контроль	0.28±0.03	0.015±0.001	–	0.13±0.01	0.021±0.002	–
50 т/га	0.3±0.03	0.015±0.001	–	0.14±0.01	0.021±0.002	–
100 т/га	0.29±0.03	0.017±0.002	–	0.14±0.01	0.02±0.002	–
150 т/га	0.3±0.03	0.019±0.002	–	0.12±0.01	0.019±0.001	–
200 т/га	0.31±0.03	0.02±0.002	–	0.15±0.01	0.022±0.002	–
250 т/га	0.31±0.03	0.02±0.002	–	0.17±0.01	0.022±0.002	–
300 т/га	0.31±0.03	0.021±0.002	–	0.17±0.02	0.025±0.003	–
Фаза полной спелости						
Контроль	0.3±0.028	0.017±0.001	0.009	0.15±0.01	0.026±0.003	0.02±0.001
50 т/га	0.3±0.03	0.015±0.001	0.01	0.14±0.01	0.025±0.002	0.02±0.002
100 т/га	0.31±0.03	0.019±0.002	0.01	0.16±0.01	0.025±0.002	0.016±0.002
150 т/га	0.3±0.03	0.02±0.002	0.008	0.16±0.01	0.027±0.002	0.019±0.001
200 т/га	0.33±0.03	0.021±0.002	0.01	0.15±0.01	0.027±0.003	0.018±0.001
250 т/га	0.33±0.03	0.02±0.002	0.009	0.18±0.01	0.026±0.003	0.02±0.002
300 т/га	0.31±0.03	0.023±0.002	0.008	0.19±0.02	0.028±0.003	0.017±0.001

Таблица 3. Продолжение

Вариант опыта	Металл / вегетативный орган ¹					
	Hg (мкг/кг)			As (мг/кг)		
	1	2	3	1	2	3
2017 год (2-й год последствий)						
Фаза цветения						
Контроль	0.26±0.029	0.013±0.001	–	0.11±0.01	0.017±0.002	–
50 т/га	0.27±0.025	0.013±0.001	–	0.13±0.01	0.019±0.002	–
100 т/га	0.25±0.021	0.015±0.002	–	0.13±0.01	0.02±0.002	–
150 т/га	0.28±0.03	0.019±0.002	–	0.12±0.01	0.018±0.002	–
200 т/га	0.28±0.03	0.021±0.002	–	0.15±0.01	0.02±0.002	–
250 т/га	0.3±0.03	0.021±0.002	–	0.14±0.01	0.02±0.002	–
300 т/га	0.3±0.03	0.022±0.002	–	0.15±0.02	0.023±0.002	–
Фаза полной спелости						
Контроль	0.28±0.026	0.013±0.001	0.01	0.13±0.01	0.019±0.002	0.021±0.001
50 т/га	0.28±0.029	0.012±0.001	0.008	0.14±0.01	0.021±0.002	0.021±0.002
100 т/га	0.3±0.03	0.015±0.001	0.01	0.14±0.01	0.02±0.002	0.019±0.002
150 т/га	0.3±0.03	0.018±0.002	0.009	0.15±0.01	0.022±0.002	0.015±0.001
200 т/га	0.3±0.03	0.02±0.002	0.01	0.15±0.01	0.023±0.002	0.017±0.001
250 т/га	0.3±0.03	0.02±0.002	0.01	0.14±0.01	0.023±0.002	0.019±0.002
300 т/га	0.31±0.03	0.022±0.002	0.009	0.17±0.01	0.025±0.003	0.019±0.001
ПДК, мг/кг ²	0.03			0.2		
ДУ, мг/кг ³	0.03			0.2		

Примечание. ¹ – 1) корни; 2) зеленая масса / солома; 3) зерно; ² – решение Комиссии таможенного союза ЕЭС от 09.12.2011; ³ – Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001 № 36.

В зеленой массе содержание Hg было в пределах от 0.015 (на контроле) до 0.026 мкг/кг (при максимальной дозе внесения ЖОУ СБН). Полная спелость показала схожую тенденцию по содержанию Hg в корнях и соломе по сравнению с фазой цветения. Содержание Hg зерне как в год действия, так и в два года последствий находилось в пределах от 0.005 до 0.01 мкг/кг и не зависело от дозы вносимого в почву удобрения. Содержание элемента на контроле находилось в этих же пределах. При этом данные величины не выходили за пределы требований нормативных документов по содержанию Hg в зерне.

При внесении удобрения содержание As в корнях в фазу цветения на контрольном варианте было минимальным (0.16 мг/кг), а максимум был при дозе внесения удобрения 300 т/га – 0.19 мг/кг. При этом в зеленой массе содержание мышьяка было от 0.026 на контроле до 0.029 мг/кг при максимальной дозе внесения удобрения. В фазу восковой спелости зерна в корнях в год действия удобрения было отмечено снижение концентрации металла. При этом отмечалась тенденция накопления мышьяка в соломе по сравнению с фазой цветения. В зерне содержание варьировало от 0.021 до 0.015 мг/кг. В следующие два года последствий наблюдалось уменьшение содержания As в органах растений как по фазам вегетации, так и по вариантам внесения и по годам опыта.

Результаты исследований биологических объектов (корни, солома, зерно пшеницы) свидетельствуют, что значительная часть Hg, As задерживалась в корнях растений, что указывает на существование защитных барьеров, препятствующих их поступлению и накоплению в генеративных органах. Большее по сравнению с другими частями растений накопление металлов в корнях, вероятно, может быть объяснено тем, что при проникновении в плазму происходит инактивация и депонирование значительных их количеств в результате образования малоподвижных соединений с органическим веществом. Поглощенные корнями элементы находятся в свободном клеточном пространстве или используются в процессах метаболизма.

Показателем степени накопления элементов растениями является коэффициент биологического поглощения (КБП). КБП – это отношение содержания элемента в золе растений (Р) к валовому содержанию его в почве (П): $КБП = Р/П$. КБП позволяет косвенно судить о степени доступности элемента для растений и его поведении в системе «почва – растение» (Дегтярёв, 2024). В соответствии с величиной КБП Hg и As относятся к группе элементов слабого и очень слабого захвата (табл. 4). Таким образом, на протяжении жизни данные элементы лишь захватываются организмом пшеницы, но не накапливаются.

Таблица 4. КБП Hg и As органами растений при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	Металл / вегетативный орган					
	Hg			As		
	корни	солома	зерно	корни	солома	зерно
2015 год (действие)						
Контроль	0.021	0.0012	0.0004	0.03	0.005	0.003
50 т/га	0.021	0.0015	0.0007	0.02	0.004	0.003
100 т/га	0.022	0.0014	0.0004	0.02	0.004	0.003
150 т/га	0.022	0.0016	0.0004	0.03	0.004	0.003
200 т/га	0.018	0.0015	0.0006	0.02	0.004	0.003
250 т/га	0.018	0.0014	0.0003	0.02	0.004	0.003
300 т/га	0.018	0.0015	0.0003	0.02	0.004	0.002
2016 год (1-й год последствий)						
Контроль	0.025	0.0014	0.0008	0.03	0.006	0.004
50 т/га	0.025	0.0012	0.0008	0.03	0.005	0.004
100 т/га	0.022	0.0013	0.0007	0.03	0.004	0.003
150 т/га	0.021	0.0014	0.0006	0.03	0.005	0.003
200 т/га	0.022	0.0014	0.0007	0.02	0.004	0.003
250 т/га	0.022	0.0013	0.0006	0.03	0.004	0.002
300 т/га	0.017	0.0013	0.0004	0.03	0.004	0.002
2017 год (2-й год последствий)						
Контроль	0.012	0.006	0.0005	0.03	0.004	0.004
50 т/га	0.018	0.008	0.0005	0.02	0.004	0.004
100 т/га	0.021	0.01	0.0007	0.03	0.004	0.004
150 т/га	0.021	0.013	0.0006	0.03	0.004	0.003
200 т/га	0.02	0.013	0.0007	0.03	0.004	0.003
250 т/га	0.02	0.013	0.0007	0.02	0.003	0.003
300 т/га	0.017	0.012	0.0005	0.03	0.004	0.003

Оценивая величину КБП, следует отметить, что наблюдается тенденция накопления в вегетативных органах более значительных количеств поллютанта, чем в генеративных. В связи с этим более информативным критерием оценки количества металлов, перешедших из почвы в растения, является коэффициент накопления (Кн), или коэффициент биологической (биогеохимической) подвижности (Дьяконов и др., 1996). Он рассчитывается как отношение содержания элемента в золе растений (P_z) к содержанию его подвижных форм в почве ($P_{пф}$), так как именно они доступны растениям: $K_n = P_z / P_{пф}$. При использовании ЖОУ на основе СБН установлено некоторое увеличение Кн в корневой системе и в зеленой массе (солома), но уменьшение в зерне для Hg и As, что, вероятно, обусловлено защитной реакцией растений на избыток элементов в почве. Наиболее значимое уменьшение характерно для обменных форм мышьяка (табл. 5).

Следует отметить, что оценка накопления различных элементов в растениях, полученных на основе показателей КБП и Кн, неоднозначна. Это связано с тем, что растения могут использовать не только обменные формы элементов (экстракция ААБ), но и другие подвижные формы, содержание которых увеличивается с ростом загрязнения. Таким образом, при расчете Кн желательно оценивать содержание всей группы подвиж-

ных соединений элементов, включая обменные, комплексные и специфически сорбированные формы (экстракция 1М HCl за минусом количества ТМ, извлекаемых ААБ).

Одним из показателей накопления элементов растениями является величина биологического выноса ТМ с урожаем. Биологический вынос с основной и побочной продукцией определяется величиной урожая, содержанием металлов в растениях, а также биологическими особенностями возделываемых культур (табл. 6).

Зерно яровой мягкой пшеницы при применении ЖОУ в оптимальной дозе удобрения 200 т/га выносит Hg в среднем за 3 года 0.004 % от валового содержания его в почве, но 13.5 % от общего количества данного элемента, поступившего в почву с ЖОУ. Вынос As с урожаем пшеницы (зерно + солома) в среднем за 3 года составил 0.005 % от валового содержания в почве, или 19.1 % от общего количества данного элемента, поступившего в почву с ЖОУ. Ввиду того, что значительная часть металлов концентрируется в корнях, вынос элементов с урожаем одновременно сопровождался возвратом части этих же элементов в почву. Оставшиеся ТМ в почве со временем вымываются и тем самым загрязняют нижние горизонты почвы. Регулярное внесение высоких доз удобрений может привести не только к увеличению содержания ТМ, но и к их накоплению в почве. Из-

Таблица 5. Коэффициент накопления (K_n) обменных форм As органами растений при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	K_n (ААБ)		
	корни	солома	зерно
2015 год (действие)			
Контроль	0.12	0.02	0.02
50 т/га	0.13	0.02	0.02
100 т/га	0.11	0.018	0.013
150 т/га	0.12	0.02	0.014
200 т/га	0.10	0.018	0.012
250 т/га	0.11	0.02	0.013
300 т/га	0.11	0.02	0.01
2016 год (1-й год последействия)			
Контроль	0.13	0.022	0.017
50 т/га	0.12	0.021	0.017
100 т/га	0.12	0.019	0.012
150 т/га	0.11	0.019	0.013
200 т/га	0.10	0.019	0.012
250 т/га	0.12	0.017	0.013
300 т/га	0.12	0.018	0.011
2017 год (2-й год последействия)			
Контроль	0.12	0.018	0.02
50 т/га	0.13	0.019	0.019
100 т/га	0.12	0.017	0.016
150 т/га	0.12	0.017	0.012
200 т/га	0.11	0.017	0.013
250 т/га	0.1	0.017	0.014
300 т/га	0.12	0.017	0.013

Таблица 6. Вывод Hg и As из почвы (г/га) с урожаем при применении жидких органических удобрений на основе свиного бесподстилочного навоза

Вариант опыта	Элемент	
	Hg	As
Контроль	0.00002	0.059
50 т/га	0.00008	0.062
100 т/га	0.00002	0.059
150 т/га	0.00002	0.064
200 т/га	0.00004	0.073
250 т/га	0.00003	0.076
300 т/га	0.00002	0.058

быточное накопление ТМ будет приводить к эрозии почвы, изменению ее состава. Также это повлечет за собой снижение урожайности и накопление в зерне ТМ.

Заключение

Содержание ртути и мышьяка в лугово-черноземной маломощной среднегумусной почве ООО «РУСКОМ-Агро» Кормиловского муниципального района Омской области не превышает ОДК и ПДК.

Концентрация сухого вещества в ЖОУ на основе СБН составляет 0.8 %, содержание тяжелых металлов (мг/кг сух. в-ва): Hg – 0.007, As – 1.0, что с санитарных и экологических позиций является безопасным и пригодным для использования в сельскохозяйственном обороте.

Внесение ЖОУ на основе СБН в качестве органического удобрения ведет к увеличению содержания в почве Hg, As как в год действия, так и в ближайшие годы последействия. Поскольку внесение 200 т/га органического удобрений в лугово-черноземную почву под яровую пшеницу, хотя и обеспечивает максимальный прирост урожая, приводит к умеренному увеличению валового содержания ртути и мышьяка (в 1.21 и 1.08 раза соответственно), эта доза должна быть установлена как предельная, обеспечивающая экологическое благополучие.

Внесение ЖОУ на основе СБН в качестве органического удобрения ведет к повышению содержания Hg, As во всех органах сорта яровой мягкой пшеницы Памяти Азиева (корень, солома, зерно) в период вегетации и

сбора урожая. Распределение элементов по органам пшеницы как на контрольной, так и на почве с использованием ЖОУ на основе СБН следующее: корни > солома > зерно. Корни являются защитным барьером, препятствующим поступлению и накоплению металлов в генеративных органах.

В результате биологического выноса элементов с урожаем происходит изменение их

содержания в почве во времени. Вынос элементов с зерном в год действия и два ближайших года последствий не превышает 0.01 % от валового содержания их в почве и 15 % от количества, поступившего с органическими удобрениями. Регулярное бессистемное внесение высоких доз ЖОУ на основе СБН может привести к их накоплению в почве и изменению ее состава и свойств.

Библиография

- Безуглова О. С., Околелова А. А. О нормировании содержания мышьяка в почвах // Живые и биокосные системы. 2012. № 1. URL: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2012-1-7> (дата обращения: 10.05.2025).
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Кормин В. П., Трубина Н. К. Использование бесподстилочного свиного навоза в земледелии Омской области: рекомендации производству. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО ОмГАУ им. П. А. Столыпина, 2021б. 44 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48083300> (дата обращения: 10.05.2025).
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Кормин В. П., Шалак И. О. Использование свиного бесподстилочного навоза для оптимизации питания зерновых культур. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2023. 127 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67781796>
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Кормин В. П., Шмидт А. Г. Влияние свиного бесподстилочного навоза на продуктивность картофеля на лугово-черноземной почве южной лесостепи Омской области // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33, № 3. С. 23–25.
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Трубина Н. К., Кормин В. П., Шалак И. О. Применение органических удобрений на основе твердой фракции свиного бесподстилочного навоза при возделывании яровой пшеницы // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2021а. № 1 (41). С. 5–12. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_5
- Бобренко И. А., Гоман Н. В., Трубина Н. К., Шмидт А. Г. Оптимизация применения свиного бесподстилочного навоза под ячмень на лугово-черноземной почве южной лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2018. № 7. С. 23–25. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10706
- Бобренко И. А., Шалак И. О., Гоман Н. В., Трубина Н. К., Кормин В. П. Эффективность применения свиного бесподстилочного навоза под зерновые культуры // Вестник Омского ГАУ. 2022. № 1 (45). С. 13–19. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_13
- Виноградов Б. В. Биотические критерии выделения зон экологического бедствия России // Известия РАН. Серия географическая. 1993. № 5. С. 13–27.
- Гладышев В. П. Хемодинамика и мониторинг ртути в окружающей среде // Материалы Симпозиума «Контроль и реабилитация окружающей среды» / Под общ. ред. М. В. Кабанова, Н. П. Солдаткина. Томск: Изд-во «Спектр» Института оптики атмосферы СО РАН, 2000. С. 34–38.
- ГН 2.1.7.2511-09. Гигиенические нормативы. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/708/4293828439.pdf> (дата обращения: 10.05.2025).
- ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с.
- ГОСТ Р 53117-2008. Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия. (Актуализ. 01.07.2023). М.: Стандартинформ, 2020. 15 с.
- ГОСТ 17.4.3.06-2020. Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.
- Дегтярёв А. П. Коэффициенты биологического накопления как основа биохимической классификации химических элементов // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2024. Т. 16, № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsienty-biologicheskogo-nakopleniya-kak-osnova-biohimicheskoy-klassifikatsii-himicheskikh-elementov/viewer> (дата обращения: 10.05.2025).
- Дышко В. Н. Современные проблемы и инновационные технологии в агрономии: Курс лекций для магистров. Смоленск: ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2023. 118 с.
- Дьяконов К. Н., Касимов Н. С., Тикунов В. С. Современные методы географических исследований. М.: АО «Издателство «Просвещение», 1996. С. 62–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40347123> (дата обращения: 10.05.2025).
- Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхожде-

- ния в 2010 году . Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011.
- Кольга Д. Ф., Васько А. С. Переработка навоза в экологически безопасные органические удобрения . Минск: БГАТУ, 2017. 128 с.
- Комякова Е. М., Антонова О. И. Состав навоза КРС и свиней, особенности использования и перспективы переработки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 6 (188). С. 63–68.
- Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продуктах растениеводства.. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ЦИНАО, 1992. 63 с.
- О состоянии и об охране окружающей среды Омской области в 2009 году : / Правительство Омской обл., М-во сельского хоз-ва и продовольствия Омской обл.; . Омск: Омскбланкиздат, 2010. 200 с.
- Погуляй И. О., Николаева Д. А. Влияние жидкого свиного навоза на урожайность зерна яровой пшеницы в условиях Омской области // I региональная (заочная) научно-практическая конференция молодых ученых и обучающихся, посвященная 100-летию Омского государственного аграрного университета. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2018. С. 323–327.
- Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001 № 36 (ред. от 06.07.2011) «О введении в действие Санитарных правил» (вместе с «СанПиН 2.3.2.1078-01. 2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы» . URL: https://lyceum7rzd.ru/upload/medialibrary/834/SanPiN-2.3.2.1078_01.pdf (дата обращения: 10.05.2025).
- Решение Комиссии таможенного союза ЕЭС от 09.12.2011 № 874 «О принятии технического регламента Таможенного союза «О безопасности зерна» . URL: <https://www.alta.ru/tamdoc/11sr0874/#pr2> (дата обращения: 10.05.2025).
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Таблица 4.1. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве . URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 10.05.2025).
- Тарасов С. И. Зарубежный опыт экологически безопасного использования бесподстилочного навоза // Техника и технологии в животноводстве. 2020а. № 2. С. 69–79.
- Тарасов С. И. Проблемные аспекты использования побочной продукции животноводства // Техника и технологии в животноводстве. 2020б. № 3. С. 89–97.
- Тарасов С. И., Мёрзлая Г. Е. Использование бесподстилочного навоза. Приоритетные направления исследований. Сообщение 2. Производство бесподстилочного навоза. Актуальные направления исследований // Плодородие. 2018. № 6. С. 53–55. DOI: 10.25680/S19948603.2018.105.17
- Тарасов С. И., Кравченко М. Е., Бужина Т. А. Влияние длительного регулярного применения бесподстилочного навоза на плодородие, экологическую безопасность дерново-подзолистой супесчаной почвы // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 2 (38). С. 90–99.
- Тиво П. Ф. Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами, содержащимися в животноводческих стоках // Мелиорация. 2019. № 1 (87). URL: <https://melio.belal.by/jour/article/viewFile/132/116> (дата обращения: 10.05.2025).
- Шалак И. О. Использование свиного бесподстилочного навоза для оптимизации питания зерновых культур в южной лесостепи Западной Сибири : Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Омск, 2023. 24 с. URL: https://ssaa.ru/science/dissovet_99.2.117.03/2023/SHalak_IO/5-1.pdf.

Благодарности

Автор выражает благодарность кафедре агрохимии и почвоведения Омского государственного аграрного университета им. П. А. Столыпина за предоставленные результаты агрохимических исследований и данные полевых опытов в ООО «РУСКОМ-Агро» 2015–2017 гг.

AGROECOLOGICAL FEATURES OF MERCURY AND ARSENIC BEHAVIOR IN THE SOIL – PLANT SYSTEM AS A RESULT OF THE USE OF ORGANIC FERTILIZERS

KOROLEV
Alexander Nikolaevich

PhD, Siberian State Automobile and Road University (SibADI), 5 Mira Avenue, Omsk, 644080, Russia, Omsk region, korolev66.66@mail.ru

Key words:

mercury
arsenic
meadow-chernozem
soil
liquid organic fertilizer
pig manure
spring wheat

Summary: The improper use of liquid livestock waste as fertilizers can lead to an increase in the content of mobile forms of heavy metals and metalloids in the soil. The purpose of the study is to examine the features of the behavior of Hg and As in the “soil – plant” system and an ecological and agrochemical assessment of the use of a liquid fraction of pig manure as an organic fertilizer. We carried out a field experiment in the subzone of the southern forest-steppe of the Omsk region on meadow-chernozem soil. We studied the effect and two years of aftereffect of organic fertilizer on the yield of a variety of spring soft wheat “In memory of Aziev”, as well as the behavior of mercury and arsenic in the soil-plant system. The predecessor of spring wheat was peas. It was established that the optimal dose of the liquid fraction of pig manure in meadow-chernozem soil for spring wheat was 200 t/ha. Both the action and the aftereffect in this variant resulted in the highest yield increase. However, the introduction of pig manure leads to an increase in the content of Hg and As in the soil both in the year of action and in the coming years of aftereffect. The application of fertilizers at a dose of 300 t/ha per year leads to an increase in the gross mercury content by 1.36 times, and arsenic by 1.1 times. This is accompanied by an increase in the content of these elements in all organs of wheat (root, straw, grain) during the growing season and harvest. The distribution of elements by wheat organs both in the control and in the soil using fertilizer is as follows: roots > straw > grain. The roots are a protective barrier that prevents the entry and accumulation of metals in the generative organs. The removal of elements with grain in the year of action and the next two years of aftereffect does not exceed 0.01 % of their gross content in the soil and 15 % of the amount received with organic fertilizer. It is proposed to calculate the accumulation coefficient of Hg and As, taking into account the entire group of mobile forms of compounds of these elements in the soil.

Received on: 03 August 2025

Published on: 10 December 2025

References

- About the state and environmental protection of the Omsk region in 2009: , Pravitel'stvo Omskoy obl., M-vo sel'skogo hoz-va i prodovol'stviya Omskoy obl.; . Omsk: Omskblankizdat, 2010. 200 p.
- Bezuglova O. S. Okolelova A. A. On the normalization of arsenic content in soils, Zhivye i biokosnye sistemy. 2012. No. 1. URL: <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2012-1-7> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Biological accumulation coefficients as a basis for the biochemical classification of chemical elements, Mezhdisciplinarnyy nauchnyy i prikladnoy zhurnal «Biosfera». 2024. T. 16, No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsienty-biologicheskogo-nakopleniya-kak-osnova-biohimicheskoy-klassifikatsii-himicheskikh-elementov/viewer> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Kormin V. P. Shalak I. O. The use of pig semiliquid manure to optimize the nutrition of grain crops. Omsk: Izd-vo FGBOU VO Omskiy GAU, 2023. 127 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67781796>
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Kormin V. P. Shmidt A. G. The effect of pig manure on potato productivity in meadow-chernozem soil of the southern forest-steppe of the Omsk region, Dostizheniya nauki i tehniki APK. 2019. T. 33, No. 3. P. 23–25.
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Kormin V. P. Trubina N. K. The use of pig semiliquid manure in agriculture in the Omsk region: recommendations for production. Omsk: Izd-vo FGBOU VO OmGAU im. P. A. Stolypina, 2021b. 44 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48083300> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Trubina N. K. Kormin V. P. Shalak I. O. The use of organic fertilizers based on the

- solid fraction of pig manure in the cultivation of spring wheat, *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021a. No. 1 (41). P. 5–12. DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_5
- Bobrenko I. A. Goman N. V. Trubina N. K. Shmidt A. G. Optimization of the use of pig manure for barley on meadow-chnozem soil of the southern forest-steppe of Western Siberia, *Zemledelie*. 2018. No. 7. P. 23–25. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10706
- Bobrenko I. A. Shalak I. O. Goman N. V. Trubina N. K. Kormin V. P. The effectiveness of application of pig manure for grain crops, *Vestnik Omskogo GAU*. 2022. No. 1 (45). P. 13–19. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_13
- D'yakonov K. N. Kasimov N. S. Tikunov V. S. Modern methods of geographical research. M.: AO «Izdatel'stvo «Prosveschenie», 1996. P. 62–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40347123> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Decision of the Commission of the Customs Union of the EEC dated 09.12.2011 No. 874 «On the adoption of the Technical Regulations of the Customs Union «On grain Safety». URL: <https://www.alta.ru/tamdoc/11sr0874/#pr2> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- Dyshko V. N. Modern problems and innovative technologies in agronomy: A course of lectures for masters. Smolensk: FGBOU VO Smolenskaya GSHA, 2023. 118 p.
- GN 2.1.7.2511-09. Hygienic standards. Approximate permissible concentrations (APCs) of chemicals in the soil. M.: Federal'nyy centr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. 10 p. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/708/4293828439.pdf> (data obrascheniya: 10.05.2025).
- GOST 17.4.3.06-2020. Nature conservation. Soils. General requirements for the classification of soils by the effect of chemical pollutants on them. M.: Standartinform, 2020. 14 p.
- GOST R 17.4.3.07-2001. Nature conservation. Soils. Requirements for the properties of sewage sludge when used as fertilizers. M.: Standartinform, 2008. 5 p.
- GOST R 53117-2008. Organic fertilizers based on animal husbandry waste. Technical specification. (Aktualiz. 01.07.2023). M.: Standartinform, 2020. 15 p.
- Gladyshev V. P. Chemodynamics and monitoring of mercury in the environment, *Materialy Simpoziuma «Kontrol' i reabilitatsiya okruzhayushey sredy»*, Pod obsch. red. M. V. Kabanova, N. P. Soldatkina. Tomsk: Izd, vo «Spektr» Instituta optiki atmosfery SO RAN, 2000. P. 34–38.
- Guidelines for the determination of heavy metals in farmland soils and crop products. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: CINAQ, 1992. 63 p.
- Kol'ga D. F. Vas'ko A. S. Processing of manure into environmentally friendly organic fertilizers. Minsk: BGATU, 2017. 128 p.
- Komyakova E. M. Antonova O. I. Composition of cattle and pig manure, features of use and prospects of processing, *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. No. 6 (188). P. 63–68.
- Pogulyay I. O. Nikolaeva D. A. The effect of liquid pig manure on the yield of spring wheat grains in the Omsk region, I regional'naya (zaochnaya) nauchno-prakticheskaya konferenciya molodyh uchenyh i obuchayuschihsya, posvyaschennaya 100-letiyu Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Omsk: Izd-vo FGBOU VO Omskiy GAU, 2018. P. 323–327.
- Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 11/14/2001 No. 36 (as amended on 07/06/2011) «On the introduction of Sanitary Rules» (together with «SanPiN 2.3.2.1078-01. 2.3.2. Food raw materials and foodstuffs. Hygienic requirements for food safety and nutritional value. Sanitary and epidemiological rules and regulations». URL: https://lyceum7rzd.ru/upload/medialibrary/834/SanPiN-2.3.2.1078_01.pdf (data obrascheniya: 10.05.2025).
- SanPiN 1.2.3685 is 21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Table 4.1. Maximum permissible concentrations (MPC) and approximate permissible concentrations (ODCs) of chemicals in the soil. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (data obrascheniya 10.05.2025).
- Shalak I. O. The use of pig semiliquid manure to optimize the nutrition of grain crops in the southern forest-steppe of Western Siberia: Avtoref. dip. ... kand. s, h. nauk. Omsk, 2023. 24 p. URL: https://ssaa.ru/science/dissovet_99.2.117.03/2023/SHalak_IO/5-1.pdf.
- Tarasov S. I. Kravchenko M. E. Buzhina T. A. The effect of long-term regular use of semiliquid manure on the fertility and environmental safety of sod-podzolic sandy-loam soils, *Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve*. 2020. No. 2 (38). P. 90–99.
- Tarasov S. I. Foreign experience of environmentally safe use of semiliquid manure, *Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve*. 2020a. No. 2. P. 69–79.
- Tarasov S. I. Problematic aspects of the use of animal by-products, *Tehnika i tehnologii v zhivotnovodstve*. 2020b. No. 3. P. 89–97.
- Tarasov S. I. The use of semiliquid manure. Priority areas of research. Message 2. Production of semiliquid manure. Current research directions, *Plodorodie*. 2018. No. 6. P. 53–55. DOI: 10.25680/S19948603.2018.105.17
- The yearbook. Pollution of the soils of the Russian Federation by industrial toxicants in 2010. Obninsk: GU

«VNIIGMI-MCD», 2011.

Tivo P. F. Environmental pollution by heavy metals contained in livestock runoff, Melioraciya. 2019. No. 1 (87). URL: <https://melio.belal.by/jour/article/viewFile/132/116> (data obrascheniya: 10.05.2025).

Vinogradov B. V. Biotic criteria for the allocation of environmental disaster zones in Russia, Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 1993. No. 5. P. 13–27.



УДК 528.8

ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ ЗАРАСТАНИЯ ГЕЛОФИТАМИ КРУПНЫХ ЗАЛИВОВ ОЗЕРА ИЛЬМЕНЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

ШТЕФУРЯК
Алина Викторовна

*Псковский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПсковНИРО»),
180007, Псковская область, г. Псков, ул. Максима Горького, д. 13,
a.shtefuryak@pskov.vniro.ru*

МИХАЛАП
Сергей Геннадьевич

*Псковский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПсковНИРО»),
180007, Псковская область, г. Псков, ул. Максима Горького, д. 13,
sgmikhalap@pskov.vniro.ru*

ВАСИЛЬЕВА
Елена Сергеевна

*Новгородский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («НовгородВНИРО»),
173002, Новгородская область, г. Великий Новгород, ул. Октябрь-
ская, д. 38, кв. 2, vasileva@novgorod.vniro.ru*

Ключевые слова:

зарастание
уровни воды
воздушно-водная
растительность
дистанционное зондирование
Земли
озеро Ильмень
NDWI
NDVI
геоинформационные системы
Landsat

Аннотация: В статье рассматриваются процессы зарастания озера Ильмень воздушно-водной растительностью – гелофитами, которая является одним из ключевых компонентов водной экосистемы и во многом определяет ее трофическое состояние и биопродуктивность. Исследование выполнено на основе дешифрирования многоспектральных спутниковых изображений с использованием нормализованного вегетационного индекса (NDVI), что позволило получить объективные сведения о распределении растительных сообществ в акватории. В качестве источника информации применялись космические снимки спутников Landsat, прошедшие стандартные этапы радиометрической и атмосферной коррекции. Особое внимание уделено трем крупным заливам озера – Аркадскому, Синецкому и Рубельскому, которые наиболее чувствительны к колебаниям уровня воды. Построенные картосхемы пространственного распределения воздушно-водной растительности позволили выявить закономерности их распространения во временном и пространственном аспектах. Установлено, что в условиях снижения уровня воды фиксируется устойчивая тенденция увеличения площади зарастания, тогда как при максимальных уровнях степень покрытия акватории растительностью не превышает 2.38–4.86 %. Наибольшие площади зарастания, превышающие 60 км², отмечены в июле 2018 г., июне 2021 г. и августе 2023 г. Для отдельных заливов определены пиковые значения зарастания, а также выявлена статистически значимая обратная зависимость между площадью зарастания и уровнем воды, аппроксимируемая полиномиальной кривой.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 27 июня 2025 года

Подписана к печати: 10 декабря 2025 года

Введение

Изучение процессов развития и распространения воздушно-водной растительности (ВВР) – гелофитов в пресноводных экосистемах имеет важное как теоретическое, так и прикладное значение. Зарастающие мелководья играют ключевую экологическую роль: они являются природным механизмом самоочищения водоемов, а также важным фактором формирования рыбопродуктивности (Tan et al., 2020; Громов, Кудряшов, 2022). Структура и степень зарастания позволяют не только оценивать трофический статус водоема, но и определять интенсивность процессов его сукцессии.

Озеро Ильмень является одним из крупных озер Российской Федерации, занимая 12-е место по площади водного зеркала, которая, по современным данным, составляет около 982 км². Согласно существующей гидрологической классификации Романенко, Ильмень относится к категории больших озер (площадь водного зеркала до 1000 км²). Это важный природный ресурс для региона, в т.ч. для рыбопромысловой отрасли Новгородской области. Его акватория является средой обитания более 25 видов рыб, среди которых доминируют фитофильные представители – лещ, синец, щука и судак, в совокупности формирующие около 60–70 % улова (Лукин и др., 2019). Для этих видов водная растительность обеспечивает ключевые условия для нереста, защиты и нагула молоди. Однако снижение уровня воды или ухудшение качества среды приводит к миграции рыб из этих районов (Столбунов, 2007).

Современный этап изучения площади зарастания водоемов характеризуется повышенным научным и практическим интересом, что связано в том числе с глобальными изменениями климата (Zhou et al., 2023). Известно, что пространственное распределение ВВР и динамика зарастания мелководных участков водоема зависят от гидрологического режима, и особенно от уровня воды. Зависимости «уровень воды – зарастание» для разных водоемов и разных климатических зон могут существенно различаться. Понимая, как гидрологические факторы влияют на распределение гелофитов в водоемах, можно оценивать тенденции развития ВВР.

Использование методов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) позволяет осуществлять мониторинг окружающей природной среды на более высоком уровне,

дополняя и даже частично заменяя прямые полевые исследования (Wang et al., 2021). Спутниковые данные могут успешно применяться для изучения биологических особенностей ВВР, а также для составления карт развития ВВР на основе данных дешифрования космических снимков. Снимки водоемов на различных временных промежутках являются ценным материалом, изучение и сопоставление которого позволяет проводить анализ современного состояния растительности, сезонных и многолетних динамических процессов и, в конечном итоге, прогнозировать и управлять ими.

Цель – проследить динамику площади зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень с помощью методов ДЗЗ и выявить зависимость площади зарастания ВВР и уровня воды как определяющего фактора.

Для достижения цели нами были поставлены следующие задачи:

- выполнить классификацию спутниковых снимков;
- определить площадь зарастания ВВР;
- выявить зависимость площади зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень от уровня воды.

Материалы

Многолетние данные изменения уровня воды оз. Ильмень с 2009 по 2023 г. предоставлены Новгородским филиалом ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО».

Для определения границ акватории озера, площади зарастания ВВР и картографирования использовали данные спутников Landsat 5, Landsat 8 и Landsat 9 из каталога USGS (U. S. Geological Survey) с пространственным разрешением 30 м/пиксель (Shen et al., 2022). Были выбраны преимущественно безоблачные снимки с 2009 по 2023 г. с июня по август (некоторые месяцы не представлены из-за отсутствия безоблачных снимков). Всего было проанализировано 10 спутниковых снимков. Основную обработку данных проводили в стандартных пакетах модулей географической информационной системы QGIS версии 3.28.0.

Коэффициенты множественной детерминации, уравнения регрессии для зависимости уровня воды и площадей зарастания ВВР, а также расчеты средней относительной ошибки аппроксимации вычисляли в MS Excel 2021.

Методы

За последние десятилетия проблема зарастания мелководных озер умеренной зоны получила широкое освещение в научной литературе. Показано, что пространственно-временная динамика высшей водной растительности тесно связана с изменениями гидрологического режима, прежде всего с колебаниями уровня воды и сезонным перераспределением мелководных площадей (Keddy, 2010; Søndergaard et al., 2017). Ряд исследований фиксирует увеличение площади зарастания при длительном обмелении, что связано с расширением литоральной зоны и благоприятными условиями для укореняющихся гидрофитов (Tan et al., 2020; Zhang et al., 2021). Одновременно отмечается, что при повышенных уровнях воды рост ВВР подавляется вследствие затопления прибрежной зоны и снижения освещенности донных горизонтов (Zhou et al., 2023).

Для озер умеренной части России установлено, что зарастание литорали сопровождается изменением видового состава и структурной перестройкой сообществ: камыш озерный (*Schoenoplectus lacustris*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis*) и рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus*) формируют устойчивые ценозы, определяющие биотические процессы в прибрежных экотонах (Филоненко, Комарова, 2015; Кочеткова и др., 2022). Для крупных водохранилищ Волго-Балтийского каскада показано, что распространение ВВР коррелирует с сезонными и многолетними изменениями уровня, а также с эвтрофикацией, которая усиливает зарастание за счет повышенной продуктивности (Sharov, 2019; Kovaleva, Sharov, 2021).

В последние годы по оз. Ильмень и по другим мелководным системам умеренной зоны появились актуальные количественные оценки многолетней динамики гидробиологических и растительных параметров, что позволяет пересмотреть ранние представления о структуре и тенденциях зарастания. Региональные мониторинговые отчеты (данные 2003–2020 гг. и последующие годы) фиксируют существенную межгодовую вариабельность трофического состояния и площади акватории Ильменя, а также растущую роль локальных гидрологических изменений (повышение / понижение уров-

ней воды) в формировании литоральных сообществ (Поддубный и др., 2018а; Базарова, Куклин, 2023). Глобальные и региональные временные ряды высокого пространственного разрешения подтверждают, что тренды по росту или снижению площади водной растительности зависят от сочетания гидрологического режима, прозрачности воды и антропогенных факторов, это означает, что выводы о степени зарастания оз. Ильмень следует делать с учетом локальной динамики заливов и данных полевых обследований.

С учетом изменчивости видового состава растительных сообществ, формирующихся в условиях зарастания на длительных временных промежутках, а также в связи с ограничением возможностей достоверной видовой идентификации растений исключительно на основе спутниковых данных без натурной верификации, в рамках данного исследования видовой состав не рассматривался.

На подготовительном этапе проводилась радиометрическая и атмосферная коррекция исходных данных, реализуемая средствами модуля Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) в программной среде QGIS.

В качестве границ анализа ДЗЗ использованы крупные заливы (Аркадский, Синецкий и Рубельский) оз. Ильмень при максимальном уровне воды за исследуемый период (рис. 1).

Для определения площади водного зеркала и формирования береговой линии оз. Ильмень в условиях различного уровня воды применялся расчет нормализованного разностного индекса воды (NDWI – Normalized Difference Water Index) на основе данных спутников Landsat 5, 8 и 9 (McFeeters, 1996).

С целью оценки площади зарастания крупных заливов озера ВВР выполнялась классификация изображений, основанная на вычислении нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для данных Landsat 5, 8 и 9. NDVI является одним из наиболее широко применяемых спектральных индексов для количественной оценки состояния растительного покрова в широком пространственно-временном масштабе (Jaskula, Sojka, 2019). Его значение прямо связано с уровнем содержания фотосинтетически активной биомассы в исследуемой области, что обеспечивает достоверную оценку пространственных параметров зарастания (Власов и др., 2019) (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика используемых спектральных индексов

Спектральный индекс	Формула расчета	
	Landsat 5	Landsat 8–9
NDWI	$(B2-B4)/(B2+B4)$	$(B3-B5)/(B3+B5)$
NDVI	$(B4-B3)/(B4+B3)$	$(B5-B4)/(B5+B4)$

Как правило, диапазон значений NDVI колеблется от -1 до 1, где положительные значения свидетельствуют о присутствии растительной биомассы, а отрицательные указывают на наличие воды (Chebud et al., 2012). Для конкретной территории оз. Ильмень в данной работе применялись уточненные пороговые значения NDVI: значение меньше 0.11 характеризует водную поверхность, тогда как значение выше 0.11 свидетельствует о наличии растительного покрова. При этом диапазон NDVI от 0.11 до 0.32 используется для выделения зоны распространения ВВР. Классификация данных спутниковой съемки

позволила выделить три ключевых класса пикселей: открытую водную поверхность, зоны распространения полупогруженных форм высшей водной растительности и сухопутный растительный покров (см. рис. 1). При этом растения, полностью расположенные под уровнем воды, не подлежали учету в рамках проведенного дешифрирования (Бондаренко и др., 2021; Lv et al., 2020). Основным объектом для оценки служили воздушно-водные растения, характеризующиеся расположением части стебля в толще воды, а части – в воздушной среде.

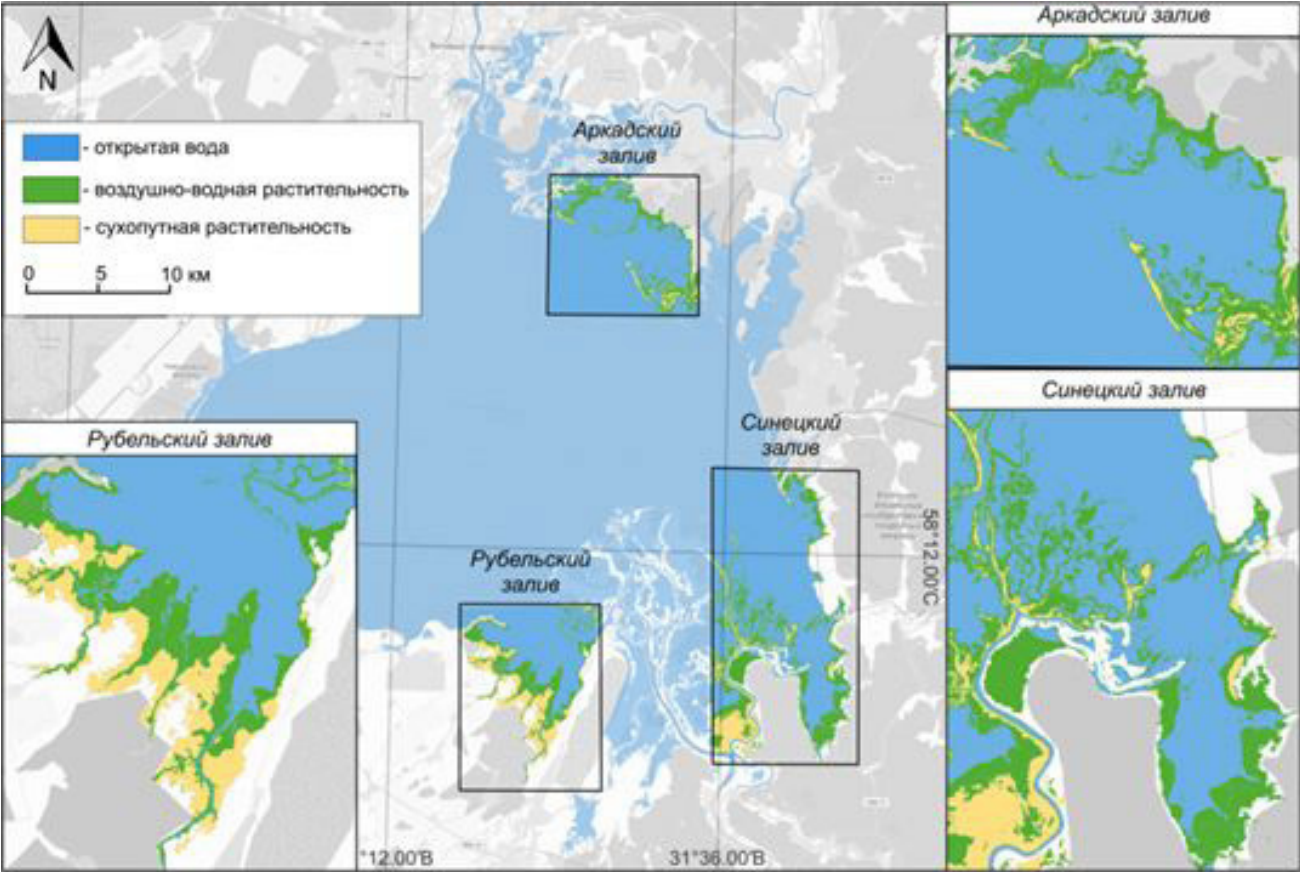


Рис. 1. Пример выделенных классов пикселей по NDVI на основе космоснимка за 23.06.2021
Fig. 1. An example of selected pixel classes according to NDVI based on a satellite image for 23.06.2021

Значение степени зарастания определяли как отношение площади зарастания к площади зеркала воды при максимальном

уровне воды и относили к определенному классу согласно методике Папченкова (Панюкова и др., 2022).

Результаты

В период с июня по август 2009–2023 гг. максимальная площадь водной поверхности оз. Ильмень достигла 1347 км², при минимальном уровне воды ее размер не

превышал 942 км². Таким образом, акватория сократилась примерно на 30 %, т. е. более чем на 400 км², что напрямую связано с межгодовыми колебаниями уровня воды в озере (рис. 2).

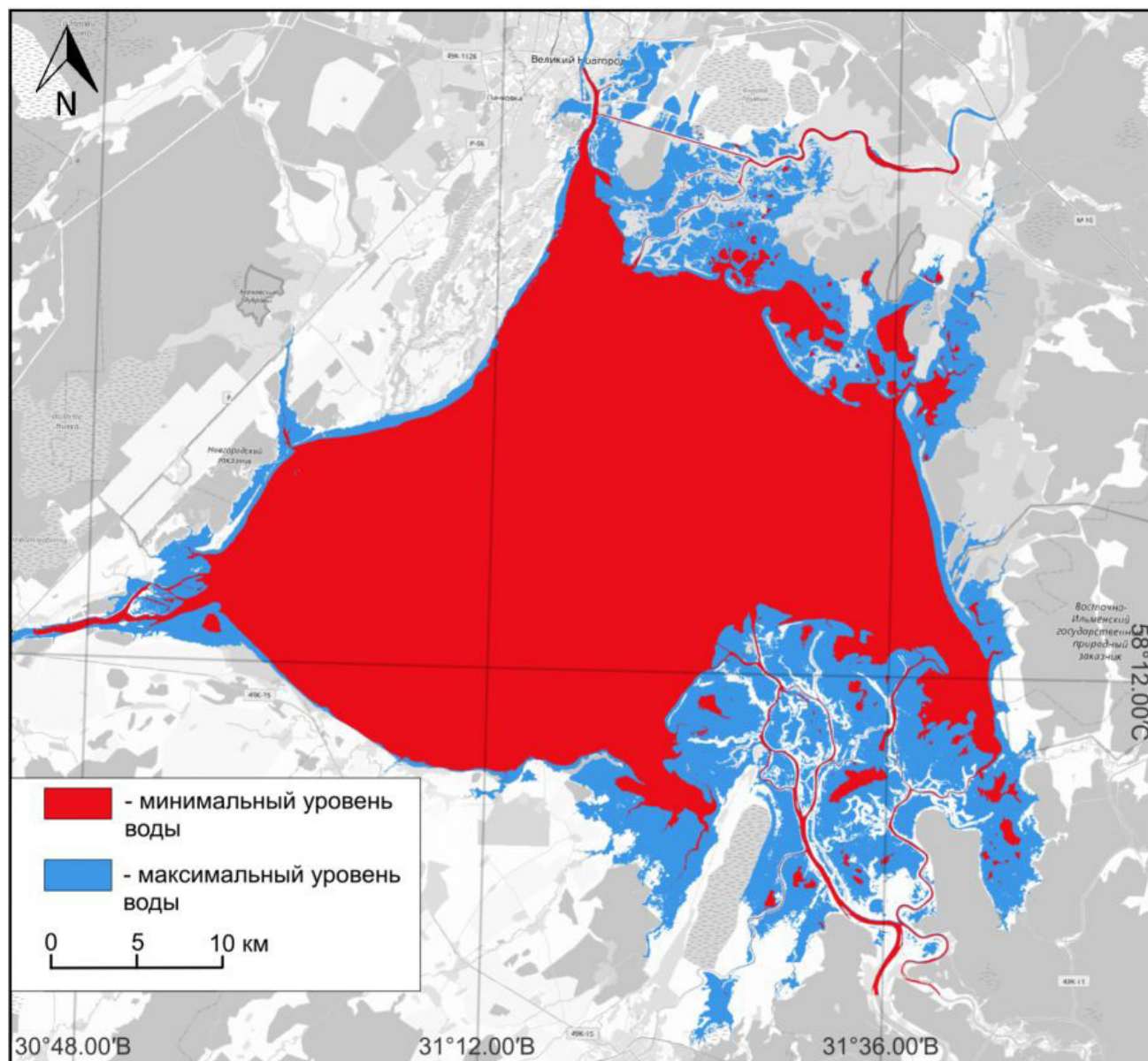


Рис. 2. Площадь акватории оз. Ильмень при разных уровнях воды
Fig. 2. The water area of Lake Ilmen at different water levels

Практический интерес представляют пространственное распределение и динамика зарастания ВВР оз. Ильмень (Кутявина и др., 2024). Анализ полученных данных свидетельствует о неравномерности зарастания озера: растительные сообщества сосредоточены преимущественно в крупных мелководных заливах – Аркадском, Синецком и Рубельском. По результатам дешифрования спутниковых изображений установлено, что при максимальной площади водного зеркала средняя степень зарастания

заливов изменялась в пределах от 2.38 до 4.86 % (см. табл. 1). Наибольшая совокупная площадь развития высшей водной растительности (более 60 км²) пришлось на июль 2018 г., июнь 2021 г. и август 2023 г. Для отдельных заливов максимальные площади зарастания составили: Аркадский – 15.75 км² (июль 2018 г.), Синецкий – 49.11 км² (август 2023 г.), Рубельский – 13.13 км² (июнь 2021 г.), что составляет около 0.97 % от его площади (табл. 2, 3).

Распределение глубин в водоеме (рис. 3) свидетельствует о преобладании мелко-водных участков, приуроченных главным образом к заливам, где глубины составляют 0–2 м. В этих зонах формируются оптимальные условия для распространения воздушно-водной растительности, тогда как более глубокие участки (2–4 м) сосредоточены в открытом плесе и ограничивают возможности зарастания. В 2019, 2021 и 2023 гг. наибольшие значения прозрачности фиксировались на станции 7, расположенной у впадения р. Ловать, что может быть связано с поступлением относительно более прозрачных речных вод и их разбавляющим эффектом. В 2020 г. наибольшая прозрачность наблюдалась в открытой части водоема (станция 6), а в 2022 г. ее уровень был сопоставим со значениями станции 8, приуроченной к Рубель-

скому заливу. В 2023 г. станция 4 (Аркадский залив) по показателям прозрачности превысила открытую часть, что, вероятно, обусловлено локальными гидродинамическими условиями и сниженной концентрацией взвешенных частиц. Такие различия отражают совокупное влияние речного стока, приносящего как растворенные вещества, так и относительно прозрачные воды (Поддубный и др., 2018б), ветрового перемешивания, усиливающего ресуспензию донных отложений в плесах (Keddy, 2010), а также пространственного распределения фитопланктона и макрофитов (Sharov, 2019). Совокупный анализ глубин и прозрачности позволяет уточнить границы и потенциальные зоны распространения ВВР, подчеркивая ключевую роль мелководных заливов.

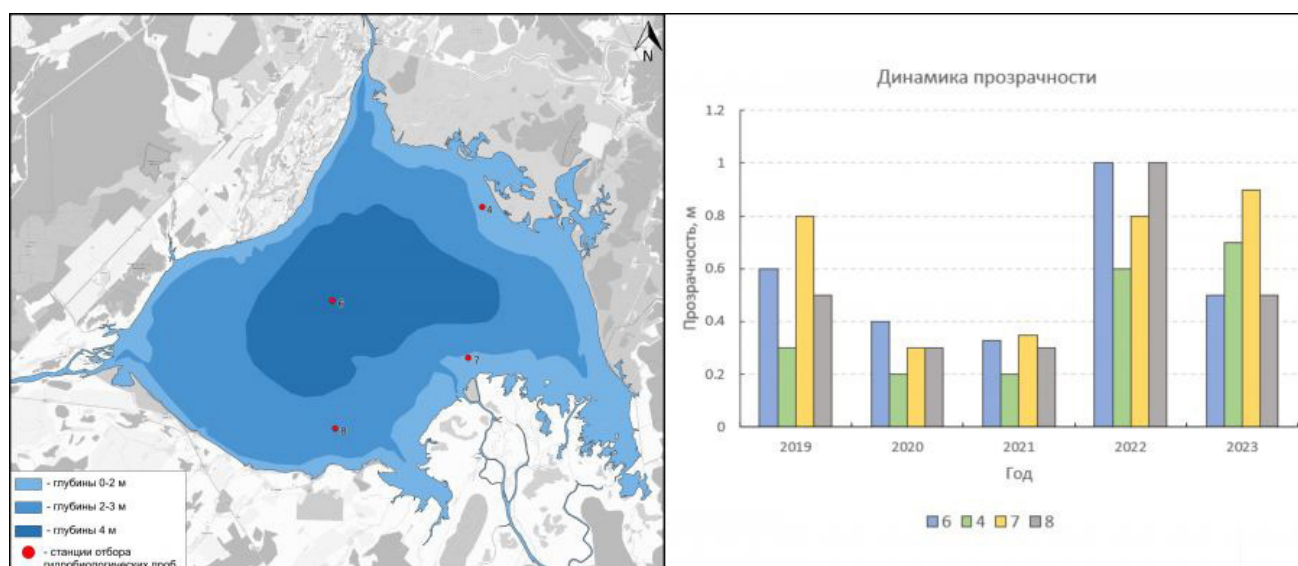


Рис. 3. Распределение глубин и динамика прозрачности воды на станциях гидробиологического мониторинга: 4, 7 и 8 – станции в заливах; 6 – станция открытого плеса

Fig. 3. Depth distribution and dynamics of water transparency at hydrobiological monitoring stations: 4, 7 and 8 – stations in bays; 6 – open-water station

В. Г. Папченков (2001) выделяет 8 классов водоемов: 1) не заросшие или почти не заросшие – площадь зарослей менее 1 % от площади акватории; 2) очень слабо заросшие – 1–5 %; 3) слабо заросшие – 6–10 %; 4) умеренно заросшие – 11–25 %; 5) значительно заросшие – 26–40 %; 6) сильно заросшие – 41–65 %; 7) очень сильно заросшие – 66–95 %; 8) сплошь заросшие – 96–100 %.

Согласно результатам дешифрирования спутниковых данных Landsat, средняя степень зарастания Аркадского и Рубельского заливов озера Ильмень в условиях максимальных уровней воды составляет менее 1 % (соответственно 0.76 % и 0.56 %), что позволяет отнести данные районы к категории

не заросших или практически не заросших. Для Синецкого залива характерно более заметное распространение ВВР – доля зарастания составляет 1 % (2.51 %), что в соответствии с классификацией свидетельствует о слабой степени его зарастания.

Зарастание заливов озера в целом характеризуется сходной структурой растительных сообществ. Центральные части акватории заняты разреженными зарослями рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus*), плотность которых возрастает по мере приближения к береговой зоне. Вдоль береговой линии формируются полосы камыша озерного (*Schoenoplectus lacustris*), представленные не сплошным фронтом, а

мозаичными участками различной протяженности. Наиболее густые скопления камыша приурочены к прибрежным мелководьям и вершинам заливов, тогда как менее плотные его ценозы встречаются несколько удаленнее от берега. Между участками камыша располагаются сообщества рдеста пронзеннолистного и горца земноводного (*Persicaria amphibia*), формирующие переходные фитоценозы. Следует подчеркнуть,

что выводы о степени зарастания водоемов высшей водной растительностью на основе спутниковых индексов (например, NDVI) имеют ограниченную применимость: погруженные виды, такие как рдест пронзеннолистный, практически не детектируются данным методом, вследствие чего их пространственное распространение может быть недооценено (Распопов, 1985).

Таблица 2. Площадь зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень по снимкам Landsat

Дата	Площадь зеркала воды, км ²	Уровень воды, м	Площадь зарастания ВВР при тах уровне воды, км ²			Общая площадь зарастания ВВР при тах уровне воды, км ²
			Аркадский залив	Синецкий залив	Рубельский залив	
Июль 2009	1001	4.36	9.83	26.04	10.37	46.24
Август 2010	966	3.09	10.07	33.28	6.26	49.61
Июнь 2011	1347	5.39	4.26	27.33	0.49	32.08
Август 2014	971	2.44	10.76	28.97	6.85	46.58
Август 2017	1206	4.8	9.16	39.47	10.89	59.52
Июль 2018	1042	3.36	15.75	38.78	10.4	64.93
Июнь 2021	1154	4.02	15.33	34.5	13.13	62.96
Август 2022	978	3.16	12.06	37.02	6.89	55.97
Июль 2023	994	2.75	5.38	23.95	4.39	33.72
Август 2023	942	5.21	10.18	49.11	6.16	65.45

Результаты анализа спутниковых данных подтверждают относительно низкую интенсивность зарастания оз. Ильмень ВВР в течение летнего периода (июнь – август) 2009–2023 гг. (Семенов, Иванова, 2023). Наименьшая совокупная площадь зарастания крупных заливов (32.08 км²) отмечена в июне 2011 г. – в условиях максимально высокого уровня воды в озере (5.39 м), что, вероятно, ограничивало условия для активного развития растительной биомассы и распространения макрофитов (табл. 3).

Динамика изменения площади зарастания носит волнообразный характер, что обусловлено значительными колебаниями уровня воды. При его снижении отмечается сокращение площади открытой воды и одновременный рост площади, занятой ВВР, в то время как при повышении уровня воды наблюдается обратный процесс (Поддубный и др., 2022). ВВР в течение 14-летнего периода сохраняется преимущественно в одних и тех же акваториях, что подчеркивает флуктуирующий характер ее пространственного развития с отчетливой положительной трендовой составляющей (рис. 4).

Многолетняя динамика площади зарастания воздушно-водной растительностью

крупных заливов оз. Ильмень имеет разные тенденции. Так, в Синецком и Рубельском заливах прослеживается отчетливая положительная тенденция в изменении площади зарастания, в то время как в Аркадском заливе этот параметр за 14-летний период остается практически неизменным (рис. 5). К примеру, в период с августа 2010 г. по август 2023 г. в Аркадском заливе рост площади зарастания составил лишь около 1.09 %, в Синецком – достиг 47.57 %, тогда как в Рубельском заливе отмечается незначительное снижение площади зарастания примерно на 1.62 % (рис. 6).

При снижении уровня воды условия для роста ВВР становятся более благоприятными: повышается степень проникновения солнечного излучения в толщу воды, усиливается прогрев мелководных участков, что способствует активному вегетативному развитию растений. При обратной ситуации, когда уровень воды поднимается, значительные площади растений оказываются затопленными или теряют доступ к необходимой для фотосинтеза солнечной энергии, что приводит к торможению роста или даже деградации растительного покрова. Понимание этой обратной зависимости между

Таблица 3. Степень зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень по снимкам Landsat

Дата	Степень зарастания акватории при max уровне воды, %			Общая степень зарастания акватории при max уровне воды, %
	Аркадский залив	Синецкий залив	Рубельский залив	
Июль 2009	0.73	1.93	0.77	3.43
Август 2010	0.75	2.47	0.46	3.68
Июнь 2011	0.32	2.03	0.04	2.38
Август 2014	0.80	2.15	0.51	3.46
Август 2017	0.68	2.93	0.81	4.42
Июль 2018	1.17	2.88	0.77	4.82
Июнь 2021	1.14	2.56	0.97	4.67
Август 2022	0.90	2.75	0.51	4.16
Июль 2023	0.40	1.78	0.33	2.50
Август 2023	0.76	3.65	0.46	4.86

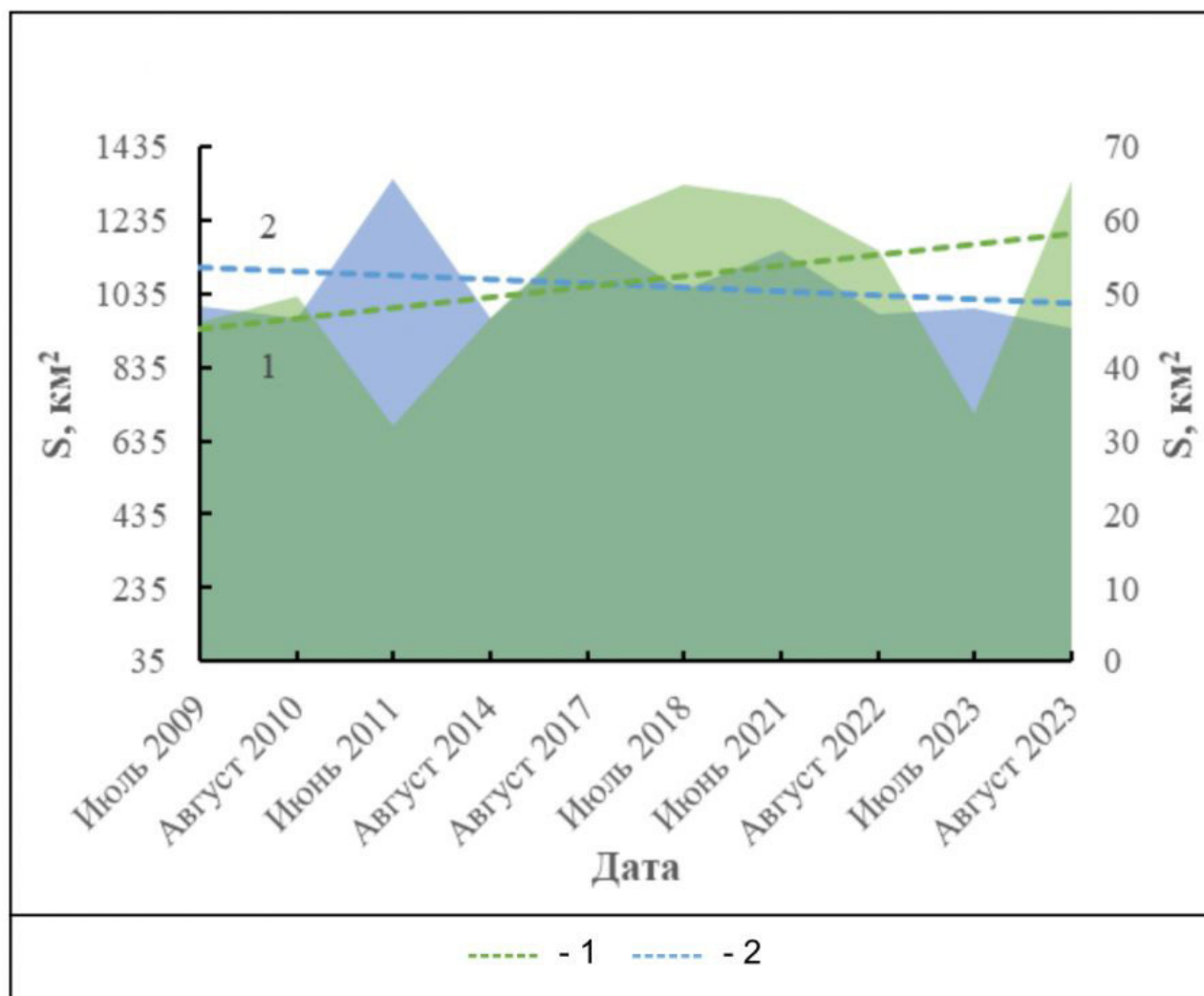


Рис. 4. Динамика площади зеркала воды и зарастания ВВР крупных заливов оз. Ильмень за 14-летний период: 1 – линия тренда площади зарастания ВВР; 2 – линия тренда площади водного зеркала

Fig. 4. Dynamics of the water mirror area and overgrowth of large bays of Lake Ilmen by aero-aquatic vegetation (AAV) over a 14-year period: 1 – trend line of the overgrowth area of AAV; 2 – trend line of the area of the water mirror

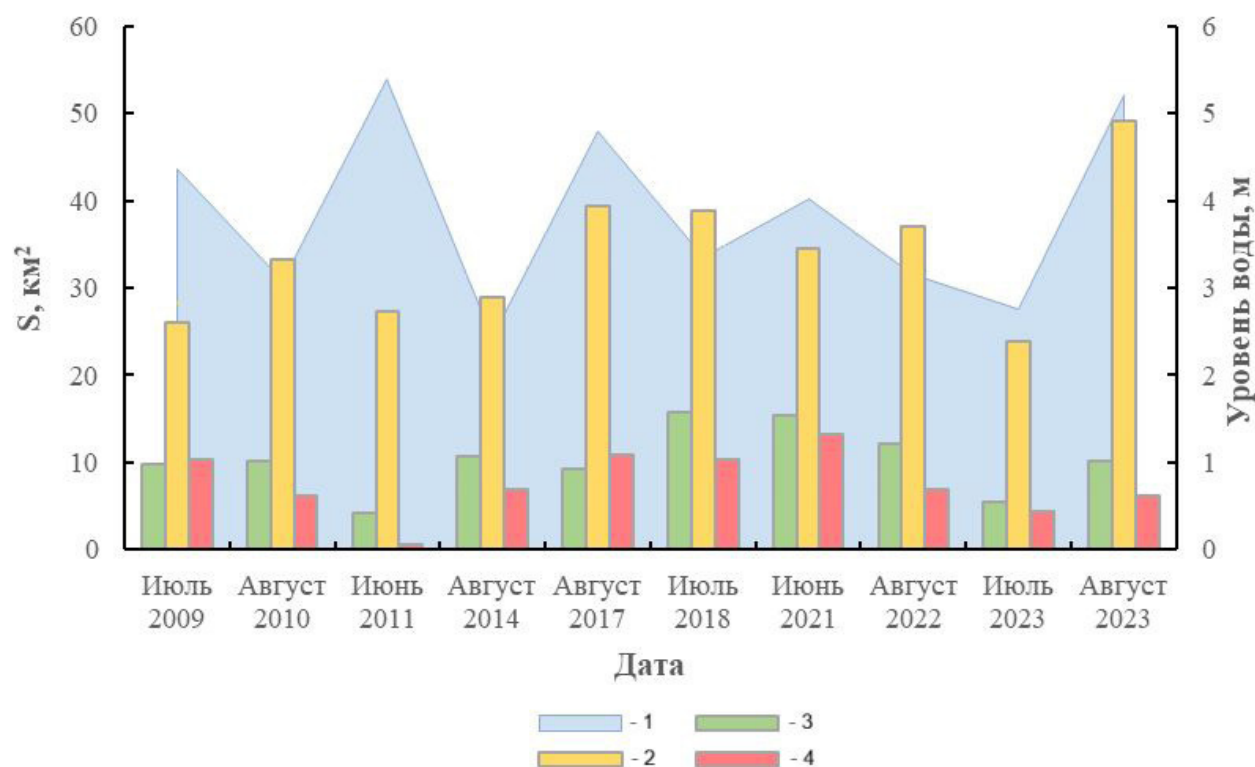


Рис. 5. Изменение уровня воды оз. Ильмень и площади зарастания ВВР в заливах: 1 – уровень воды (м); 2 – Синецкий залив; 3 – Аркадский залив; 4 – Рубельский залив

Fig. 5. Changes in the water level of Lake Ilmen and the area of overgrowth of AAV in the bays: 1 – water level (m); 2 – Sinetsky Bay; 3 – Arkadsky Bay; 4 – Rubelsky Bay

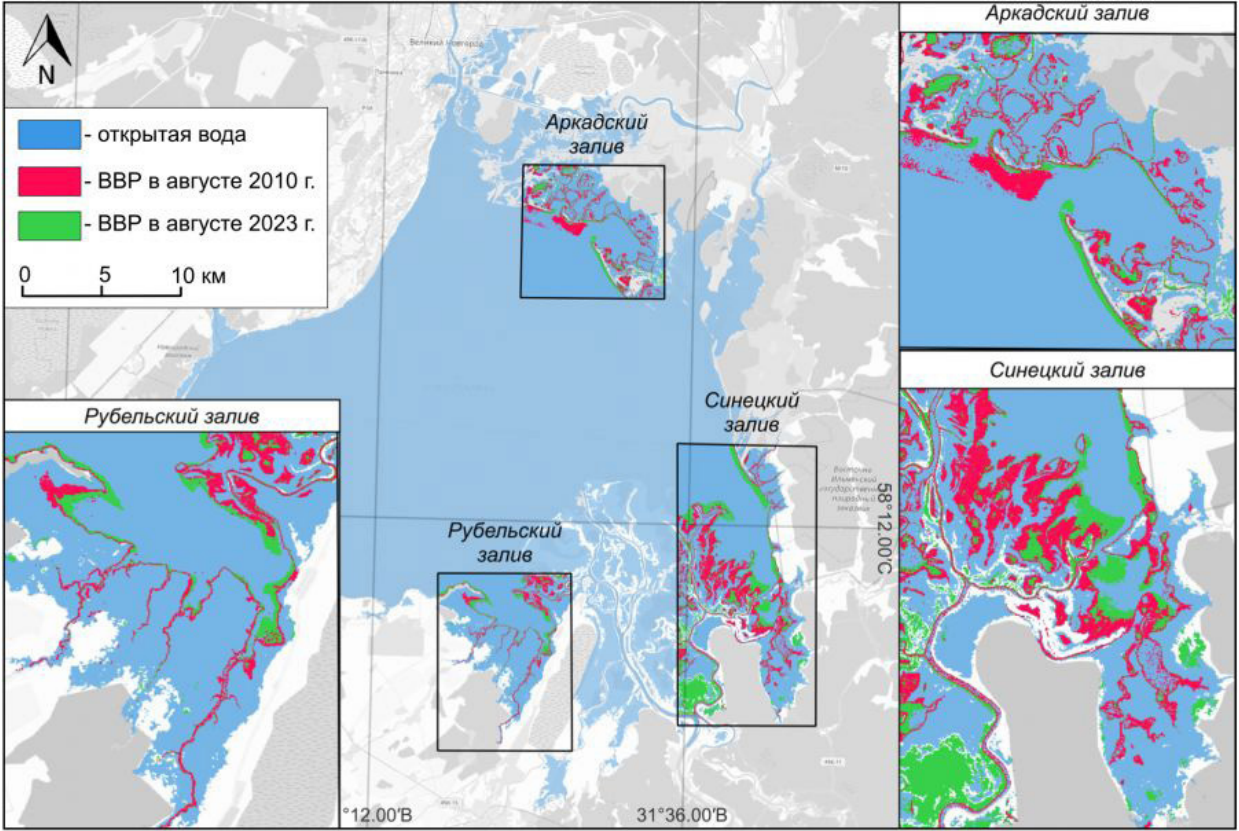


Рис. 6. Динамика зарастания крупных заливов оз. Ильмень в августе 2010 и 2023 гг.

Fig. 6. Dynamics of overgrowth of large bays of Lake Ilmen in August 2010 and 2023

уровнем воды и площадью зарастания позволяет более эффективно управлять экосистемой озера и предотвращать негативные последствия зарастания. Для многих мелководных озер Северо-Запада России степень развития ВВР прямо определяется сезонной изменчивостью гидрологического режима, а пространственные характеристики этой зоны позволяют оценивать условия для нереста ряда фитофильных рыб (Филоненко, Комарова, 2015; Kovaleva, Sharov, 2021).

Расчеты коэффициентов корреляции Пир-

сона ($R = 0.44$; $p > 0.05$) и ранговой корреляции Спирмена ($R = 0.4$; $p > 0.05$) между площадью водного зеркала, которая обуславливает границы распространения, и площадью зарастания озера ВВР, несмотря на положительные тенденции, не выявили статистически достоверных связей.

Попытка смоделировать зависимость площади зарастания озера ВВР от площади водного зеркала при помощи методов линейной регрессии не выявила серьезной зависимости ($R^2 = 0.19$; $p > 0.05$) (рис. 7).

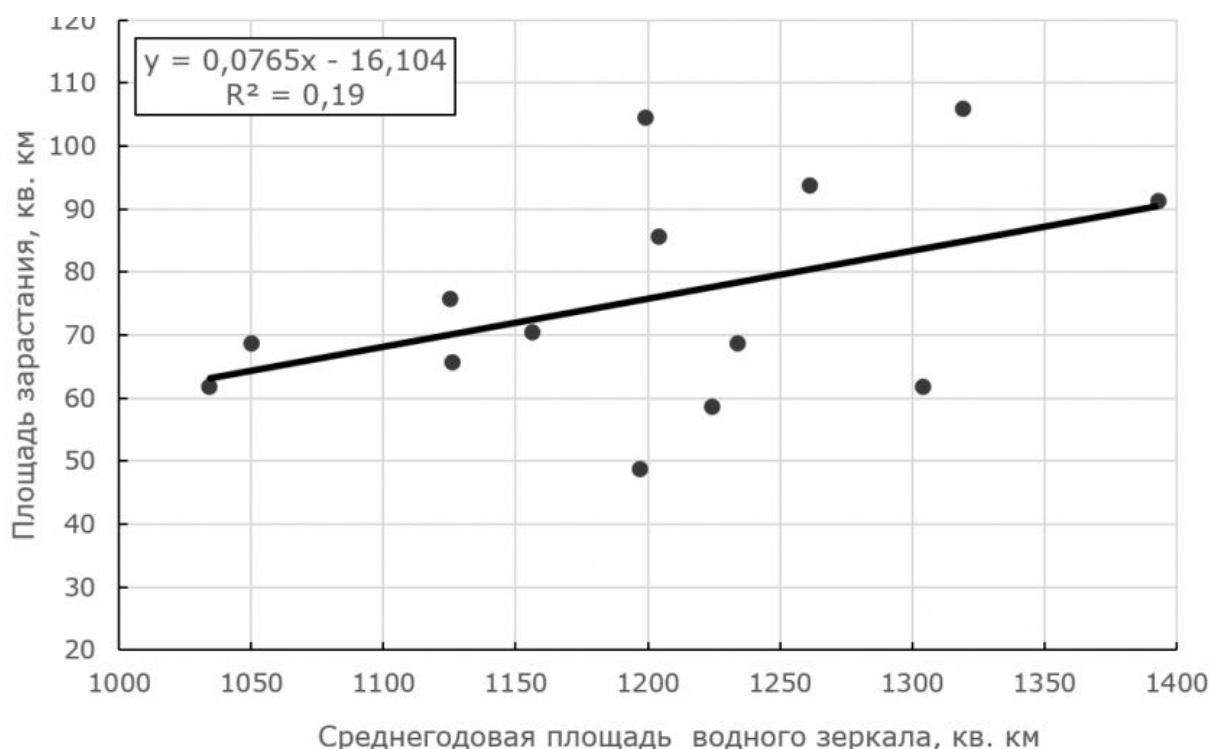


Рис. 7. Зависимость площади зарастания ВВР от среднегодовой площади водного зеркала оз. Ильмень по итогам линейного регрессионного анализа

Fig. 7. Dependence of the overgrowth area of the aero-aquatic vegetation (AAV) on the average annual area of the water mirror of Lake Ilmen according to the results of linear regression analysis

Все это свидетельствует о достаточно слабой прямой зависимости площади зарастания оз. Ильмень в целом и рассмотренных в работе заливов от уровня воды или площади водного зеркала озера, что нехарактерно для других крупных пресноводных водоемов, поскольку в годы с низким уровнем воды увеличивается площадь мелководной литоральной зоны, которая интенсивно зарастает полупогруженными макрофитами (Михайлова, Михалап, 2021).

Вместе с тем отсутствие очевидной связи степени зарастания с уровнем воды и площадью водного зеркала можно объяснить особенностями рельефа озерной котловины, а именно мелководностью и пологим

профилем его береговой зоны. По данным М. А. Науменко с соавторами, уклоны котловины дна озера крайне малы ($<0.025^\circ$), что делает его дно практически плоским (Науменко и др., 2015). По этой причине его центральный плес не способен к аккумуляции значительных объемов воды. Данные особенности позволяют озеру в течение года изменять площадь водного зеркала почти на 1000 квадратных километров, а наличие большого количества заболоченных островов и аванделът, выносящих большое количество отложений, в т. ч. богатых азотом и фосфором, создает благоприятные условия для развития ВВР.

Глубины в рассмотренных нами Аркадском, Рубельском и Синецком заливах редко превышает 1–2-метровую отметку, а именно на такой глубине создаются оптимальные условия для развития ВВР, в частности камыша озерного, который является доминирующим видом воздушно-водных растений оз. Ильмень. При низком уровне воды в озере создаются более благоприятные условия для роста ВВР в «центр» акватории заливов, в то время как при высоком уровне воды в результате подтопления пологих берегов и заболоченных островов также создаются благоприятные условия для зарастания, но уже в направлении периферии акватории.

Таким образом, вероятнее всего, в динамике процессов зарастания оз. Ильмень существует определенный диапазон перехода к разным сценариям процесса зарастания, который, по нашим наблюдениям, соответствует уровню воды в диапазоне 2.5–3.5 метра или площади водного зеркала от 900 до 1000 квадратных километров.

При этом следует учесть, что даже при одном и том же уровне воды и площади водного зеркала разные участки озера, в силу ветровой экспозиции, седиментации осадков, глубины и скорости течения впадающих в озеро рек и других факторов, могут быть в разной степени пригодны для зарастания ВВР.

Заключение

Полученные с помощью спутниковых снимков результаты за период с июня по август с 2009 по 2023 г., выявили флуктуирующий характер зарастания ВВР оз. Ильмень с выраженной положительной тенденцией. Отмечено, что средняя степень зарастания Аркадского и Рубельского заливов озера при максимальном уровне воды за исследуемый период составляет менее 1 % (0.76 % и 0.56 % соответственно), что классифицирует данные участки как не заросшие или почти не заросшие. Площадь зарослей в Синецком заливе превышает 1 % (2.51 %) от площади

акватории озера, что характеризует его как слабо заросший.

Наибольшая общая площадь развития ВВР на озере была отмечена в июле 2018 г., июне 2021 г. и августе 2023 г., когда она несколько превышала 60 км². В Аркадском и Синецком заливах максимальные площади зарастания (15.75 и 49.11 км²) наблюдались в июле 2018 г. и августе 2023 г. соответственно. В Рубельском заливе максимальная площадь, покрытая ВВР, отмечена в июне 2021 г. и составила 13.13 км², или 0.97 %, за исследуемый период. Минимальная общая площадь зарастания ВВР крупных заливов наблюдалась в июне 2011 г., что было связано с высоким уровнем воды (5.39 м).

Нам не удалось выявить прямой зависимости площади зарастания оз. Ильмень и некоторых его заливов от уровня воды и площади водного зеркала озера, однако сложная динамика процессов зарастания водоема обусловлена рельефными особенностями озерной котловины и прилегающей к ней территории, которые обуславливают разнонаправленность процессов зарастания в годы с высоким и низким уровнями воды.

Использование спутниковых снимков позволяет проследить за многолетней динамикой зарастания ВВР крупных мелководных заливов оз. Ильмень. Определения площади и степени зарастания с помощью классификации на основе рассчитанного индекса NDVI могут быть использованы при проведении аналогичных исследований внутренних водоемов, а также в гидробиологических исследованиях.

Таким образом, проведенный анализ подтверждает, что оз. Ильмень как экосистема является неоднородной и состоит из плесов с отличающимися комплексами экологических факторов. Реакция воздушно-водных макрофитов в значительной степени зависит от ландшафтно-гидрологических особенностей каждого плеса, что и выражается в неоднородности идущих в водоеме процессов зарастания.

Библиография

- Базарова Б. Б., Куклин А. П. Динамика биомассы и площади зарастания водной растительности озера Кенон (Забайкальский край) в условиях снижения уровня воды // Принципы экологии. 2023. № 2. С. 30–41. DOI: 10.15393/j1.art.2023.13724
- Бондаренко Л. Г., Кульба С. Н., Петрашов В. И., Смирнов С. С., Матвеева Е. И., Рудакова Н. А. Оценка зарастания водной растительностью Челбасской группы азовских лиманов // Водные биоресурсы и среда обитания. 2021. Т. 4, № 4. С. 14–26. DOI: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14
- Власов Б. П., Грищенко Н. Д., Сивенков А. Ю., Суховило Н. Ю., Колбун Д. А. Оценка современного состояния и динамики зарастания озер Национального парка «Нарочанский» с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Acta Geographica Silesiana.

2019. Т. 13, № 4 (36). С. 39–55.
- Громов С. А., Кудряшов Н. А. Оценка зарастания водоемов в условиях антропогенной нагрузки с применением спутниковых данных // Экология и промышленность России. 2022. № 10. С. 28–34.
- Кочеткова А. И., Брызгалина Е. С., Филиппов О. В., Баранова М. С. Динамика зарастания Волгоградского водохранилища (1972–2018 гг.) // Принципы экологии. 2022. № 1. С. 68–73. DOI: 10.15393/j1.art.2022.10002
- Кутявина Т. И., Рутман В. В., Ашихмина Т. Я. Оценка динамики зарастания высшими водными растениями акватории эвтрофного водохранилища с использованием спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307
- Лукин А. А., Никитина Т. В., Лукина Ю. Н., Тыркин И. А. Состояние рыбной части сообщества озера Ильмень в условиях интенсивной промысловой нагрузки // Вопросы рыболовства. 2019. Т. 20, № 1. С. 23–32.
- Науменко М. А., Каретников С. Г., Гузиватый В. В., Крючков А. М., Поздняков Ш. Р. Озеро Ильмень: Определение морфометрических характеристик на основе цифровой модели // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. С. 467. DOI: 10.7868/S0321059615050120
- Панюкова Е. В., Тетерюк Б. Ю., Панюков А. А. Характеристика и продуктивность сообществ гидрофитов малых водохранилищ Европейского Северо-Востока России // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2022. Т. 7, № 1. С. 22–32. DOI: 10.21685/2500-0578-2022-1-3
- Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБИНТ, 2001. 214 с.
- Поддубный С. А., Чемерис Е. В., Бобров А. А. Влияние режима уровня воды на зарастание мелководий Рыбинского водохранилища (обзор) // Биология внутренних вод. 2018а. № 4. С. 38–46. DOI: 10.1134/S0320965218030142
- Поддубный С. Г., Чемерис Е. В., Бобров Д. А. Гидрологические факторы формирования растительности озера Ильмень // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2018б. Т. 63, № 4. С. 377–390.
- Поддубный С. А., Чемерис Е. В., Кутузов А. В., Цветков А. И., Бобров А. А. Динамика высшей водной растительности защищенного мелководья в связи с уровнем воды в Волжском плесе Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2022. № 2. С. 136–146. DOI: 10.31857/S0320965222020085
- Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 198 с.
- Семенов А. А., Иванова Л. П. Геоинформационное картографирование зарастания прибрежной зоны озер Архангельской области // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Науки о Земле. 2023. № 1. С. 23–32.
- Столбунов И. А. Особенности распределения молоди рыб в прибрежной зоне Рыбинского водохранилища // РАН. Биология внутренних вод. 2007. № 4. С. 55–61.
- Филоненко И. В., Комарова А. С. Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже // Принципы экологии. 2015. № 4 (16). С. 63–72.
- Chebud Y., Ghinwa M. Naja, Rosanna G. Rivero, Assefa M. Melesse. Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network // Water Air Soil Pollut. 2012. Vol. 223. P. 4875–4887. DOI: 10.1007/s11270-012-1243-0
- Jaskula J., Sojka M. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs // Polish Journal of Environmental Studies. 2019. Vol. 28, No 6. P. 4199–4211. DOI: 10.15244/pjoes/98994
- Keddy P. A. Wetland Ecology: Principles and Conservation. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 497 p.
- Kovaleva N. O., Sharov A. I. Dynamics of Aquatic Plant Communities in lakes of the North-West of Russia under climate change // Limnology and Freshwater Biology. 2021. No 4. P. 852–854.
- Lv W., Liu Y., Zhang J. A framework for mapping aquatic vegetation in shallow lakes using Sentinel-2 time series and random forest classification // Ecological Indicators. 2020. Vol. 117. P. 106687.
- McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, No 7. P. 1425–1432.
- Sharov A. I. Dynamics of aquatic plant communities in lakes of the North-West of Russia under climate change // Limnology and Freshwater Biology. 2019. No 4. P. 852–854. DOI: 10.31951/2658-3518-2019-A-4-852
- Shen L., Li J., Chen X. Monitoring aquatic vegetation dynamics using multi-temporal Sentinel-2 imagery: A Case Study in Lake Taihu, China // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No 5. P. 1103.
- Søndergaard M., Lauridsen T., Johansson L. Submerged macrophytes as indicators of lake ecological status // Ecological Indicators. 2017. Vol. 82. P. 1–8.
- Tan X., Zhang Y., Liu C. Remote sensing of aquatic vegetation dynamics in shallow lakes // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 247. P. 111–941.

- Wang X., Liu X., Yang X. Evaluating vegetation succession in shallow lakes using multi-sensor remote sensing data // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 782. P. 146876. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146876
- Zhang Y., Wang Y., Li X. Water level fluctuations and aquatic vegetation succession in temperate lakes // *Hydrobiologia*. 2021. Vol. 848. P. 1053–1067.
- Zhou Y., Fang J., Wang W. Vegetation–hydrology interaction in floodplain lakes: insights from 20-year satellite observations // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 27, No 4. P. 1223–1241. DOI: 10.5194/hess-27-1223-2023

ESTIMATION OF THE AREA OVERGROWN WITH HELOPHYTES IN LARGE BAYS OF LAKE ILMEN USING EARTH REMOTE SENSING DATA

SHTEFURYAK
Alina Victorovna

Pskov Branch of the State Scientific Center of the RF VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution (PskovNIRO), 180007 Russia Pskov region Pskov Maxim Gorky st., 13, a.shtefuryak@pskov.vniro.ru

MIKHALAP
Sergey Gennadyevich

Pskov Branch of the State scientific Center of the RF VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution (PskovNIRO), 180007 Russia Pskov region Pskov Maxim Gorky st., 13, sgmikhlap@pskov.vniro.ru

VASILYEVA
Elena Sergeevna

Novgorod Branch of the State Scientific Center of the Russian Federation VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution (NovgorodVNIRO), 38 Oktyabrskaya str., sq. 2, Veliky Novgorod, 173002, Novgorod region, vasileva@novgorod.vniro.ru

Key words:

overgrowth
water levels
aero-aquatic vegetation
remote sensing of the Earth
Lake Ilmen
NDWI
NDVI
geographical information systems
Landsat

Summary:

The article considers the processes of overgrowth of Lake Ilmen with airborne aquatic vegetation – helophytes. This vegetation is one of the key components of the aquatic ecosystem, and largely determines its trophic state and bioproductivity. The study was performed based on the decoding of multispectral satellite images using the normalized vegetation index (NDVI). This allowed us to obtain objective information about the distribution of plant communities in the water area. The satellite images of Landsat satellites that passed the standard stages of radiometric and atmospheric correction were used as a source of information. Special attention was paid to three large bays of the lake – Arkadsky, Sinetsky and Rubelsky, which are most sensitive to fluctuations in water level. The constructed map charts of the spatial distribution of aerial and aquatic vegetation made it possible to identify patterns of their distribution in temporal and spatial aspects. It was established that under conditions of decreasing water levels, a steady tendency to increase the area of overgrowth is recorded, whereas at maximum levels, the degree of vegetation coverage does not exceed 2.38–4.86 %. The largest areas of overgrowth, exceeding 60 km², were recorded in July 2018, June 2021 and August 2023. For individual bays, peak values of overgrowth were determined. A statistically significant inverse relationship was also found between the overgrown area and the water level approximated by a polynomial curve.

Received on: 27 June 2025

Published on: 10 December 2025

References

- Bazarova B. B. Kuklin A. P. Dynamics of biomass and overgrowth area of aquatic vegetation of Kenon Lake (Trans-Baikal Territory) under conditions of decreasing water level, *Principy ekologii*. 2023. No. 2. P. 30–41. DOI: 10.15393/j1.art.2023.13724
- Bondarenko L. G. Kul'ba S. N. Petrashov V. I. Smirnov S. S. Matveeva E. I. Rudakova N. A. Assessment of overgrowth by aquatic vegetation of the Chelbassky group of the Azov estuaries, *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya*. 2021. T. 4, No. 4. P. 14–26. DOI: 10.47921/2619-1024_2021_4_4_14
- Chebud Y., Ghinwa M. Naja, Rosanna G. Rivero, Assefa M. Melesse. Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network, *Water Air Soil Pollut.* 2012. Vol. 223. P. 4875–4887. DOI: 10.1007/s11270-012-1243-0
- Filonenko I. V. Komarova A. S. Long-term dynamics of the area overgrown with coastal and aquatic vegetation of Lke Vozhe, *Principy ekologii*. 2015. No. 4 (16). P. 63–72.
- Gromov S. A. Kudryashov N. A. Assessment of reservoir overgrowth under anthropogenic stress using

- satellite data, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2022. No. 10. P. 28–34.
- Jaskula J., Sojka M. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs, *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019. Vol. 28, No 6. P. 4199–4211. DOI: 10.15244/pjoes/98994
- Keddy P. A. *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 497 p.
- Kochetkova A. I. Bryzgalina E. S. Filippov O. V. Baranova M. S. Dynamics of overgrowth of the Volgograd reservoir (1972–2018), *Principy ekologii*. 2022. No. 1. P. 68–73. DOI: 10.15393/j1.art.2022.10002
- Kovaleva N. O., Sharov A. I. Dynamics of Aquatic Plant Communities in lakes of the North-West of Russia under climate change, *Limnology and Freshwater Biology*. 2021. No 4. P. 852–854.
- Kutyavina T. I. Rutman V. V. Ashihmina T. Ya. Assessment of the dynamics of overgrowth by higher aquatic plants in the water area of a eutrophic reservoir using satellite images, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2024. T. 21, No. 1. P. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307
- Lukin A. A. Nikitina T. V. Lukina Yu. N. Tyrkin I. A. The state of the fishing part of the Lake Ilmen community under conditions of intense fishing load, *Voprosy rybolovstva*. 2019. T. 20, No. 1. P. 23–32.
- Lv W., Liu Y., Zhang J. A framework for mapping aquatic vegetation in shallow lakes using Sentinel-2 time series and random forest classification, *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 117. P. 106687.
- McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, No 7. P. 1425–1432.
- Naumenko M. A. Karetnikov S. G. Guzivatyy V. V. Kryuchkov A. M. Pozdnyakov Sh. R. Lake Ilmen: Determination of morphometric characteristics based on a digital model, *Vodnye resursy*. 2015. T. 42, No. 5. P. 467. DOI: 10.7868/S0321059615050120
- Panyukova E. V. Teteryuk B. Yu. Panyukov A. A. Characteristics and productivity of hydrophyte communities in small reservoirs of the European Northeast of Russia, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022. T. 7, No. 1. P. 22–32. DOI: 10.21685/2500-0578-2022-1-3
- Papchenkov V. G. *Vegetation cover of reservoirs and watercourses of the Middle Volga region*. Yaroslavl': CMP MUBiNT, 2001. 214 p.
- Poddubnyy S. A. Chemeris E. V. Bobrov A. A. The influence of the water level regime on the overgrowth of the shallow waters of the Rybinsk reservoir (review), *Biologiya vnutrennih vod*. 2018a. No. 4. P. 38–46. DOI: 10.1134/S0320965218030142
- Poddubnyy S. A. Chemeris E. V. Kutuzov A. V. Cvetkov A. I. Bobrov A. A. Dynamics of higher aquatic vegetation in protected shallow waters in connection with the water level in the Volga reach of the Rybinsk reservoir, *Biologiya vnutrennih vod*. 2022. No. 2. P. 136–146. DOI: 10.31857/S0320965222020085
- Poddubnyy S. G. Chemeris E. V. Bobrov D. A. Hydrological factors of vegetation formation in Lake Ilmen, *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*. 2018b. T. 63, No. 4. P. 377–390.
- Raspopov I. M. *Higher aquatic vegetation of the large lakes of the North-West of the USSR*. L.: Nauka, 1985. 198 p.
- Søndergaard M., Lauridsen T., Johansson L. Submerged macrophytes as indicators of lake ecological status, *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 82. P. 1–8.
- Semenov A. A. Ivanova L. P. Geoinformation mapping of the overgrowth of the coastal zone of the lakes of the Arkhangelsk region, *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*. 2023. No. 1. P. 23–32.
- Sharov A. I. Dynamics of aquatic plant communities in lakes of the North-West of Russia under climate change, *Limnology and Freshwater Biology*. 2019. No 4. P. 852–854. DOI: 10.31951/2658-3518-2019-A-4-852
- Shen L., Li J., Chen X. Monitoring aquatic vegetation dynamics using multi-temporal Sentinel-2 imagery: A Case Study in Lake Taihu, China, *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No 5. P. 1103.
- Stolbunov I. A. Peculiarities of distribution of juvenile fish in the coastal zone of the Rybinsk reservoir, *RAN. Biologiya vnutrennih vod*. 2007. No. 4. P. 55–61.
- Tan X., Zhang Y., Liu C. Remote sensing of aquatic vegetation dynamics in shallow lakes, *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 247. P. 111–941.
- Vlasov B. P. Grischenkova N. D. Sivenkov A. Yu. Suhovilo N. Yu. Kolbun D. A. Assessment of the current state and dynamics of lake overgrowth in Narochansky National Park using Earth remote sensing data, *Acta Geographica Silesiana*. 2019. T. 13, No. 4 (36). P. 39–55.
- Wang X., Liu X., Yang X. Evaluating vegetation succession in shallow lakes using multi-sensor remote sensing data, *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 782. P. 146876. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146876
- Zhang Y., Wang Y., Li X. Water level fluctuations and aquatic vegetation succession in temperate lakes, *Hydrobiologia*. 2021. Vol. 848. P. 1053–1067.
- Zhou Y., Fang J., Wang W. Vegetation–hydrology interaction in floodplain lakes: insights from 20-year satellite observations, *Hydrology and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 27, No 4. P. 1223–1241. DOI: 10.5194/hess-27-1223-2023



УДК 57.087:528.854

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ KERAS ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ МЕСТООБИТА- НИЙ ЖИВОТНЫХ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

МАРФИЦЫНА
Наталья Александровна

*ФГБОУ ВО Петрозаводский государственный университет,
185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Лени-
на, 33, marfitsyna.nata@mail.ru*

КОРОСОВ
Андрей Викторович

*доктор биологических наук, Петрозаводский государственный
университет, Петрозаводск, пр. Ленина, 33,
korosov@psu.karelia.ru*

Ключевые слова:

местообитания
ДЗ
ГИС
нейронная сеть
R
Keras

Аннотация: В работе рассматривается применение алгоритмов глубокого обучения из библиотеки Keras для решения задачи классификации вырубок разного возраста с помощью дистанционного зондирования в среде R. Подробно рассмотрена достаточно сложная процедура установки библиотек Keras на компьютер. Описаны этапы нейросетевого моделирования и их вариации при использовании пакета R neuralnet и среды Keras. Выполнено дешифрирование космических снимков в окрестностях д. Гомсельга (Карелия) с использованием данных полевой съемки. Типичный алгоритм дешифрирования (классификация с обучением) был дополнен совместным многомерным анализом яркостных характеристик снимка и полевыми геоботаническими описаниями. В результате были сформированы четыре набора эталонных сигнатур, соответствующие тому или иному состоянию зарастающих вырубок. Нейросеть (многослойный перцептрон) настраивалась на распознавании этих типов насаждений и затем выполнила классификацию остальных пикселей снимка для всей изучаемой территории. На основе анализа геоботанических описаний и спутниковых данных была создана грид-карта с выделением четырех основных типов местообитаний: свежие вырубки, зарастающие вырубки, молодняки, лиственный лес. Обработка данных с помощью алгоритмов Keras существенно ускоряет анализ, позволяет увеличивать число слоев и нейронов и детализировать грид. В частности, в отличие от алгоритмов эталонного дешифрирования, предлагаемый подход позволил выявить неоднородность растительности в пределах одновозрастных вырубок. Результаты работы используются для выявления разнородных местообитаний животных и влияния экологических факторов на их пространственное распределение и численность.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: И. Р. Идрисов
А. Н. Шихов

Получена: 16 октября 2025 года

Введение

Биотопическая гетерогенность является ключевым фактором, определяющим распределение и динамику численности наземных позвоночных животных. В таежных эко-

Подписана к печати: 27 декабря 2025 года

системах Карелии антропогенные нарушения, такие как сплошные рубки, инициируют сукцессионные процессы, формирующие мозаику вторичных лесов с уникальными микроклиматическими и кормовыми усло-

виями. Эти изменения оказывают прямое воздействие на структуру популяций мелких млекопитающих и их паразитических сообществ, что подтверждено многолетними исследованиями (Коросов и др., 2003; Иешко и др., 2020). Ранние наши работы были направлены на описание трансформации местообитаний с применением методов дистанционного зондирования (ДЗ) и геоинформационного анализа (Бугмырин и др., 2006; Гусева и др., 2014). Современные технологии, а именно нейросетевое моделирование, позволяют по-новому подойти к этому процессу и построить карту различающихся биотопов, отражающих роль разнообразных экологических факторов в формировании уровня и динамики численности изучаемых групп животных. Однако использование космических снимков существенно увеличивает объем входящих данных, обработка которых в среде интерпретатора R затруднена и требует много времени. Эту проблему решает библиотека глубокого обучения Keras (Шолле, 2022), позволяющая компилировать скрипты. Кроме того, в среде Keras предусмотрено использование других видов нейронных сетей, кроме персептрона.

Цель работы состоит в демонстрации построения нейросетевой модели с использованием пакета Keras на примере решения экологической задачи – классификации разновозрастных молодых вторичных насаждений на месте рубок дистанционными методами на основе натурных геоботанических описаний.

Статья носит методический характер, и любой читатель может воспроизвести расчеты с помощью представленных скриптов и наших данных, которые доступны по гиперссылкам.

Материалы

Полевые данные получены в 2023 г. в окрестностях д. Малая Гомсельга (Кондопожский район, Карелия, N 62.067, E 33.9587). Проводились геоботанические описания по упрощенной схеме только во вторичных лесах на вырубках в возрасте 2–30 лет. Фиксировались 16 характеристик: сомкнутость крон (trans, доля белых пикселей бинарных снимков при съемке вертикально вверх с точки учета, %), полнота древостоя с помощью полнотомера Биттерлиха (с – сосна, е – ель, б – береза, ос – осина, ол – ольха, и – ива, г – рябина, шт.), число поваленных деревьев в окрестностях 20 м от точки (fell, шт.), проективное покрытие в окрестностях 5 м от точки

учета (Mxi – мхи, Lish – лишайники, Travi – травы, kust – кустарники, Pap – папоротники, Mal – малина, %). Получено 120 описаний на 40 площадках; все точки имеют картографическую привязку. Описания на отдельной площадке (в одном биотопе) выполнялись в трех точках, отстоящих друг от друга на 10 м. В результате была получена таблица размером 16 полей и 120 строк. Далее для каждой площадки три описания обобщались: для каждого показателя была рассчитана медиана и стандартное отклонение, всего 32 показателя для отдельной площадки. В заключение для каждого показателя были высчитаны нормированные отклонения, отношение разности между i -м показателем и средней к стандартному отклонению, $(x^*Mx)/Sx$, что приводит разную размерность переменных к безразмерному диапазону 0 ± 3 и сохраняет уровень коррелированности между переменными. Так получили рабочую матрицу, состоящую из 32 полей (характеристик биотопа) и 40 строк (площадки в биотопах).

Использованы космические снимки за март и июль 2023 г., из которых вырезали фрагменты по экстену: 546015, 6877965, 553785, 6887535 (WGS 84 / UTM zone 36N). Взяты 7 каналов из летнего снимка: [1_sum23.tif](#), [2_sum23.tif](#), [3_sum23.tif](#), [4_sum23.tif](#), [5_sum23.tif](#), [6_sum23.tif](#), [7_sum23.tif](#) и 2 канала из зимнего снимка: [1_win23.tif](#), [2_win23.tif](#). Разрешение снимков составило 30 м на пиксель. Для каждого канала проводили предобработку – нормализацию значений в пределах от 0 до 255. Полный набор данных по яркости всех пикселей для 9 каналов спутниковых снимков в пределах изученного экстенга поместили в массив [fuldata](#).

Далее были подготовлены массивы с яркостными характеристиками для выполнения анализа. Используя координаты точек описания, определили пиксели, покрывающие участки описания (120 участков для 40 площадок). Сформирована таблица [bancl.csv](#) размером 9 полей и 120 строк для обучения нейронных сетей. Яркостные характеристики этих пикселей по всем каналам снимков использовали для составления обучающих и тестовых массивов (тензоров). Данные были случайным образом разбиты на два массива (два тензора). Обучающий тензор, **train_data**, содержал 70 % данных (28 площадок). Тестовый тензор, **test_data**, включал оставшиеся 30 % (12 площадок).

Подготовку массивов данных ({terra}), кластерный анализ (hclust {stats}) и нейросетевое моделирование (neuralnet {neuralnet},

compile{keras}) выполнили в среде R (The R Project..., 2023).

Традиционные методы исследований

Традиционная схема дешифрирования с обучением использует данные полевых описаний и космические снимки (Геоинформатика, 2005). По имеющимся натурным данным намечаются эталонные участки с заведомо разными типами природных объектов (для которых типология уже известна). Тем самым пиксели разных областей снимка обретают определенное качество, а именно тип природного объекта. Далее выполняется тот или иной вариант классификации пикселей (с помощью дискриминантного, кластерного или нейросетевого анализа). Вначале отыскивается уравнение, которое связывает значения яркости пикселей (сигнатуры) с разными типами указанных природных объектов (этап обучения). Затем это уравнение используется для экстраполяции (прогноза) заданных классов объекта на изучаемую область космического снимка.

Иногда эталонные участки назначаются с использованием карты лесоустроительных выделов (Ильчук, Цай, 2010; Кузменко и др., 2015). В одних случаях она служит для построения прямоугольных участков в рамках выдела, которые применяются для считывания яркостных характеристик со спутниковых снимков, в других случаях в качестве маски используются некоторые выделы целиком в своих границах. Для автоматизации этого процесса в один блок могут объединяться данные векторной карты лесоустройства и яркостные характеристики спутниковых снимков, что позволяет вычислить статистические характеристики для каждого выдела на основе множества пикселей растровых слоев спутникового изображения, попадающих в границы выдела (Данилова и др., 2017).

В нашем случае типология объектов была изначально непонятна, и мы применили другой алгоритм для построения схемы классификации типов растительного покрова. Сначала в полевых условиях выполнили серию геоботанических описаний. Далее в одну матрицу объединили натурные полевые данные и яркостные характеристики пикселей снимка, покрывающих пробные участки. Затем выполняли классификацию (кластеризацию) объектов по объединенным данным, получив небольшое число классов, тем самым выявив типологию изучаемых объектов.

Процедура выделения типов биотопов (кластеров clu) подробно изложена в работе по дешифрированию местообитаний животных (Коросов, Марфицына, 2025). Она включает совместный кластерный анализ массива данных по 41 показателю (9 спектральных каналов и 32 геоботанические характеристики) для 40 площадок. Сначала с помощью алгоритма *k*-средних и «метода локтя» выявляется минимальное число «естественных» кластеров (Шитиков, Мاستицкий, 2017), затем процедура кластеризации методом Варда делит все множество площадок на принятое число кластеров. Результатом стали 4 интерпретированных кластера, соответствующих стадиям сукцессии: свежие вырубki (кластер 1 для 4 площадок), лиственный лес (кластер 2 для 9 площадок), молодняки (кластер 3 для 7 площадок), зарастающие вырубki (кластер 4 для 16 площадок). Кластерные метки (clu) площадок далее используются как целевые входные переменные для обучения нейронной сети на основе спектральных характеристик (9 каналов).

Поскольку каждому типу биотопа соответствуют определенные значения яркостей пикселей, выполнили обучение сети для прогноза типа объекта по растровым данным. Затем выполнили экстраполяцию полученных зависимостей на весь снимок. В результате получили цветной грид, где отдельные одноцветные пятна соответствуют тому или иному типу природных объектов (биотопов). Используя нейронную сеть, для каждого пикселя геоизображения изучаемой территории рассчитали свой номер кластера. Пятна, сформированные пикселями одного цвета, рассматривали как отдельные типы биотопов.

Описанная процедура в какой-то мере справлялась с поставленными задачами, если объем баз данных, площадь изучаемых территорий, размеры космических снимков и число нейронов сети относительно невелики. Для более точного прогноза нами принята большая серия попыток существенно увеличить число слоев и нейронов в персептроне (пакет *neuralnet*). При этом резко увеличивается время обучения сети и число сбоев в расчетах, причем без существенного роста качества полученной модели, которая зачастую оказывается переученной. Для таких задач (тем более с *bigdata*) средств пакетов *neuralnet* недостаточно и требуются более мощные библиотеки, такие как Keras.

Оригинальные методы исследований

Рассмотрим решение поставленной выше задачи с помощью библиотеки Keras. Установка Keras на компьютере требует кропотливой работы. В литературе и в интернете можно найти ряд разрозненных описаний, как это сделать (Шолле, 2022; PythonRu, 2021; GeeksforGeeks, 2021), ниже рассмотрен наш опыт по установке и использованию Keras. Библиотеку следует устанавливать на компьютеры не старше 8 лет, выпущенные после 2017 г. На старых устройствах могут возникнуть ошибки, связанные с невозможностью виртуальной среды найти совместимую версию TensorFlow для текущей версии Python. В таких случаях необходимо скачать дополнительные пакеты, такие как Rtools, которые требуются для сборки пакетов R. Также могут возникнуть проблемы с загрузкой динамической библиотеки TensorFlow. Библиотека имеет определенные системные требования, включая наличие Microsoft C++ Redistributable for Visual Studio 2015, 2017 и 2019. Важно убедиться в совместимости версий Python и TensorFlow, чтобы избежать проблем с установкой и работой системы.

Установка Keras

Библиотека Keras работает в относительно обособленной виртуальной среде, созданной в компьютере с помощью дополнительных программ. Мы использовали следующие программы: Python (на нем напи-

сан Keras), Rstudio (оболочка для работы со скриптами R), Tensorflow (библиотека программ), Numpy (библиотека программ). Во время установки этих программ необходимо пользоваться командной строкой Windows. Программы устанавливаются по определенному алгоритму в искомой виртуальной среде. Рекомендуется выполнять их загрузку от имени администратора.

Первый этап. Подготовка системы

Скачиваем загрузочные файлы и производим одновременно установку. Скачивание файлов производится с открытых официальных серверов, поскольку все программы условно бесплатны. Программа R должна быть установлена заранее.

Загружаем инсталлятор Python 3.12.4 с сайта <https://www.python.org/downloads/>. Важно: на сегодняшний день остальные библиотеки корректно устанавливаются только с версией Python не выше 3.12; современным читателям необходимо скачать не последнюю версию, а именно Python 3.12. Запускаем инсталлятор. В открывшемся окне установщика Install Python внизу необходимо отметить обе опции «Use admin privileges when installing py.exe» и «Add python.exe to PATH». Это позволит добавить путь к установленному Python в системную переменную PATH и завершить процесс установки программы. Нажимаем кнопку Install Now. В окне Setup was successful нажимаем кнопку Close.



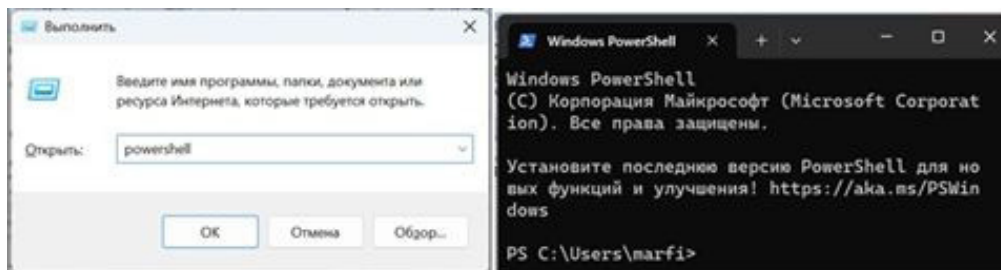
Загружаем инсталлятор Rstudio 2024.09.1 с сайта <https://posit.co/download/rstudio->

[desktop/](#) и запускаем установку (оба процесса занимают много времени).

Второй этап. Настройка виртуальной среды

Вызываем окно Выполнить, нажав соче-

тание клавиш **Win + R**, вводим с клавиатуры команду **powershell**, ОК. Появляется окно командной строки.



Проверяем успешность установки Python. Для этого в командной строке вводим команду **python --version**, ждем клавишу Enter.

Если Python установлен корректно, появится строка: Python 3.12.4 (с версией программы).



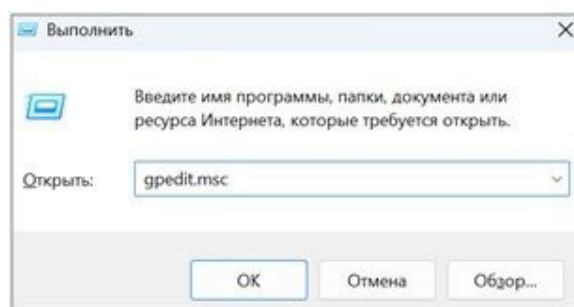
Проверяем наличие программы pip, которая устанавливается вместе с Python. В командной строке вводим команду **pip --version**, Enter. Должна появиться строка

с версией программы и путем до нее: pip 25.0.1 from C:\Python 312\Lib\site-packages\pip (python3.12).



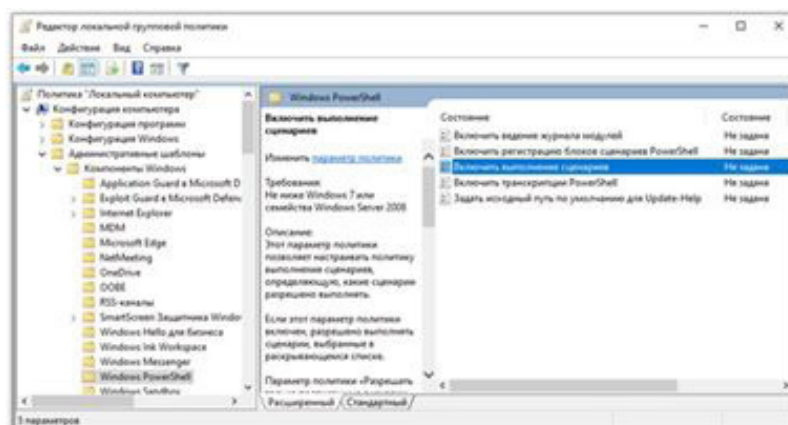
Даем разрешение на выполнение сценариев. Вновь вызываем окно Выполнить (Win

+ R) и вводим команду **gpedit.msc**, ОК.



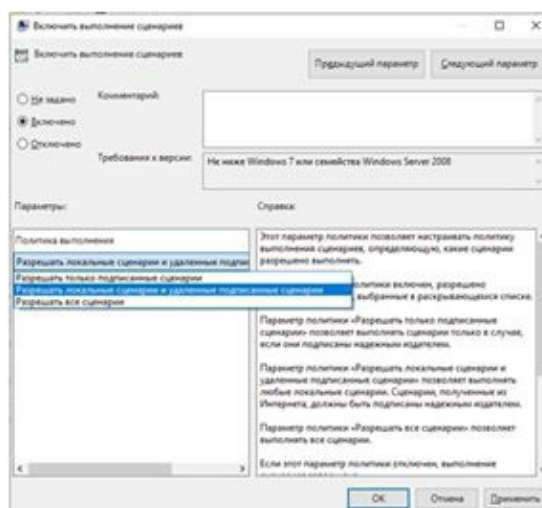
В появившемся окне Редактор локальной групповой политики необходимо *включить выполнение сценариев*. Для этого в левой части окна поочередно отрываем вкладки Конфигурация компьютера \ ADMINISTRA-

тивные шаблоны \ Компоненты Windows \ Windows PowerShell и в правой части окна дважды кликаем на пункте Включить выполнение сценариев.



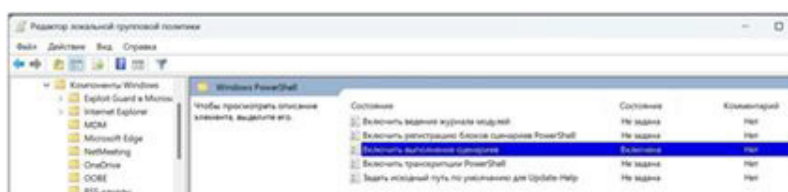
В появившемся окне Включить выполнение сценариев выбрать пункт Включено и, нажав на серую полосу в левой части окна,

выбрать Разрешать локальные сценарии и удаленные подписанные сценарии, OK.



В появившемся окне Редактор... состоящие работы «Включить выполнение сценариев» изменится на «Включено». Закрыва-

ем окно.



Третий этап. Создание виртуального окружения
Вновь вызываем командную строку (см.

выше: Win + R, powershell, OK). Вводим команду **pip install virtualenv**, Enter.



По выполнении должна появиться строка

```
Installing collected packages: distlib, platformdirs, filelock, virtualenv
Successfully installed distlib-0.3.9 filelock-3.18.0 platformdirs-4.3.7 virtualenv-20.30.0
```

В следующей строке ввести команду **python -m venv r-reticulate**, Enter.

```
PS C:\Users\marfi> python -m venv r-reticulate
```

И, наконец, активировать окружение командой **r-reticulate\Scripts\activate**, Enter. Успешная активация будет обозначаться зеленой надписью «r-reticulate».

```
PS C:\Users\marfi> r-reticulate\Scripts\activate
(r-reticulate) PS C:\Users\marfi> |
```

Четвертый этап. Установка библиотек для установки необходимых библиотек: **pip install tensorflow keras matplotlib pandas numpy**.
В командной строке ввести команды

```
(r-reticulate) PS C:\Users\marfi> pip install tensorflow
keras matplotlib pandas numpy
```

Начнется процесс инсталляции. По завершении процесса должна быть выведена соответствующая текстовая строка.

```
Successfully installed MarkupSafe-3.0.2 astunparse-1.6.3 certifi-2025.1.31 charset-normalizer-3.4.1 flatbuffers-25.2.1
gast-0.6.0 google-pasta-0.2.0 grpcio-1.71.0 idna-3.10 libclang-18.1.1 markdown-3.8 numpy-2.1.3 opt-einsum-3.4.0 prot
obuf-5.29.4 requests-2.32.3 setuptools-79.0.0 tensorboard-2.19.0 tensorboard-data-server-0.7.2 tensorflow-2.19.0 termc
olor-3.0.1 urllib3-2.4.0 werkzeug-3.1.3 wheel-0.45.1 wrapt-1.17.2
```

Чтобы проверить наличие установленных библиотек, используем команды **pip show tensorflow** и **pip list**.

```
PS C:\Users\marfi> pip list
Package Version
-----
absl-py 2.1.0
astunparse 1.6.3
certifi 2024.7.4
charset-normalizer 3.3.2
flatbuffers 24.3.25
gast 0.6.0
google-pasta 0.2.0
grpcio 1.65.1
h5py 3.11.0
idna 3.7
keras 3.4.1
```

```
PS C:\Users\marfi> pip show tensorflow
Name: tensorflow
Version: 2.17.0
Summary: TensorFlow is an open source machine learning framework for everyone.
Home-page: https://www.tensorflow.org/
Author: Google Inc.
Author-email: packages@tensorflow.org
License: Apache 2.0
Location: C:\Python 312\Lib\site-packages
Requires: tensorflow-intel
Required-by:
PS C:\Users\marfi>
```

Если все пройдет без ошибок, закроем окно Windows PowerShell.

Пятый этап. Построение виртуального окружения

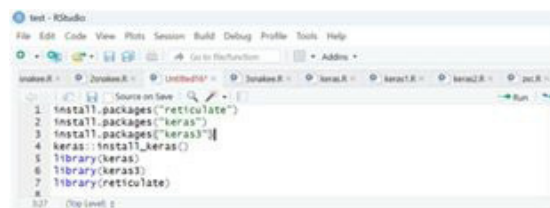
Запустим программу Rstudio, играющую роль оболочки для R, где создаются и выполняются скрипты. Для оптимизации работы периодически необходимо перезапускать сессию R (команда главного меню Session \ Restart R).

В открывшемся окне создадим скрипт командой File \ New File \ R-script.

Запишем серию команд, формирующих среду для работы:

```
packages("reticulate")
packages("keras")
packages("keras3")
keras::install.keras()
library(keras)
library(keras3)
library(reticulate)
```

Последовательно выполним команды, нажимая сочетание клавиш Ctrl + Enter.



В поле Console (консоль) результатом установки будут следующие строки:

```
> library(reticulate)
Предупреждение:
пакет 'reticulate' был собран под R версии 4.4.2
> library(keras)
Registered S3 methods overwritten by 'keras':
  method      from
as.data.frame.keras_training_history keras3
plot.keras_training_history      keras3
print.keras_training_history     keras3
r_to_py.R6CclassGenerator        keras3
Предупреждение:
пакет 'keras' был собран под R версии 4.4.2
> library(keras3)
Registered S3 methods overwritten by 'keras3':
  method      from
```

Добавляем новые команды к скрипту. Задаем путь к папке, где находится Python: **venv_path** `file.path(getwd(), "r-reticulate")`, **Ctrl + Enter**.

При выполнении команды в R консоль возвратит значение, которое отобразится в поле команд.



Записываем следующую команду, которая активирует виртуальную среду: **use_virtualenv(venv_path, required = TRUE)**, **Ctrl +**

Enter. Параметр «required = TRUE» позволяет выявить ошибку, если среда не будет успешно активирована.

```
2 use_virtualenv(venv_path, required = TRUE)
```

Последней командой проверяем, установлены ли необходимые библиотеки и связи: **py_config()**, **Ctrl + Enter**.

В консоли выводится список с указанием

информации об установленных программах и библиотеках. В случае успешной установки среды Keras все 9 строк должны быть заполнены текстом без указания ошибки.

```
> py_config()
python: C:/Users/marfi/Documents/.virtualenvs/r-tensorflow/Scripts/python.exe
libpython: C:/Python 312/python312.dll
pythonhome: C:/Users/marfi/Documents/.virtualenvs/r-tensorflow
version: 3.12.4 (tags/v3.12.4:8e8a4ba, Jun 6 2024, 19:30:16) [MSC v.1940 64 bit (AMD64)]
Architecture: 64bit
numpy: C:/Users/marfi/Documents/.virtualenvs/r-tensorflow/Lib/site-packages/numpy
numpy_version: 2.0.2
keras: C:/Users/marfi/DOCUHE-1/VIRTUA-1/R-TENS-1/Lib/site-packages/keras/_init_.p
NOTE: Python version was forced by import("keras")
```

Если к этому этапу установка прошла успешно, можно сразу перейти к этапу «Использование Keras».

Однако при построении виртуальной среды в RStudio могут возникнуть ошибки, связанные с отсутствием «установленных» библиотек. В этом случае рекомендуется создать новую виртуальную среду с нуля и повторить процесс установки библиотек. Если команда **py_config()** не предоставляет полную информацию об установленных библиотек, можно использовать следующий алгоритм. В новом скрипте прописываем команду автоматической установки самых необходимых библиотек и выполняем ее (**Ctrl + Enter**):

py_install(c("numpy", "keras"), env = venv_path)

py_config()

Если после выполнения **py_config()** в R отображается, что библиотеки не найдены, это может быть связано с использованием R другой интерпретации Python или несоответствием виртуальных путей. В этом случае необходимо явно указать свой путь, где находятся установленные библиотеки, добавив в новый скрипт команду:

use_python("C:/Windows/system32/r-reticulate/Scripts/python.exe", required = TRUE)

py_config()

и выполнить ее (**Ctrl + Enter**).

С помощью дополнительной команды **py_run_string("import numpy; import keras")** следует проверить наличие библиотек.

Отметим, что создание виртуальной среды с указанием пути в форме C:\Windows\system32\ может быть некорректным, т. к. этот путь зарезервирован для системных файлов Windows. Запуск интерпретатора или установка пакетов в этом каталоге могут привести к проблемам с правами доступа или конфликтам. Рекомендуется создать отдельную виртуальную среду или использовать установленный Python в другом каталоге (например, в AppData), чтобы избежать возможных проблем.

Если в остальных случаях программа не обнаруживает библиотеки, то существует еще один алгоритм, который также поможет создать, активировать другую среду и установить библиотеки. Вызываем командную строку (см. выше: Win + R, powershell, OK). Вместо команды **python -m venv r-reticulate** вводим **python -m venv myenv**, Enter.

Активируем окружение командой **myenv\Scripts\activate**, Enter.

Устанавливаем библиотеки **pip install numpy keras tensorflow**, Enter. Начнется процесс инсталляции.

В Rstudio в скрипте последовательно выполним команды сочетанием клавиш Ctrl +

Enter для активации новой виртуальной среды и проверки установленных библиотек.

library(reticulate)

use_virtualenv("D:/myenv", required = TRUE)

py_config()

и выполнить ее (Ctrl + Enter).

С помощью дополнительной команды **py_run_string("import numpy; import keras")** следует проверить наличие библиотек.

Отметим, что создание виртуальной среды с указанием пути в форме C:\Windows\system32\ может быть некорректным, т. к. этот путь зарезервирован для системных файлов Windows. Запуск интерпретатора или установка пакетов в этом каталоге могут привести к проблемам с правами доступа или конфликтам. Рекомендуется создать отдельную виртуальную среду или использовать установленный Python в другом каталоге (например, в AppData), чтобы избежать возможных проблем.

Если в остальных случаях программа не обнаруживает библиотеки, то существует еще один алгоритм, который также поможет создать, активировать другую среду и установить библиотеки. Вызываем командную строку (см. выше: Win + R, powershell, OK). Вместо команды **python -m venv r-reticulate** вводим **python -m venv myenv**, Enter.



Активируем окружение командой **myenv\Scripts\activate**, Enter.

```
PS C:\Users\marfi> myenv\Scripts\activate
```

Устанавливаем библиотеки **pip install numpy keras tensorflow**, Enter. Начнется процесс инсталляции.

```
PS C:\Users\marfi> pip install numpy keras tensorflow
```

В Rstudio в скрипте последовательно выполним команды сочетанием клавиш Ctrl + Enter для активации новой виртуальной среды и проверки установленных библиотек.

```
library(reticulate)
use_virtualenv("D:/myenv", required=TRUE)
py_config()
```

Использование Keras

Установленные программы и библиотеки необходимо загружать при выполнении любого скрипта R с помощью функции **library()**.

Подготовка данных

В среде Keras массивы данных принято называть *тензорами*. Смысл такой замены терминов здесь не важен, поскольку в прикладном плане ничего не меняется. По-прежнему задачей моделирования является классификация пробных площадок – строк двумерного массива (объектов тензора).

В расчетах использованы данные для 40 пробных площадок (120 строк) и 10 столбцов (9 каналов спектральной яркости и вектор с

номером кластера) (таблица [bancl.csv](#), массив **pcl**). Расчет и построение нейросетевой модели выполнены в скрипте [modelkeras.R](#).

Обучающий тензор, **train_data**, содержал 70 % данных (28 площадок, 84 строки). Тестовый тензор, **test_data**, включал оставшиеся 30 % (12 площадок, 36 строк). Разные показатели имели отличающиеся диапазоны значений; для них выполнили преобразование в безразмерные величины из интервала [0, 1] с помощью формулы $z = (\max(x) - x) / (\max(x) - \min(x))$. Трансформация каждого признака проведена отдельно для обучающей и тестовой выборки.

В среде Keras индексы массивов начи-

наются с нуля. Для преобразования меток классов в формат, пригодный для обучения моделей, номера кластеров от 1 до 4 были уменьшены на единицу и стали номерами от 0 до 3. Далее с помощью функции категориального кодирования **to_categorical()** создана бинарная матрица **train_labels**, состоящая из 4 столбцов (идентифицирующая индекс кластера) и 84 строк (соответствующих объектам, 28 площадкам). Столбец 1 соответствует классу 0, столбец 2 – классу 1 и т. д. Для каждого объекта (строки) назначается индекс 1 в том столбце, который соответствует номеру его кластера, и 0 – в остальных столбцах (табл. 1).

Таблица 1. Фрагмент-матрица **train_labels** для идентификации точек с площадок по кластерам. Преобразованные номера кластера

Номер точки площадки	Номер кластера	Индекс кластеров			
		0	1	2	3
1	2	0	0	1	0
2	1	0	1	0	0
3	2	0	0	1	0
4	2	0	0	1	0
5	2	0	0	1	0
6	3	0	0	0	1
7	3	0	0	0	1
8	0	1	0	0	0
9	1	0	1	0	0
10	1	0	1	0	0
11	0	1	0	0	0
12	1	0	1	0	0
...

Процедура моделирования

Работа с сетью проходила в несколько этапов: подготовка данных, создание модели, подготовка к обучению (компиляция), обучение (Коросов, 2023).

Вначале задали архитектуру нейронной сети (полносвязный персептрон) с помощью функции **keras_model_sequential()** %>% . В разных вариантах модели задавали от 1 до 3 слоев и от 10 до 60 нейронов, в примере показана двухслойная модель с 20 и 10 нейронами. Функция активации нейронов принята **relu**, которая широко применяется благодаря своей простоте (Балута и др., 2023). Поскольку решается многоклассовая задача, на последнем (выходном) слое в модели за-

дается функция активации **softmax**. На выходе получаем 4-мерный вектор вероятности принадлежности каждого образца к каждому из 4 кластеров.

```
model <- keras_model_sequential() %>%
  layer_dense(units = 20, activation = 'relu') %>%
  layer_dense(units = 10, activation = 'relu') %>%
  layer_dense(units = 4, activation = 'softmax')
```

Визуализация структуры модели и потоков информации через слои нейронной сети в виде схемы выполняется с помощью команды **plot(model, show_shapes = TRUE)** (рис. 1). В примере 9 входных нейронов (None, 9) передают данные в 20 нейронов второго (скрытого) слоя (None, 20), а те – в 10 нейронов третьего слоя (None, 10).

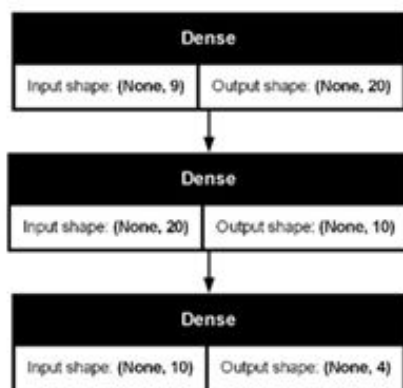


Рис. 1. Вариант графа модели с 3 полносвязными слоями Dense с информацией о размере
Fig. 1. A variant of the model graph with 3 fully connected Dense layers with size information

Далее загружается код в память компьютера (компиляция) для последующей настройки. Для этого в функции **compile()** задаются следующие аргументы: функция потерь **categorical_crossentropy**, алгоритм оптимизации **adam** и метрика точности (успешности) **accuracy** классификации. Функция потерь **categorical_crossentropy** применяется именно для решения многоклассовых задач.

```
model %>% compile(
  optimizer = 'adam',
  loss = 'categorical_crossentropy',
  metrics = c('accuracy'))
```

Обучение сети (training) проводилось на входных данных тензора **train_data** (яркостные характеристики 9 каналов), в качестве целевых переменных служили метки кластеров **train_labels** (4 кластера). В процессе настройки подбиралось число эпох (лучший вариант – 40) и число итераций (10). Применялся метод **fit()** с аргументом **validation_data = 0.2** (20 %). Для оценки степени ее обобщенности, т. е. способности модели работать с новыми данными, принято определенную часть обучающих данных использовать только для вычисления метрики потерь (Шолле, 2022). Оценку (validation) обученной модели проводили, используя метод **evaluate()**. Сначала модель была оценена на тестовых данных **test_data** с соответствующими метками классов **test_labels**. Далее были получены метрики точности (**accuracy**) и функции потерь (**loss**) для всего тестового набора.

```
history<-model%>% fit(train_data, train_labels, epochs = 40, batch_size = 10, validation_split = 0.2)
plot(model, show_shapes = TRUE)
plot(history)
model %>% evaluate(test_data, test_labels)
```

В ходе обучения параметры модели нейронной сети стабилизируются уже через 30 эпох (рис. 2., **plot(history)**). Точность моделей на обучающих и тестовых выборках варьировалась в диапазонах от 55 до 90 %. Увеличение размеров сети (с 5 до 30 нейронов) существенно улучшило прогнозные свойства модели; точность превышает 80 %.

Полученная модель использовалась для расчета типа кластера (местообитания) для каждого пикселя геоизображения (спутниковые снимки) всей изучаемой территории.

Построение прогноза и экстраполяция

Как было описано выше, полный преобразованный набор яркостных характеристик геоизображения содержится в массиве **fulldata**. Используя сигнатуру (соотношение 9 значений яркости) отдельного пикселя, модель рассчитывает для него четыре значения вероятностей принадлежности к одному из 4 классов: **predinew<-model%>% predict(as.matrix(fulldata))**. Эти вероятности в сумме дают 1. Далее из них с помощью функции **preclas** выбирается максимальное значение и данному пикселю приписывается номер столбца как класс наиболее вероятного типа биотопа. Каждый образец получает единственный предсказанный класс (от 1 до 4) (табл. 2). Например, для пикселя 10 получили вектор [0.112, 0.702, 0.151, 0.048] и назначаем класс 1, это разреженные вырубки.

В качестве визуализации предсказаний используется растр с исходной геопривязкой (например, первый канал, **ma**), в который переносятся предсказанные значения типов местообитания **values(ma)**. Далее построили растровый слой по категориям (функция **classify** обеспечивает раскраску значений).

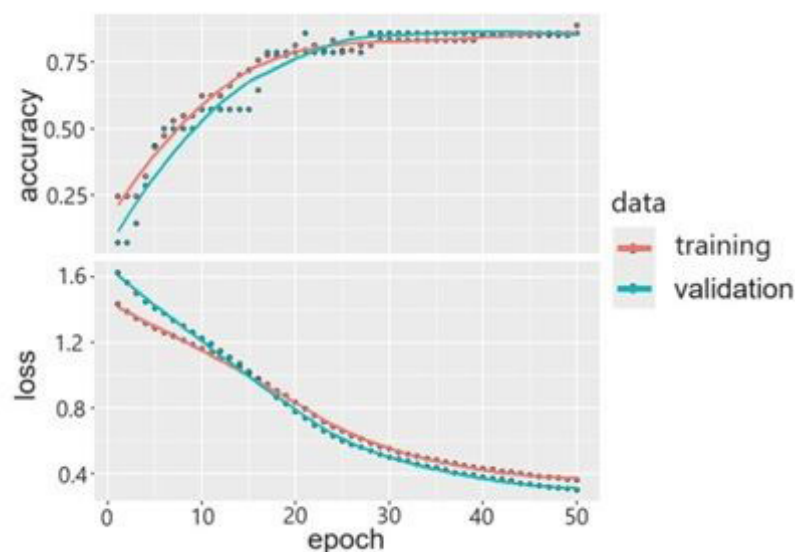


Рис. 2. Динамика оценок потерь (loss) и точности (accuracy) нейросетевой модели при обучении
Fig. 2. Dynamics of loss and accuracy estimates of the neural network model during training

Таблица 2. Фрагмент матрицы прогнозов для построения карты

Номер пикселя	Номер кластера			
	0	1	2	3
1	0.247	0.188	0.384	0.18
2	0.204	0.244	0.419	0.132
...
10	0.112	0.702	0.151	0.048
...

В результате создается карта, отображающая предсказанные классы биотопов (рис. 3).

Однородные области, сформированные пикселями одного кластера, интерпретируются как отдельные типы биотопов. На итоговой псевдоцветной карте показано 5 кластеров: четыре соответствуют изученным в полевых условиях типам, пятый объединяет неисследованные объекты, которые соответствуют спелым и приспевающим древостоям. Крупные элементы антропогенного и природного происхождения (озера, болота, луга, населенные пункты) закрыли маскирующими белыми полигонами.

Типичная процедура верификации результирующих карт в основном выполняется при сопоставлении их с разными источниками данных. В первую очередь с полевыми геоботаническими описаниями, сопровождаемыми GPS-привязкой и фотографированием местности; с космическими снимками высокого разрешения (Лавриненко, 2015; Раевский и др., 2022). Помимо полевых данных, для верификации используют

лесоустроительные материалы. Также создание векторных карт на основе дешифрирования ДЗ с применением алгоритмов контролируемой классификации, например таких, как метод минимального расстояния, метод Махаланобиса, метод максимального правдоподобия, к спектрозональным снимкам среднего разрешения с последующей углубленной постклассификационной обработкой, с применением обучаемых алгоритмов Random Forest (Раевский и др., 2022; Семакина и др., 2025). Использование аэрофотоснимков и данных БПЛА тоже служит одним из верификационных показателей. Особенно перспективным является использование сверточных нейронных сетей для автоматического распознавания на снимках растительных сообществ, которые на порядки повышают точность создаваемых карт, что, в свою очередь, кардинально улучшает качество оценки актуального состояния и динамики растительного покрова (Лавриненко, 2023; Элешкевич и др., 2023). Поскольку наша статья носит методический

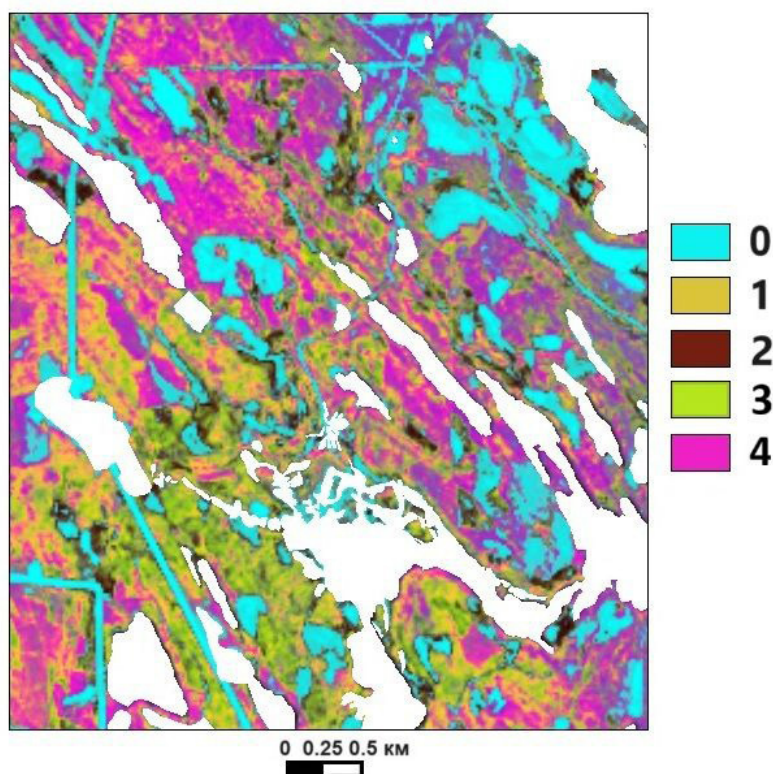


Рис. 3. Грид типов биотопов, построенный на основе двухслойного персептрона ($20 > 10 > 5$); 0 – открытые вырубki, 1 – разреженные вырубki, 2 – молодняки, 3 – лиственные леса, 4 – хвойные и смешанные леса; белыми полигонами закрыты болота, луга, озера, населенные пункты

Fig. 3. Grid of biotope types constructed on the basis of a two-layer perceptron ($20 > 10 > 5$); 0 – open clearings, 1 – sparse clearings, 2 – young forests, 3 – deciduous forests, 4 – coniferous and mixed forests); white polygons indicate swamps, meadows, lakes, and populated areas

характер и относится в основном к практике применения пакета Keras, мы не стали применять сложные процедуры верификации, требующие развернутой интерпретации.

Проверку соответствия грид-карты реальных объектов выполнили визуально, сопоставляя с [космическими снимками высокого разрешения](#), фотографиями местности и полевыми описаниями. Используя последний вариант сети, контуры ландшафтов удалось выделить достаточно хорошо. Четко идентифицировались свежие и разреженные вырубki (0, 1), лиственный лес (3) с молодняками (2), спелые хвойные и смешанные леса (4). Из-за отсутствия объемного массива данных провели приблизительную верификацию на основе трех точек, отобранных из новых геоботанических описаний, выполненных в июне 2025 г. Сравнение карты с этими описаниями показало, что она довольно хорошо отражает реальность. Первая точка соответствовала хвойным лесам с преобладанием сосны (плотность – 24.5), вторая – свежим вырубкам с нулевой плотностью, третья – лиственным лесам с преобладанием березы и ели (14.5 и 8.5).

Обсуждение

Использование библиотеки Keras оказалось более эффективным, чем пакета neuralnet. В наших вычислительных экспериментах, включавших сотни прогонов с различными схемами сетей (от 3 до 50 нейронов в слоях, от 1 до 3 скрытых слоев) и комбинациями летних и зимних каналов (от 3 до 11), Keras обеспечил сокращение ошибки классификации на 20 % при существенном сокращении времени обучения (табл. 3).

Оптимизация архитектуры сети и предобработка данных выявили специфические методологические проблемы, характерные для экологических исследований с ограниченным числом репрезентативных площадок. Увеличение сложности сети до формата 20-10-4 снижало ошибку обучения. Лучший результат с помощью Keras достигнут при наборе данных № 4 (см. табл. 3) – обучающая точность составила 85 %, тестовая – 83 %; продолжительность обучения – всего около 0.09 минуты (~5.4 секунды). Однако дальнейшее усложнение сети привело к переобучению, что выразилось в расхождении точности прогноза на тренировочной (> 90 %) и

Таблица 3. Характеристики процесса обучения нейронных сетей для двух библиотек

№	Число слоев	Число нейронов	Среднее время обучения, мин	Средняя доля совпадений для обучающей выборки	Средняя доля совпадений для тестовой выборки
neuralnet					
1	1	5	0.53	0.39	0.43
2	1	20	1.45	0.61	0.75
3	1	30	3.83	0.65	0.67
4	2	20, 10	6.67	0.99	0.88
5	3	34, 12, 4	7	0.99	0.75
Keras					
1	1	5	0.08	0.54	0.79
2	1	20	0.07	0.82	0.72
3	1	30	0.08	0.79	0.72
4	2	20,10	0.09	0.85	0.83
5	3	34, 12, 4	0.08	0.91	0.79

тестовой (< 70 %) выборках. Использовалось различное число (от 3 до 11) и соотношение числа каналов (от 1 до 5) летних и зимних снимков (табл. 4). Увеличение количества зимних каналов, чувствительных к наличию хвои и структуре снежного покрова, не всег-

да приводило к ожидаемому улучшению классификации вторичных листовенных биотопов; в некоторых конфигурациях происходило «размывание» спектральных сигнатур для кластеров (биотопической картины) (Со-чилова, Ершов, 2012).

Таблица 4. Влияние архитектурных гиперпараметров на точность модели

Количество летних и зимних каналов	Слои	Нейроны	Средняя точность на тестовой и обучающей выборках
7	1	30	80 и 72
7 и 1	2	30 и 20	85 и 81
7	2	20 и 10	78 и 70
7 и 2	2	20 и 10	87 и 87

На наш взгляд, это обусловлено доминированием листовенных пород на изучаемых вырубках и относительно высокой выраженностью сигнала хвойных в зимних каналах Landsat 8 на данной стадии сукцессии, что подчеркивает необходимость подхода к выбору важных сезонных каналов под конкретные экологические задачи. Комбинация 7 летних и 2 зимних каналов оказалась оптимальной, т. к. летние каналы несли основную информацию о состоянии растительного покрова, критически важную для различения стадий сукцессии, а ограниченное число зимних каналов добавляло умеренный контраст, не перегружая модель избыточными или конфликтующими сигналами.

Существенной стороной наших исследований явились выявления естественной типологии изучаемых местообитаний на

основе совместной классификации полевых и спутниковых данных. Как справедливо отмечают авторы: «Метод управляемой классификации является... субъективным» (Данилова и др., 2017, с. 12), поскольку назначение типа биотопа (насаждений) выполняется самим исследователем, исходя из интуитивных представлений о типологии и наличных (часто фрагментарных, разновременных, устаревших...) данных. Закрепление за определенным выделом того или иного статуса всегда будет контекстуальным из-за ограниченного объема доступной информации, а также связано с большими временными потерями.

Вследствие этого мы задались вопросом, если при дешифрировании объективность априори недостижима, нельзя ли упростить, ускорить и автоматизировать процедуру

выявления природной типологии на основе любой имеющейся информации. Таким приемом стала совместная обработка материалов полевого описания и спутниковых данных. Существенным моментом выполненной кластеризации и выявления типов биотопов стала возможность статистического обобщения характеристик для каждого из выявленных типов. Тем самым мы получили основание для содержательной интерпретации выявленных типов местообитаний, для определения их «естественного» типологического статуса. Рассчитанная на этой основе экстраполяция типов биотопов на всю изучаемую территорию в определенной степени сохраняет природную континуальность свойств среды, не искаженную априорными соображениями исследователя. Эта особенность анализа проявилась, в частности, в том, что на территории разновозрастных вырубок обнаружилась внутренняя неоднородность насаждений. Улавливание таких скрытых закономерностей принципиально важно в экологии животных, где точность описания гетерогенности местообитаний напрямую влияет на понимание закономерностей пространственного распределения и динамики популяций.

Мы рассчитываем, что наша публикация перенесет применение библиотеки Keras в экологических исследованиях из узкой области прикладных задач (таких как мониторинг антропогенных выбросов – Косулин, 2023) на более широкое поле поиска биолого-экологических градиентов.

Заключение или выводы

Библиотека алгоритмов глубокого обучения Keras практически не используется в работах по экологии животных, хотя она позволяет существенно усилить вычислительные

способности пакета R при обработке пространственной и спутниковой информации с целью изучения местообитаний животных. Наш опыт выявления типологии разнородных биотопов и создания грид-карты привел к следующим выводам.

1. Одновременное использование яркостных характеристик спутниковых снимков и полевых геоботанических описаний в процессе кластеризации пробных площадок позволяет в автоматическом режиме построить «естественную» типологию местообитаний (биотопов).
2. Степень дифференциации и точность полученной грид-карты определяются полнотой доступных эколого-биотопических и дистанционных характеристик местообитаний.
3. Результат классификации космического снимка, точность выявления типа растительности зависят от сочетания использованной комбинации каналов зимних и летних снимков, которые в разной степени отражают физиономические свойства растительности. В наших условиях минимально необходимая комбинация из семи летних и двух зимних каналов дала лучший результат.
4. Эффективность классификации определяется структурой нейронной сети, количеством нейронов в скрытых слоях, которые приходится подбирать вручную. Небольшое число нейронов, которым оперирует функция *neuralnet*, не позволяет за разумное время получить точную настройку. Использование слишком больших сетей в моделях Keras приводит к переобучению.
5. Явным преимуществом пакета Keras является возможность обработки больших массивов данных за короткое время.

Библиография

- Балута В. И., Осипов В. П., Рыков Ю. Г., Четверушкин Б. Н. О понятии влияния в концепции когнитивного моделирования при использовании функции активации типа ReLU // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023. № 4. С. 59–71. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_56573800_56563851.pdf (дата обращения: 08.09.2025).
- Бугмырин С. Н., Коросов А. В., Иешко Е. П., Аниканова В. С., Беспятова Л. А., Матросова Ю. М., Телегин И. В. Опыт изучения пространственного распределения паразитов мелких млекопитающих // Северная Европа в XXI веке: Природа, культура, экономика: Материалы междунар. конф., посвящ. 60-летию КарНЦ РАН (24–27 октября 2006). Петрозаводск, 2006. С. 55–58.
- Геоинформатика: Учеб. для студентов вузов / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарёв, В. С. Тикунов и др.; Под ред. В. С. Тикунова. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 480 с.
- Гусева Т. Л., Коросов А. В., Беспятова Л. А., Аниканова В. С. Многолетняя динамика биотопического размещения обыкновенной бурозубки (*Sorex araneus*, Linnaeus 1758) в мозаичных ландшафтах Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. Т. 2, № 8. С. 13–20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogoletnyaya-dinamika->

- [biotopicheskogo-razmescheniya-obyknovennoy-burozubki-sorex-araneus-linnaeus-1758-v-mozaichnyh-landshaftah/viewer](#) (дата обращения: 10.03.2025).
- Данилова И. В., Корец М. А., Рыжкова В. А. Картографирование возрастных стадий лесной растительности на основе анализа разносезонных спутниковых изображений Landsat // Исследование земли из космоса. 2017. № 4. С. 12–24. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29992173_79574715.pdf (дата обращения: 10.03.2025).
- Иешко Е. П., Коросов А. В., Никонорова И. А., Бугмырин С. В. Связь видового богатства сообществ гельминтов и численности хозяина (на примере обыкновенной бурозубки *Soxrex araneus*) // Паразитология. 2020. Т. 54, № 1. С. 3–12.
- Ильючик М. А., Цай С. С. Формирование базы данных эталонно-калибровочных участков для тематического дешифрирования материалов космической съемки // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство. 2010. Вып. 18. С. 44–47.
- Раевский Б. В., Тарасенко В. В., Петров Н. В. Оценка современного состояния растительных сообществ заповедника «Костомукшский» по спутниковым снимкам системы Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 3. С. 47–61. URL: <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=2528> (дата обращения: 10.11.2025).
- Коросов А. В., Матросова Ю. М., Бугмырин С. В., Аниканова В. С., Беспятова Л. А. Опыт реконструкции территориального размещения рыжей полевки в мозаичном ландшафте южной Карелии // Биogeография Карелии (флора и фауна таежных экосистем). Вып. 4. Петрозаводск, 2003. С. 204–212.
- Коросов А. В. Нейронные сети для экологии: введение // Принципы экологии. 2023. № 3. С. 76–96. DOI: 10.15393/j1.art.2023.14002 (дата обращения: 26.02.2025).
- Коросов А. В., Марфицына Н. А. Дешифрирование местообитаний животных с помощью методов глубокого обучения библиотеки Keras // ИнтерКарта. ИнтерГИС: Материалы междунар. конф. Пермь, 2025. (В печати)
- Косулин В. В. Применение систем искусственного интеллекта в экологическом мониторинге выбросов предприятия // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 10. С. 132–135. URL: [elibrary_54795395_27315499.pdf](#) (дата обращения: 26.02.2025).
- Кузьменко Е. И., Фролов А. А., Силаев А. В. Картирование лесных ландшафтов северо-запада Западной Сибири с использованием ГИС // География и природные ресурсы. 2015. № 4. С. 151–161.
- Лавриненко И. А. Типология территориальных единиц растительности для целей крупномасштабного картографирования (на примере острова Колгуев) // Геоботаническое картографирование. 2015. С. 95–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipologiya-territorialnyh-edinit-rastitelnosti-dlya-tseley-kрупномasshtabnogo-kartografirovaniya-na-primere-ostrova-kolguev> (дата обращения: 12.12.2025).
- Лавриненко И. А. Современные подходы к подготовке карт растительности Арктики // Геоботаническое картографирование. 2023. С. 14–27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-k-podgotovke-kart-rastitelnosti-arktiki> (дата обращения: 12.12.2025).
- Семакина А. В., Шихов А. Н., Климина Е. А. Картографирование уязвимости лесов к ветровому воздействию на основе спутниковых данных (на примере Пермского края) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 4. С. 236–252.
- Соколова Е. Н., Ершов Д. В. Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 277–282. URL: <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1076> (дата обращения: 26.02.2025).
- Шитиков В. К., Мاستицкий С. Э. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. 2017. 351 с. URL: <https://github.com/ranalytics/data-mining> (дата обращения: 26.01.2025).
- Шолле Ф. Глубокое обучение с R и Keras. М.: ДМК Пресс, 2022. 646 с. URL: <https://coollib.net/b/627871-fransua-sholle-glubokoe-obuchenie-s-r-i-keras> (дата обращения: 26.02.2025).
- Элешкевич А. Д., Еременко М. С., Сайбель Е. Г., Христолюбов И. А., Чернов А. Г. Применение методов автоматизированного дешифрирования в задачах распознавания зон антропогенного воздействия на нефтегазовых месторождениях // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 7. С. 127–131. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-127-131
- GeeksforGeeks. How to Install Keras in Windows. 2021. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/how-to-install-keras-in-windows/?ysclid=m8oygmq0nq900158163> (дата обращения: 15.01.2025).
- PythonRu. 2021. URL: <https://pythonru.com/biblioteki/kak-ustanovit-keras-na-linux-i-windows-keras?ysclid=m8co0qtcos915911868> (дата обращения: 15.01.2025).
- The R Project for Statistical Computing. 2023. URL: <https://www.r-project.org/> (дата обращения: 26.01.2025).

USING THE KERAS LIBRARY TO DECRYPT ANIMAL HABITATS USING DEEP LEARNING METHODS

MARFITSYNA *Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russia, marfitsyna.nata@mail.ru*
Natalya Alexandrovna

KOROSOV *DSc, Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russia, korosov@psu.karelia.ru*
Andrey Victorovich

Key words:

habitat
RSD
GIS
neural network
R
Keras

Summary: The paper considers the use of deep learning algorithms from the Keras library to solve the problem of classifying forest clearings of different ages using remote sensing in the R environment. A rather complicated procedure for installing Keras libraries on a computer is considered in detail. The stages of neural simulation and their variations using the R neuralnet package and the Keras environment are described. Satellite images were decoded in the vicinity of Gomselga village (Karelia) using field survey data. The typical decryption algorithm (classification with learning) was supplemented by a joint multidimensional analysis of the brightness characteristics of the image and field geobotanical descriptions. As a result, 4 sets of reference signatures were formed, corresponding to a particular state of regenerating clearings. The neural network (multilayer perceptron) was configured to recognize these types of plantings, and then performed the classification of the remaining pixels of the image for the entire studied area. Based on the analysis of geobotanical descriptions and satellite data, a grid map was created highlighting four main types of habitats: fresh cuttings, regenerating cuttings, young trees, and deciduous forest. Data processing using Keras algorithms significantly speeds up analysis, and makes it possible to increase the number of layers and neurons and detail the grid. In particular, unlike the algorithms of reference decoding, the proposed approach made it possible to identify the heterogeneity of vegetation within the same-age clearings. The results of the work are used to identify heterogeneous animal habitats and the influence of environmental factors on their spatial distribution and abundance.

Reviewer: I. R. Idrisov
A. N. Shihov

Received on: 16 November 2025

Published on: 27 December 2025

References

- Baluta V. I. Osipov V. P. Rykov Yu. G. Chetverushkin B. N. On the notion of influence in the concept of cognitive modeling when using a ReLU-type activation function, *Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy*. 2023. No. 4. P. 59–71. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_56573800_56563851.pdf (data obrascheniya: 08.09.2025).
- Bugmyrin S. N. Korosov A. V. Ieshko E. P. Anikanova V. S. Bespyatova L. A. Matrosova Yu. M. Telegin I. V. Experience in studying the spatial distribution of small mammalian parasites, *Severnaya Evropa v XXI veke: Priroda, kul'tura, ekonomika: Materialy mezhdunar. konf., posvyasch. 60-letiyu KarNC RAN (24–27 oktyabrya 2006)*. Petrozavodsk, 2006. P. 55–58.
- Danilova I. V. Korec M. A. Ryzhkova V. A. Mapping of age stages of forest vegetation based on the analysis of multi-seasonal satellite images by Landsat, *Issledovanie zemli iz kosmosa*. 2017. No. 4. P. 12–24. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29992173_79574715.pdf (data obrascheniya: 10.03.2025).
- Eleshkevich A. D. Eremenko M. S. Saybel' E. G. Hristolyubov I. A. Chernov A. G. Application of automated decryption methods in the tasks of recognizing anthropogenic impact zones in oil and gas fields, *Ekspozitsiya Neft' Gaz*. 2023. No. 7. P. 127–131. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-127-131
- GeeksforGeeks. How to Install Keras in Windows. 2021. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/how-to-install-keras-in-windows/?ysclid=m8oygmq0nq900158163> (data obrascheniya: 15.01.2025).
- Geoinformatics: A textbook for university students, E. G. Kapralov, A. V. Koshkarev, V. P. Tikunov i dr.; Pod red. V. P. Tikunova. M.: Izd. centr «Akademiya», 2005. 480 p.

- Guseva T. L. Korosov A. V. Bespyatova L. A. Anikanova V. S. Long-term dynamics of biotopic distribution of the common shrew (*Sorex araneus*, Linnaeus 1758) in mosaic landscapes of Karelia, *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. T. 2, No. 8. P. 13–20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogoletnyaya-dinamika-biotopicheskogo-razmescheniya-obyknovennoy-burozubki-sorex-araneus-linnaeus-1758-v-mozaichnyh-landshaftah/viewer> (data obrascheniya: 10.03.2025).
- Ieshko E. P. Korosov A. V. Nikonorova I. A. Bugmyrin S. V. The relationship between the species richness of helminth communities and the abundance of the host (using the example of the common shrew *Sorex araneus*), *Parazitologiya*. 2020. T. 54, No. 1. P. 3–12.
- Il'yuchik M. A. Cay S. S. Formation of a database of reference and calibration sites for thematic decoding of space survey materials, *Trudy BGTU. Seriya 1. Lesnoe hozyaystvo*. 2010. Vyp. 18. P. 44–47.
- Korosov A. V. Marficya N. A. Decryption of animal habitats using deep learning methods of Keras Library, *InterKarta. InterGIS: Materialy mezhdunar. konf. Perm'*, 2025. (V pechaty)
- Korosov A. V. Matrosova Yu. M. Bugmyrin S. V. Anikanova B. C. Bespyatova L. A. The experience of reconstruction of the territorial location of the red vole in the mosaic landscape of South Karelia, *Biogeografiya Karelii (flora i fauna taezhnyh ekosistem)*. Vyp. 4. Petrozavodsk, 2003. P. 204–212.
- Korosov A. V. Neural networks for ecology: an introduction, *Principy ekologii*. 2023. No. 3. P. 76–96. DOI: 10.15393/j1.art.2023.14002 (data obrascheniya: 26.02.2025).
- Kosulin V. V. Application of artificial intelligence systems in environmental monitoring of enterprise emissions, *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya*. 2023. No. 10. P. 132–135. URL: [elibrary_54795395_27315499.pdf](https://elibrary.ru/54795395_27315499.pdf) (data obrascheniya: 26.02.2025).
- Kuz'menko E. I. Frolov A. A. Silaev A. V. Mapping of forest landscapes in the north-west of Western Siberia using GIS, *Geografiya i prirodnye resursy*. 2015. No. 4. P. 151–161.
- Lavrinenko I. A. Modern approaches to the preparation of maps of Arctic vegetation, *Geobotanicheskoe kartografirovanie*. 2023. P. 14–27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-k-podgotovke-kart-rastitelnosti-arktiki> (data obrascheniya: 12.12.2025).
- Lavrinenko I. A. Typology of territorial units of vegetation for the purposes of large-scale mapping (using the example of the Island of Kolguyev), *Geobotanicheskoe kartografirovanie*. 2015. P. 95–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipologiya-territorialnyh-edinit-rastitelnosti-dlya-tseley-krupnomasshtabnogo-kartografirovaniya-na-primere-ostrova-kolguev> (data obrascheniya: 12.12.2025).
- PythonRu. 2021. URL: <https://pythonru.com/biblioteki/kak-ustanovit-keras-na-linux-i-windows-keras?yclid=m8co0qtcos915911868> (data obrascheniya: 15.01.2025).
- Raevskiy B. V. Tarasenko V. V. Petrov N. V. Assessment of the current state of the plant communities of the Kostomukshsky Nature Reserve using satellite images from the Landsat system, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. T. 19, No. 3. P. 47–61. URL: <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=2528> (data obrascheniya: 10.11.2025).
- Semakina A. V. Shihov A. N. Klimina E. A. Mapping the vulnerability of forests to wind impacts based on satellite data (using the example of the Perm Region), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025. T. 22, No. 4. P. 236–252.
- Shitikov V. K. Mastickiy S. E. Classification, regression, and other Data Mining algorithms using R. 2017. 351 p. URL: <https://github.com/ranalytics/data-mining> (data obrascheniya: 26.01.2025).
- Sholle F. Deep learning with R and Keras. M.: DMK Press, 2022. 646 p. URL: <https://coollib.net/b/627871-fransua-sholle-glubokoe-obuchenie-s-r-i-keras> (data obrascheniya: 26.02.2025).
- Sochilova E. N. Ershov D. V. Analysis of the possibility of determining tree stocks based on Landsat ETM satellite data+, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. T. 9, No. 3. P. 277–282. URL: <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1076> (data obrascheniya: 26.02.2025).
- The R Project for Statistical Computing. 2023. URL: <https://www.r-project.org/> (data obrascheniya: 26.01.2025).



СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ БИОМЕТРИИ

КОРОСОВ
Андрей Викторович

доктор биологических наук, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, пр. Ленина, 33, korosov@psu.karelia.ru

Получена: 17 декабря 2025 года

Подписана к печати: 22 декабря 2025 года

В издательстве URSS только что вышло переиздание книги «Специальные методы биометрии».

В отличие от типичного учебника по биометрии, посвященного распространенным методам обработки числовой информации, в книге сделан акцент на выяснение биологического смысла получаемых чисел, на поиск устойчивых соотношений между свойствами изучаемых объектов и свойствами получаемых чисел, метрик, коэффициентов и параметров. В ключе биологической интерпретации рассмотрены биологические шкалы и алгоритмы их преобразования, различные меры биологического разнообразия, параметры типов распределений, факторных нагрузок, главных компонент, главных координат, неметрических шкал, вариограмм, автокорреляций, спектральной

плотности и прочих биометрических характеристик. Объяснение каждого метода и алгоритма базируется на решении реальной задачи, выполненном в среде MS Excel и R и подробно проиллюстрированном. Книга предназначена как студентам старших курсов специальностей, так и специалистам в эколого-биологической области знания; она рассчитана на читателей, знакомых с основами вариационной статистики.

Важно подчеркнуть, что книга продолжает серию авторских публикаций по биометрии, начатых и многие годы возобновляемых изданий в соавторстве с Э. В. Ивантером, – это основы биометрии, элементарная биометрия, компьютерная биометрия, биометрическое моделирование и, наконец, специальная биометрия.

Библиография

Коросов А. В. [Специальные методы биометрии](#). М.: URSS, 2026. 328 с.