



Издатель

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

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 1 (59). Март, 2026

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

Н. А. Марфицына
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 № 1. 2026

От редакции

И вновь...

3

Оригинальные исследования

Андреева С. И.,
Гришина Ю. Б.,
Красногорова А. Н. *К широтному распространению брюхоногих моллюсков родов *Voreoelona* и *Opisthorchorphorus* в водоемах Западной Сибири* 4–21

Боднарь И. С.,
Чебан Е. В. *Радиостимуляция низкими дозами γ -излучения повышает эффективность аккумуляции, смягчает стресс от избытка меди у водного растения-фиторемедиатора ряски малой (*Letna minor* L.)* 22–32

Лебединский А. А. *Аксантизм у краснобрюхой жерлянки (*Bombina bombina*) из Нижегородской области* 33–36

Ляшенко О. А. *Структура и пространственное распределение фитопланктона Выборгского залива в XXI веке* 37–46

Тишина Е. А.,
Дроганова Т. С.,
Васильев Н. В.,
Поликарпова Л. В. *Изменение биохимических параметров *Melanoides tuberculata* при воздействии глифосата* 47–53

Черлин В. А.,
Окштейн И. Л.,
Лабазанов И. М. *Значение соотношения температурных условий на поверхности почвы и на разных глубинах для экологии ушастой круглоголовки, *Phrynoserphalus mystaceus*, на бархане Сарыкум (Республика Дагестан, Российская Федерация)* 54–69

Методы экологических исследований

Коросов А. В.
Марфицына Н. А., *Введение в вероятностные нейронные сети для экологов* 70–91

Письма в редакцию

Кутенков А. П. *Э. В. Ивантер в Киваче: начало пути* 92–97



Выпуск № 1

От редакции

И ВНОВЬ...

Уважаемые читатели, авторы и рецензенты!

Хочется в который раз обратить внимание авторов на тематику нашего журнала – это в основном биологическая экология. В центре внимания таких исследований должны находиться взаимоотношения между организмами и средой, различного рода воздействия на биоту и ее реакции на них. Приоритетным объектом является доказанная экологическая связь, зависимость, закономерность.

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



УДК 591.9(28):594.3(571.1)

К ШИРОТНОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ БРЮХОНОГИХ МОЛЛЮСКОВ РОДОВ *BOREOELONA* И *OPISTHORSCHOPHORUS* В ВОДОЕМАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

АНДРЕЕВА
Светлана Иосифовна

доктор биологических наук, Омский государственный университет путей сообщения, Омск, пр. Маркса, 35,
siandreeva@yandex.ru

ГРИШИНА
Юлия Борисовна

кандидат технических наук, Омский государственный университет путей сообщения, Омск, пр. Маркса, 35, gubuly@mail.ru

КРАСНОГОРОВА
Анастасия Николаевна

кандидат биологических наук, Омский государственный университет путей сообщения, Омск, пр. Маркса, 35,
krasnogorova@inbox.ru

Ключевые слова:
Bithyniidae
видовое богатство
широтный диапазон

Аннотация: Представлены результаты анализа многолетних данных по распространению пресноводных брюхоногих моллюсков родов *Boreoelona* и *Opisthorchophorus* в водах Западной Сибири, включая Тюменскую область, в том числе Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа, Томскую, Новосибирскую и Омскую области, Северный и частично Центральный Казахстан. Исходные материалы собраны в 1972, 1973, 1981, 2000, 2003, 2005–2014, 2017, 2019–2024 гг. в 124 водоемах различного типа: прибрежная зона рек, придаточные водоемы рек, водохранилища, пойменные и непойменные озера. Выявлено присутствие двух видов рода *Boreoelona* и пять видов рода *Opisthorchophorus*. Установлено, что распределение выявленных видов характеризуется значительной вариабельностью в зависимости от широты местности. Согласно особенностям распространения выделяются три группы видов. Первая группа видов с широким широтным диапазоном для исследованного региона встречается преимущественно в северных регионах Западной Сибири: *Boreoelona contortrix*, *B. sibirica* и *Opisthorchophorus abakumovae*. Вторая группа видов предпочитает средние широты региона: *O. baudonianus* и *O. valvatoides*. Третья группа включает виды с относительно широким широтным распространением в исследованном регионе, однако тяготеющие к средней части региона: *O. confusus* и *O. troscheli*. Находки в последние годы *O. confusus* и *O. troscheli* в северных районах, возможно, связаны с наблюдаемым потеплением. В высоких широтах (севернее 65° с. ш.) *Bithyniidae* встречены только в придаточных водоемах Нижней Оби и изредка в приустьевых зонах притоков Оби, что подтверждает предположение о том, что крупные реки Западной Сибири служат природными магистралями для перемещения на значительные расстояния пресноводных Gastropoda.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 03 ноября 2025 года

Подписана к печати: 27 марта 2026 года

Введение

Брюхоногие моллюски семейства Bithyniidae помимо участия в круговороте вещества в водных экосистемах являются и первыми промежуточными хозяевами возбудителя описторхоза – опасного заболевания человека и животных. В водных объектах Западной Сибири в настоящее время насчитывается 15 видов моллюсков семейства Bithyniidae, в том числе по два вида из родов *Boreoelona* Starobogatov et Streletzkaia, 1967; *Digyracidum* Locard, 1882; *Paraelona* Beriozkina et Starobogatov in Anistratenko et Stadnichenko, 1994; четыре вида из рода *Bithynia* Leach in Abel, 1818 и пять видов из рода *Opisthorchophorus* Beriozkina, Levina et Starobogatov in Anistratenko et Stadnichenko, 1994. Вопрос о видовой принадлежности первого промежуточного хозяина до сих пор остается открытым, потому что ПЦР-методом исследованы не все виды. Возбудители описторхоза зарегистрированы ПЦР-методом у *Boreoelona contortrix*, *Digyracidum bourguignati*, *D. starobogatovi*, *Opisthorchophorus troscheli* и *O. confusus* (Андреева и др., 2024). Это только начало работы, результатами которой мы хотим подтвердить или опровергнуть предположение С. А. Беэра (2005) о вероятном участии в циркуляции паразита всех видов Bithyniidae. В связи с чем исследование территориального распространения отдельных видов Bithyniidae как возможных первых промежуточных хозяев возбудителя описторхоза в условиях Западной Сибири остается актуальным. Целью данной публикации является выявление распространения видов *Boreoelona* и *Opisthorchophorus* и широтной изменчивости видового состава родов в пределах Западной Сибири.

Материалы

Материалом для данной работы послужили как собственные сборы моллюсков, так и сборы, переданные для определения коллегами объемом 149 качественных проб из 124 водных объектов Западной Сибири, находящихся в пределах Западно-Сибирской равнины, простирающейся от побережья Северного Ледовитого океана на севере до Тургайского плато и Казахского мелкосопочника на юге (Макунина, 2017). Определено более 1500 экз. моллюсков в сборах за 1972, 1973, 1981, 2000, 2003, 2005–2014, 2017, 2019–2024 гг., в том числе более 900 экз. из рода *Boreoelona* и около 600 экз. из рода *Opisthorchophorus*.

Методы

Моллюсков собирали при помощи качественных орудий лова: скребка и драги, а также непосредственно руками. Материал фиксировался этанолом. Определение моллюсков проведено с помощью «Определителя пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий» (Старобогатов и др., 2004) и отдельных статей (Vinarski et al., 2013; Sitnikova et al., 2017; Andreeva et al., 2025), а также использовались фотографии и рисунки типовых экземпляров из фондовой коллекции Зоологического института РАН, сделанные одним из авторов в 1990–2003 гг. При определении моллюсков использовались особенности строения раковины и копулятивного аппарата. Все сборы определены одним из авторов (С. И. Андреевой), материалы, определенные до 2017 г., были пересмотрены заново.

Для характеристики распространения видов обсуждаемая территория формально была разделена на широтные интервалы в 2 градуса. Территория, простирающаяся от 50°1' до 54° с.ш., определена как южные широты, от 54°1' до 60° с.ш. – как средние, от 60°1' и выше – как северные.

Поскольку материал представлен качественными пробами, авторы посчитали возможным для приблизительной оценки количественного развития в повидовых очерках указать для каждого вида максимальное число экземпляров в сборах. Встречаемость видов рассчитана как процентное отношение водоемов, в которых встречен данный вид (независимо от количества особей в пробе), к общему числу водоемов.

Результаты

В проанализированных сборах из водных объектов Западной Сибири найдено два вида брюхоногих моллюсков из рода *Boreoelona* и пять видов из рода *Opisthorchophorus*. Ниже приводится аннотированный список встреченных видов.

Boreoelona contortrix (Lindholm, 1909)

Материал: 368 экз.

Дальневосточно-сибирский вид (рис. 1). Известен из водоемов Западной и Восточной Сибири (Старобогатов, Затравкин, 1987; Долгин, 2001, 2003; Андреева, 2023; Андреева и др., 2017, 2018б и др.), Дальнего Востока (Прозорова, 1991; Прозорова, Шедько, 2003; Прозорова и др., 2004). Найден в постоянных и полупостоянных водоемах на грунте и растениях (Прозорова, 2000; Старо-

богатов и др., 2004). В Субарктике Сибири обитает в пойменных озерах и придаточных водоемах рек на водных растениях и грунте среди растительных остатков, где многочислен и широко распространен (Долгин, 2001), по пойменным водоемам долины р. Обь доходит до Полярного круга (Долгин, Иоганзен, 1979). В бассейне Верхней Оби (Кузменкин, 2013) отмечен как редкий вид в пойменных озерах на заиленных грунтах и водных растениях.

В проанализированных нами сборах северной точкой распространения *B. contortrix* был рукав протоки Вылпосл (Ханты-Мансийский автономный округ), южной – оз. Шолак (Кургальджинский заповедник). Таким образом, широтные границы распространения вида достаточно широки: от 66°30' до 50°54' с.ш. При этом максимальное число моллюсков этого вида в проанализированных сборах зарегистрировано в пробах из запруды на р. Малый Учуг (56 экз. 05.07.2012) и пойменного водоема р. Большой Балык (28 экз. 02.06.2019). Наиболее предпочитаемыми биотопами являются прибрежные зоны рек и пойменные водоемы.

***Boreoelona sibirica* (Westerlund, 1886)**

Материал: 540 экз.

Восточноевропейско-североазиатский вид (рис. 2). Известен из Западной и Восточной Сибири (Долгин, 2003; Андреев и др., 2008; Lazutkina et al., 2009; Винарский и др., 2011), севера Дальнего Востока, Камчатки (Старобогатов, Затравкин, 1987; Прозорова, Шедько, 2003), Урала и европейской части России (Лазуткина и др., 2010; Холмогорова и др., 2012; Шихова, 2017), Урала и Центрального Казахстана (Андреев, Андреева, 2014; Андреева и др., 2018а). Обитает в реках, озерах и более мелких постоянных водоемах на растительности и грунте. Как редкий вид отмечен на растительности и грубом детрите в пойменных озерах Верхней Оби (Кузменкин, 2013).

Крайней северной точкой распространения *B. sibirica* в проанализированных нами сборах, как и предыдущего вида, был рукав протоки Вылпосл (Ханты-Мансийский автономный округ), южной – оз. Шолак (Кургальджинский заповедник). Широтные границы вида: 66°30'–50°54' с.ш. Максимальное число моллюсков этого вида в проанализированных сборах зарегистрировано в пробах из запруд на р. Малый Учуг (36 экз. 28.08.24) и р. Замарайка (31 экз. 01.07.2012) в Омской области и пойменном водоеме р. Чулым (32

экз. 13.08.2006) в Томской области. Наиболее предпочитаемыми биотопами являются прибрежные зоны рек и пойменные водоемы.

***Opisthorchophorus abakumovae* Andreeva et Starobogatov, 2001**

Материал: 60 экз.

Восточноевропейско-сибирский вид (рис. 3). Обитает в водоемах Западной Сибири (бассейн среднего течения Иртыша) и Северного Казахстана (Андреева, 2023). Зарегистрирован в европейской части России в старице р. Ока у дер. Головино (Андреев, Андреева, 2019). Крайней северной точкой обнаружения *O. abakumovae* в просмотренных сборах является рукав протоки Вылпосл (Ханты-Мансийский автономный округ), южной – старица р. Иртыш (г. Омск). Широтные границы находок вида: 66°30'–55°00' с.ш. Наиболее многочисленен этот вид в сборах из северных районов, например рукав протоки Вылпосл (17 экз. 18.07.2007). В большинстве проб отмечен единично. Чаще всего встречается в прибрежных зонах рек.

***Opisthorchophorus baudonianus* (Gassies, 1859)**

Материал: 141 экз.

Южноевропейско-западносибирский вид (рис. 4). Обитает во временных водоемах южной части Европы (Старобогатов и др., 2004). В Западной Сибири (Андреев и др., 1999, 2008; Андреева, 2023), Западном, Северном и Центральном Казахстане встречается в водоемах всех типов (Лазуткина и др., 2012; Андреев, Андреева, 2014; Андреева и др., 2016). Обитает на Среднем Урале в водоемах Свердловской области (Андреева и др., 2018а). Во временных водоемах Верхней Оби обычен на грунте и растениях (Кузменкин, 2013).

В проанализированных сборах самой северной находкой *O. baudonianus* были сборы из оз. Польто-3 бассейн р. Тым, южной – плес оз. Султанкельды (Кургальджинский заповедник). Широтные границы распространения вида: от 59°76' до 50°49' с.ш. Максимальное число моллюсков этого вида в проанализированных сборах зарегистрировано в пробах из оз. Султанкельды (18 экз. 20.08.2013) в Центральном Казахстане и оз. Тояново (30 экз. 16.08.2006) в Томской области. Наиболее предпочтительными местами обитания являются прибрежные зоны стариц и других пойменных водоемов.

Opisthorchophorus confusus Andreeva in Andreeva, Khrebtova, Kondakov, Vinarski, 2025
Материал: 240 экз.

Восточноевропейско-сибирский вид (рис. 5). В качестве *O. hispanicus* (Servain, 1880) либо *Boreoelona* sp. указан из водных объектов бассейна Оки, Урала, Западной Сибири (Андреев и др., 2008, 2016; Андреева, 2023). Отмечен в верховьях Енисея и бассейне р. Бирюса (Долгин, 2012; Русинек и др., 2012). Молекулярно-генетический анализ показал отличия этого вида от других видов рода *Opisthorchophorus*, зарегистрированных в GenBank, и вид был описан как новый для науки (Andreeva et al., 2025).

Крайней северной точкой обнаружения *Opisthorchophorus confusus* в просмотренных сборах является устье р. Сыня (Нижняя Обь), южной – пойменный водоем р. Иртыш в окрестностях с. Большой Атмас (Омская область). Широтный интервал находок вида: 65°12'–54°06' с.ш. Максимальное число моллюсков этого вида в проанализированных сборах зарегистрировано в пробах из протоки р. Томь выше села Коларово Томской области (26 экз. 08.08.2006) и пойменного водоема р. Большой Балык (43 экз. 02.06.2019). Наибольшее число моллюсков этого вида зарегистрировано в пробах из побережья пойменных водоемов, стариц и проток.

Opisthorchophorus troscheli (Paasch, 1842)

Материал: 121 экз.

Европейско-западносибирский вид (рис. 6). Распространен в Европе и Западной Сибири (Старобогатов и др., 2004; Андреев и др., 2008; Piechocki, Wawrzyniak-Wydrowska, 2016; Андреева, 2023), Северном и Центральном Казахстане (Лазуткина и др., 2012; Андреев, Андреева, 2014). Встречен на Среднем и Южном Урале, а также в водоемах среднего течения р. Урал (Lazutkina et al., 2009; Андреева и др., 2018a; Андреева, Гребенников, 2023).

Крайней северной точкой обнаружения *O. troscheli* в просмотренных сборах является рукав протоки Вылполс (Ханты-Мансийский автономный округ), южной в живом состоянии – старица р. Иртыш (г. Омск). Раковинный материал собран в водоемах бассейна р. Нура. Широтный интервал находок вида в живом состоянии: 66°30'–55°00' с.ш. Максимальное число моллюсков этого вида в проанализированных сборах зарегистрировано в пробах из протоки р. Томь в окрестностях села Коларово в Томской области (26 экз. 18.08.2006) и запруды на р. Малый

Учуг в Омской области (20 экз. 28.06.2023). Чаще всего вид встречается в прибрежной зоне стариц, проток и запруд.

Opistorchophorus valvatooides (Beriozkina et Starobogatov in Beriozkina, Levina et Starobogatov, 1995).

Материал: 33 экз.

Южноевропейско-южнозападносибирский вид (рис. 7). Известен из водных объектов Восточной Европы и Европейской России, встречен в Курганской, Оренбургской, Челябинской и Омской областях (Старобогатов и др., 2004; Андреева, 2022).

В проанализированных нами сборах самой северной находкой *O. valvatooides* были сборы из р. Кума (Ханты-Мансийский автономный округ), южной – из пойменного водоема р. Иртыш в окрестностях села Большой Атмас (Омская область). Широтные границы распространения вида: от 59°24' до 54°06' с. ш. Максимальное число моллюсков этого вида обнаружено в пробах из побережья р. Тарка в Новосибирской области (21 экз. 20.07.2022). Предпочитаемые местообитания – заросли макрофитов в прибрежной зоне малых рек.

Обсуждение

Из водных объектов Западной Сибири в проанализированных сборах определено два вида брюхоногих моллюсков из рода *Boreoelona* и пять видов из рода *Opisthorchophorus*. Широтное распространение встреченных видов неодинаково: *Boreoelona contortrix* и *B. sibirica*, виды, вероятно, восточносибирского происхождения, распределены по обследованной территории приблизительно равномерно от 66°30' до 50°54' с. ш. *O. abakumovae* можно охарактеризовать как вид, характерный для водных объектов северных широт, хотя впервые он был найден и описан из оз. Кривое, расположенного несколько южнее 57° с. ш. (56°77' с. ш.). *O. troscheli*, вид европейского происхождения, встречен в широком широтном интервале от 66°30' до 50°66' с. ш. *O. baudonianus* и *O. valvatooides*, виды южноевропейского происхождения, в обследованном регионе тяготеют к средним для обсуждаемого региона широтам (54–60°). Интересны находки *O. confusus* и *O. troscheli*, в довольно широком широтном интервале, но с преобладающим распространением в водных объектах, расположенных на широтах 54–58°, а также *Boreoelona contortrix* и *B. sibirica* в бассейне Нуры (таблица).

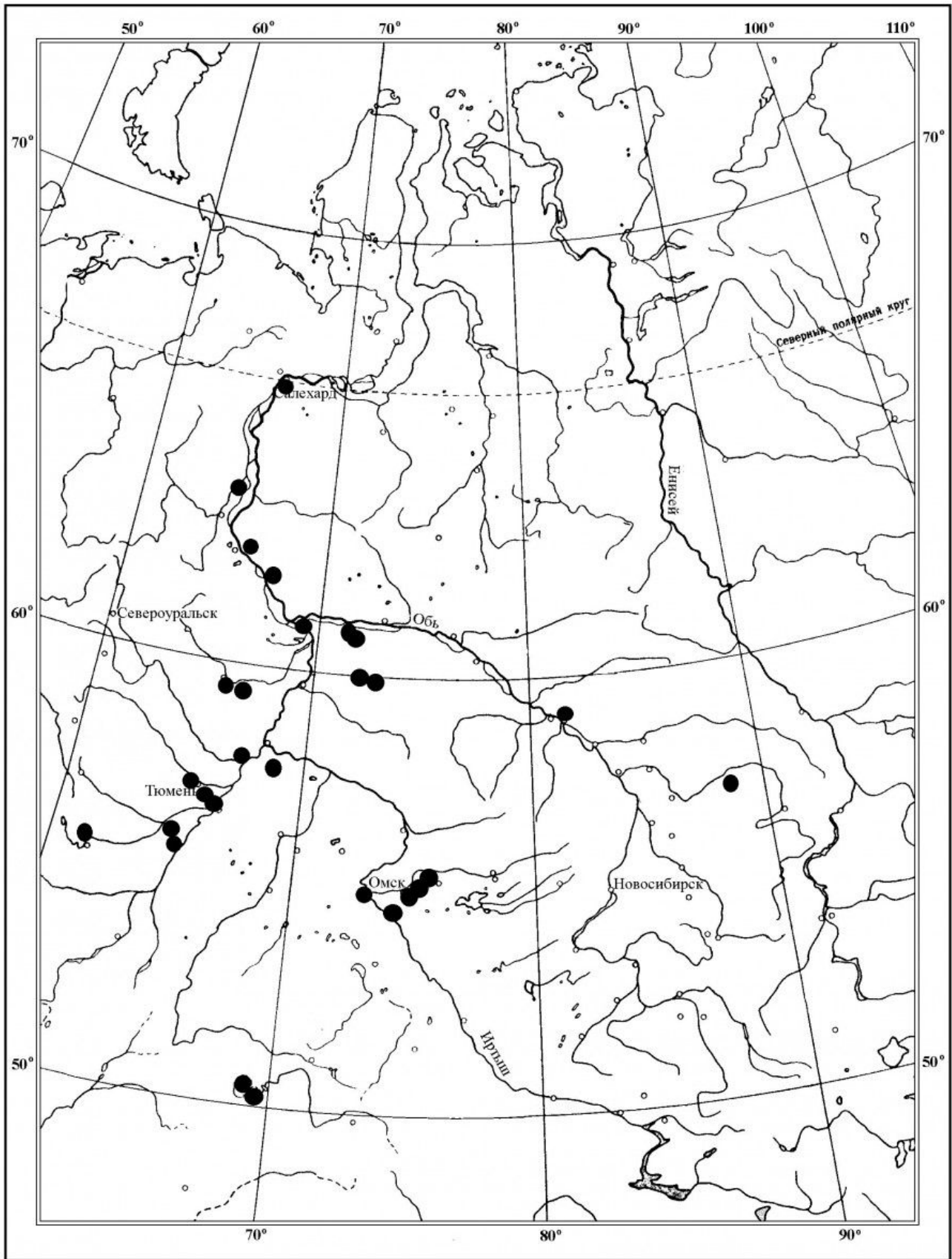


Рис. 1. Карта-схема распространения моллюсков *Boreoelona contortrix* в Западной Сибири
Fig. 1. Map of distribution of *Boreoelona contortrix* mollusks in Western Siberia

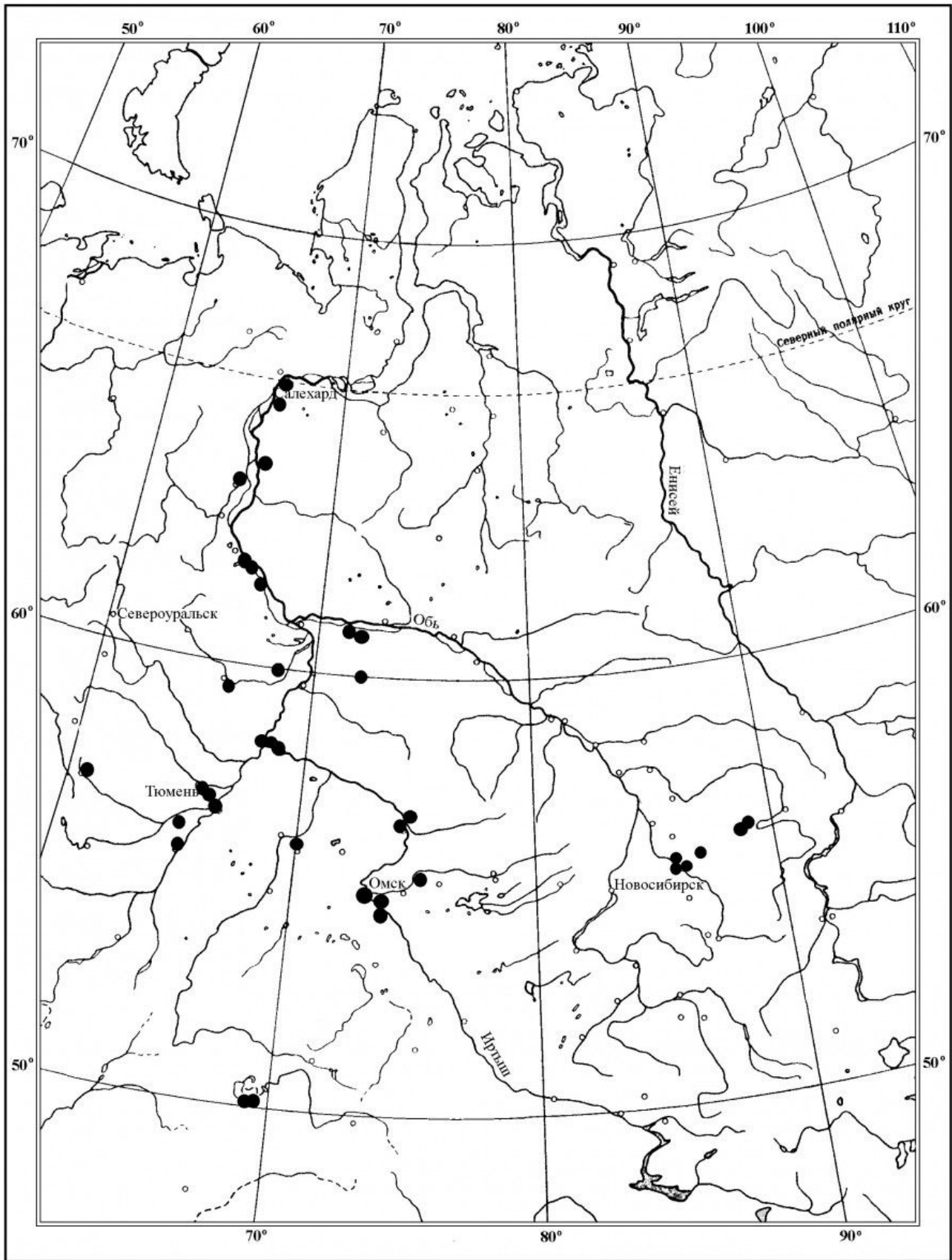


Рис. 2. Карта-схема распространения моллюсков *Boreoelona sibirica* в Западной Сибири
Fig. 2. Map of distribution of *Boreoelona sibirica* mollusks in Western Siberia

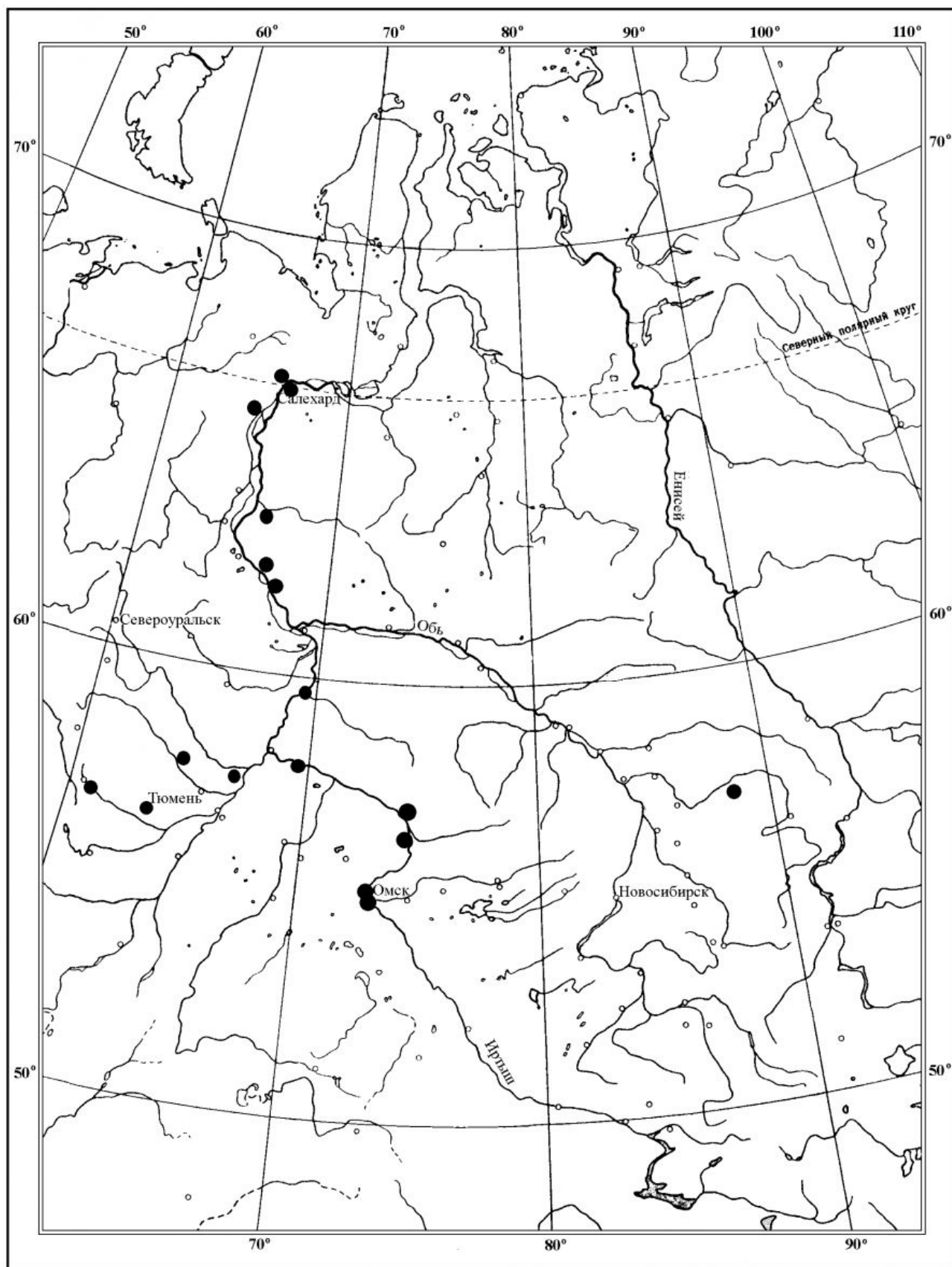


Рис. 3. Карта-схема распространения моллюсков *Opisthorchophorus abakumovae* в Западной Сибири
Fig. 3. Map of distribution of *Opisthorchophorus abakumovae* mollusks in Western Siberia

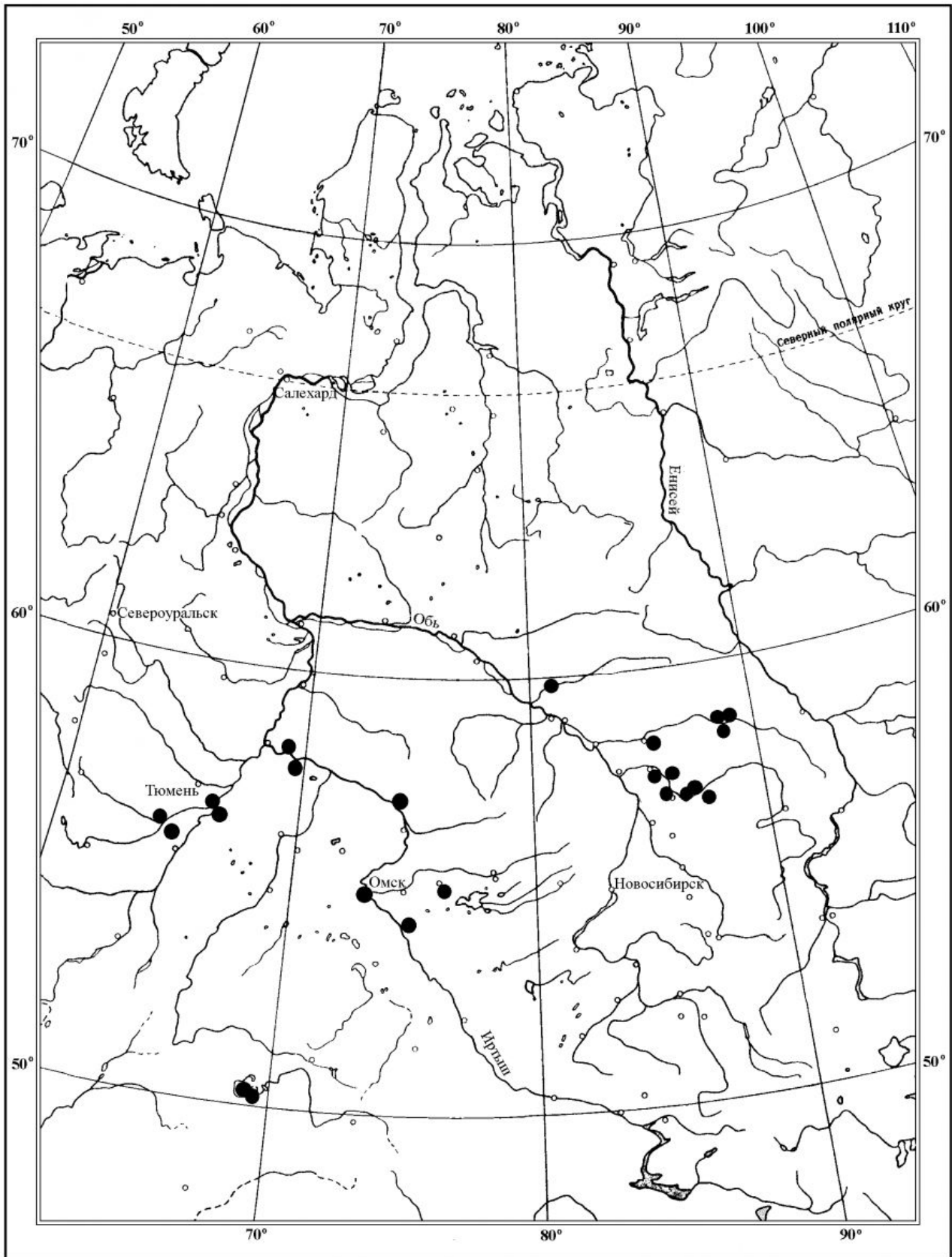


Рис. 4. Карта-схема распространения моллюсков *Opisthorchophorus baudonianus* в Западной Сибири
Fig. 4. Map of distribution of *Opisthorchophorus baudonianus* mollusks in Western Siberia

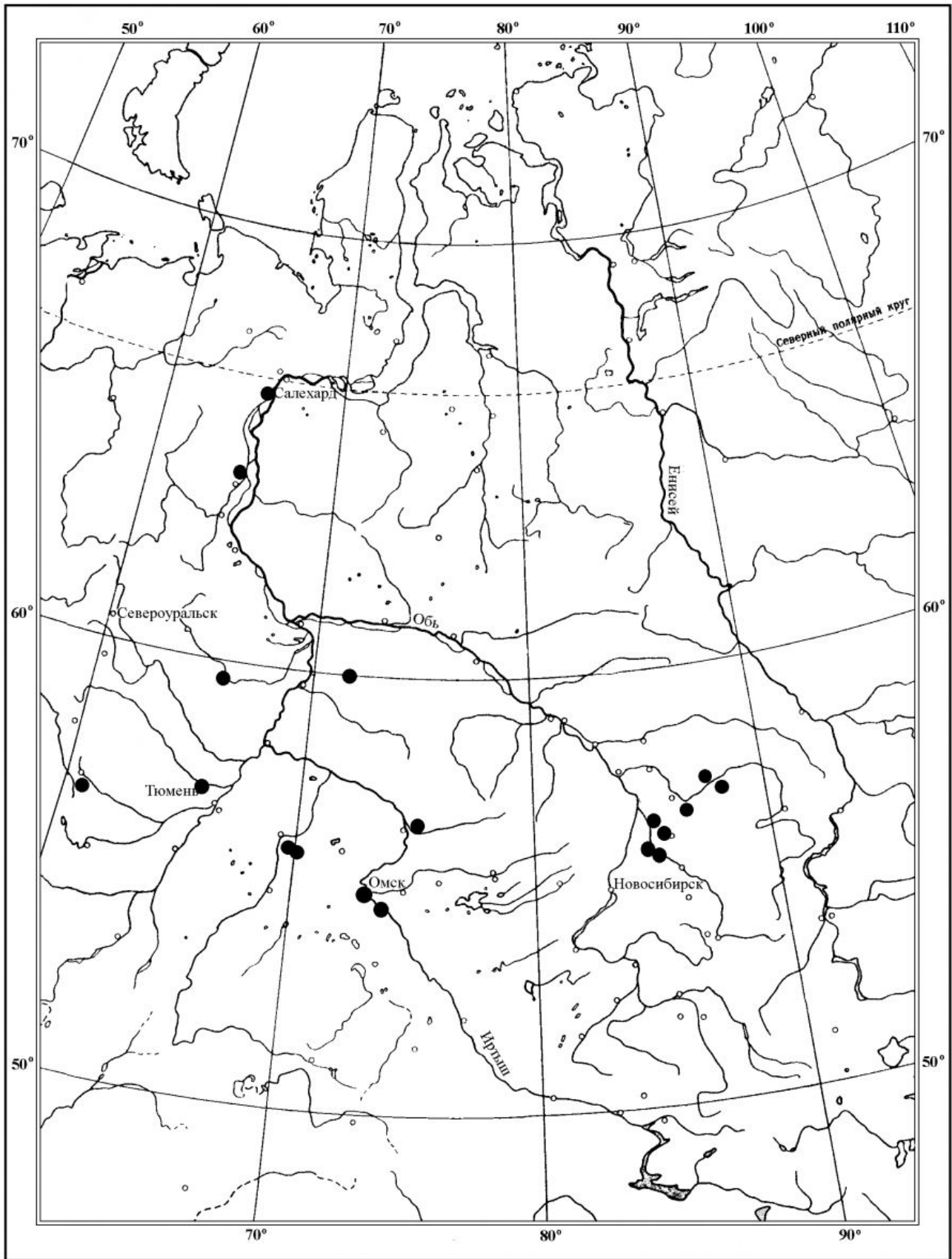


Рис. 5. Карта-схема распространения моллюсков *Opisthorchophorus confusus* в Западной Сибири
Fig. 5. Map of distribution of *Opisthorchophorus confusus* mollusks in Western Siberia

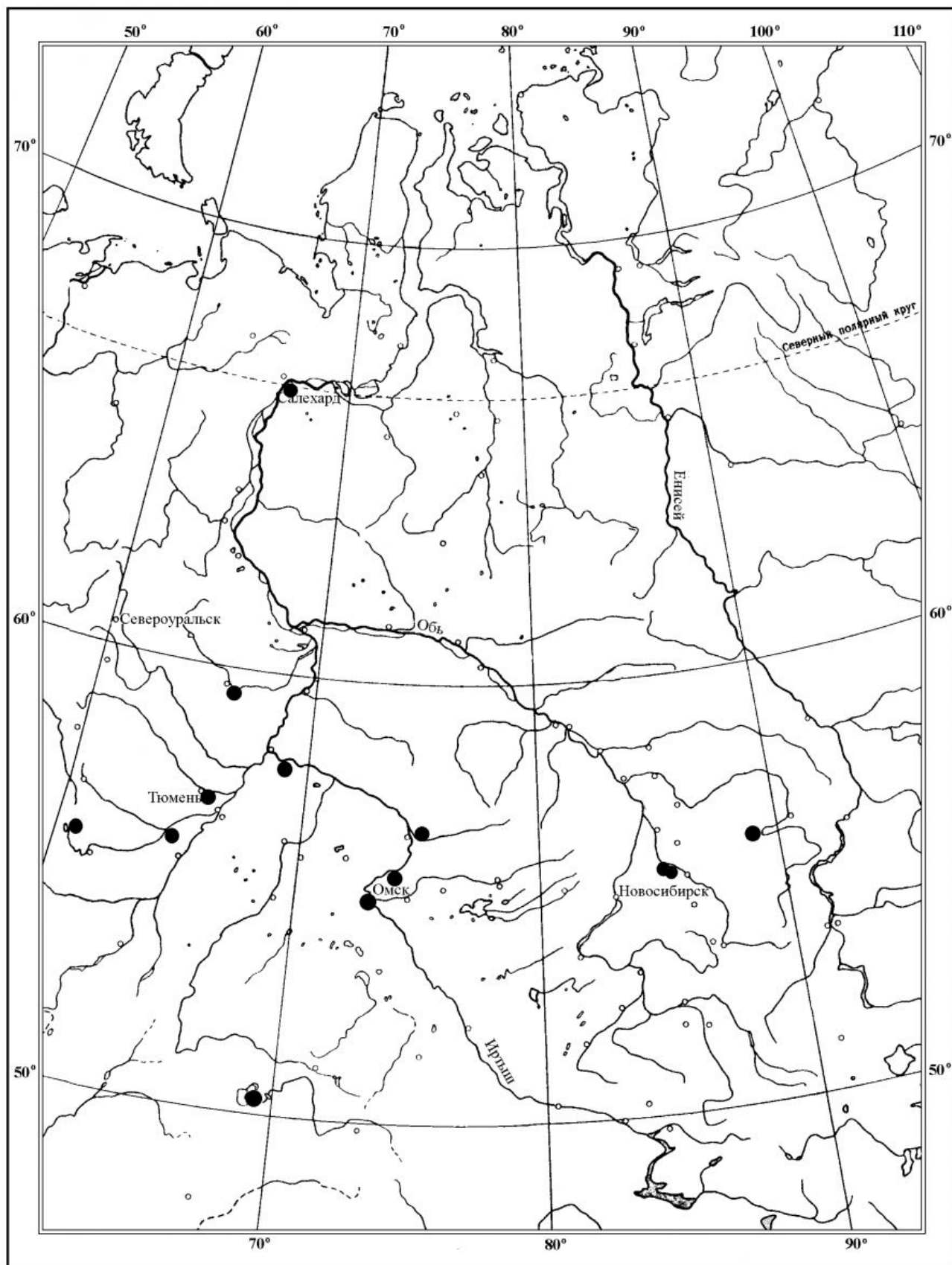


Рис. 6. Карта-схема распространения моллюсков *Opisthorchophorus troscheli* в Западной Сибири
Fig. 6. Map of distribution of *Opisthorchophorus troscheli* mollusks in Western Siberia

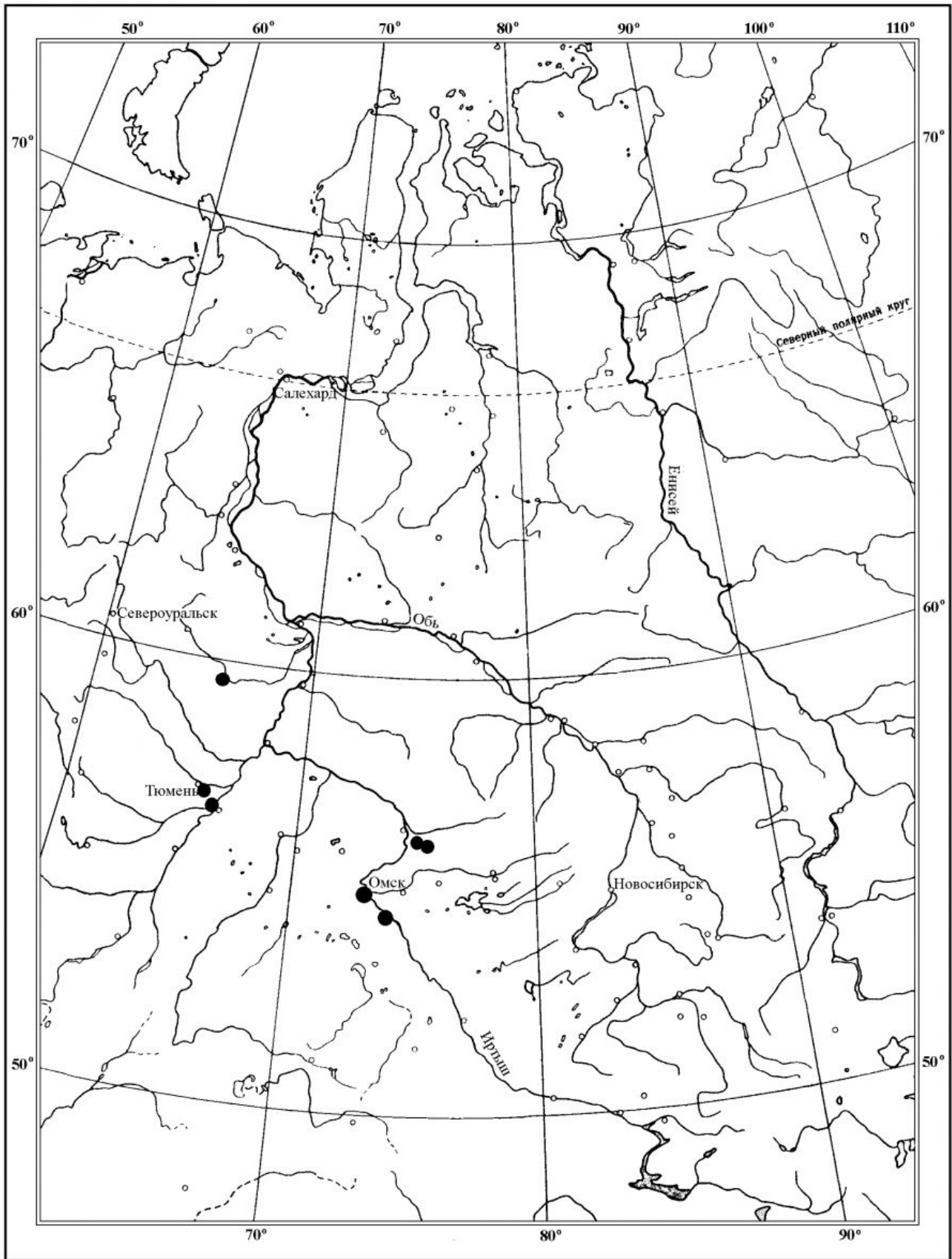


Рис. 7. Карта-схема распространения моллюсков *Opisthorchophorus valvatoides* в Западной Сибири
Fig. 7. Map of distribution of *Opisthorchophorus valvatoides* mollusks in Western Siberia

Встречаемость моллюсков родов *Boreoelona* и *Opisthorchophorus* в водоемах Западной Сибири, %

Широтный интервал	Boreoelona			Opisthorchophorus			
	contortrix	sibirica	abakumovae	baudonianus	confusus	troscheli	valvatoides
50°1'–52°	1.6	1.6	–	1.6	–	1.6	–
52°1'–54°	–	–	–	–	–	–	–
54°1'–56°	3.2	6.4	1.6	3.2	7.3	2.4	3.2
56°1'–58°	8.9	16.1	6.4	13.7	16.1	11.3	2.4
58°1'–60°	4.0	3.2	0.8	–	0.8	0.8	0.8
60°1'–62°	4.8	4.0	0.8	–	–	–	–
62°1'–64°	1.6	3.2	2.4	–	–	–	–
64°1'–66°	1.6	1.6	0.8	–	1.6	–	–
66°1'–68°	0.8	1.6	1.6	–	–	0.8	–

Итак, анализ распространения моллюсков рода *Boreoelona* и рода *Opisthorchophorus* семейства Bithyniidae показывает, что оно отличается своеобразием, вероятно, обусловленным спецификой условий обитания в различных природных зонах Западной Сибири. В частности, отсутствие Bithyniidae, например, в бассейне р. Большой Юган за исключением придаточного и пойменного водоемов в нижней части бассейна (обследовано 140 водных объектов, найдены в двух), где встречены *Boreoelona contortrix*, *B. sibirica* и *Opisthorchophorus abakumovae*, связано, как считает Е. С. Бабушкин (Бабушкин, 2017), со спецификой условий обитания в бассейне р. Большой Юган. Низкая прозрачность воды, длительное половодье и летне-осенние паводки в совокупности с сильной затененностью обуславливают слабое развитие высшей водной растительности и обрастаний, что лимитирует развитие жаберных брюхоногих. На юге лесостепной и степной зон Западной Сибири многие водоемы (Гвоздецкий, Михайлов, 1978; Макунина, 2017) имеют повышенную минерализацию и непригодны для обитания рассматриваемых видов моллюсков.

Прослеживается зависимость распространения видов от широты местности. В приближенных к высоким широтам (65° с. ш. и севернее) районах Bithyniidae найдены только в придаточных водоемах Нижней Оби и изредка в приустьевых зонах притоков Оби. В то время как в правобережных и левобережных районах, отдаленных от русла Оби, моллюски семейства Bithyniidae не встречены (Хохуткин, 1969; Долгин, 2001; Степанов, 2016, 2023 и др.). Высказанное выше предположение подтверждается и исследованием разнотипных водоемов заповедника «Малая Сосьва» и бассейна р. Таз.

В сборах из 44 водоемов заповедника «Малая Сосьва» и 83 станций из р. Таз, ее притоков и придаточных водоемов моллюски семейства Bithyniidae обнаружены не были (Винарский, Каримов, 2015; Андреев и др., 2021). На юге исследованного региона в бассейне р. Нуры в живом состоянии встречены *Boreoelona contortrix*, *B. sibirica* и *Opisthorchophorus baudonianus*, *O. troscheli* – только в виде раковинного материала. *O. confusus*, *O. troscheli* и *O. valvatoides* преимущественно обитают в водных объектах, расположенных в широтном интервале 54–58° с. ш.

Заключение

Таким образом, по широтному распространению выделяется группа видов с широким широтным диапазоном, процветающая и в северных районах Западной Сибири: это *Boreoelona contortrix*, *B. sibirica* и *Opisthorchophorus abakumovae*. Вторая группа видов (*O. baudonianus* и *O. valvatoides*) тяготеет к средним широтам для обсуждаемого региона, третья группа видов, скорее всего, европейского происхождения (*O. confusus* и *O. troscheli*), с достаточно широким широтным диапазоном, но тяготеющая также к средним широтам для обсуждаемого региона. Возможно, находки *O. confusus* и *O. troscheli* в северных районах следует объяснять наблюдаемым в последние годы повышением температур, позволившим продвинуться рассматриваемым видам в северные широты. Крайней северной точкой обнаружения в просмотренных сборах Bithyniidae являются придаточные водоемы Нижней Оби, в частности, рукав протоки Вылпол, где многочисленны *Boreoelona sibirica* и *Opisthorchophorus abakumovae*, что еще раз подтверждает высказывание (Ви-

нарский и др., 2012) о том, что крупные реки Западной Сибири служат природными магистральями для перемещения на значительные расстояния пресноводных *Gastropoda*, которые находят в придаточных водоемах приемлемые экологические ниши.

Библиография

- Андреев Н. И., Андреева С. И. К фауне моллюсков семейства Bithyniidae водоемов бассейна р. Оки // Моллюски: биология, экология, эволюция и формирование малакофаун: Тезисы Всерос. конф. с междунар. участием / Под ред. М. В. Винарского. Ярославль: Филигрань, 2019. С. 6.
- Андреев Н. И., Андреева С. И. Моллюски семейства Bithyniidae (*Gastropoda*, *Pectinibranchia*) водоемов Коргалжинского заповедника // Успехи современного естествознания. 2014. № 5-1. С. 227.
- Андреев Н. И., Андреева С. И., Абакумова Е. А. Моллюски семейства Bithyniidae бассейна среднего течения Иртыша // Естественные науки и экология. Омск, 1999. С. 152–161.
- Андреев Н. И., Андреева С. И., Бабушкин Е. С. Моллюски семейства Valvatidae Gray 1840 (*Gastropoda*, *Heterobranchia*) бассейна Таза (Западная Сибирь) // *Ruthenica: Rus. Malacol. J.* 2021. Vol. 31, № 1. С. 7–19.
- Андреев Н. И., Андреева С. И., Винарский М. В., Каримов А. В., Лазуткина Е. А. Новые данные о брюхоногих моллюсках (*Mollusca: Gastropoda*) водоемов Томской области // Естественные науки и экология. Омск, 2008. С. 64–73.
- Андреева С. И. Находки пресноводного брюхоногого моллюска *Opisthorchophorus valvatooides* в водоемах Урала и Западной Сибири // Фауна Урала и Сибири. 2022. № 2. С. 7–14.
- Андреева С. И. Моллюски семейства Bithyniidae (*Mollusca*, *Gastropoda*) Тюменской области // *Ruthenica: Rus. Malacol. J.* 2023. Vol. 33, № 2. С. 47–57.
- Андреева С. И., Андреев Н. И., Гребенников М. Е. К фауне гребнежаберных моллюсков водоемов Северного Приаралья // Фауна Урала и Сибири. 2016. № 1. С. 7–16.
- Андреева С. И., Андреев Н. И., Гребенников М. Е. К фауне моллюсков семейства Bithyniidae (*Gastropoda*, *Pectinibranchia*) Свердловской области // Фауна Урала и Сибири. 2018а. № 1. С. 19–27.
- Андреева С. И., Андреев Н. И., Лазуткина Е. А. *Boreoelona contortrix* (Lindholm, 1909) (*Bithyniidae*, *Gastropoda*, *Mollusca*) в водоемах Западной Сибири и Казахстана // *Ruthenica: Rus. Malacol. J.* 2018б. Vol. 28, № 4. С. 139–150.
- Андреева С. И., Винарский М. В., Потапова Н. К. Видовой состав моллюсков (*Mollusca*) водотмов города Якутска // Фауна Урала и Сибири. 2017. № 1. С. 7–18.
- Андреева С. И., Гребенников М. Е. К фауне моллюсков семейства Bithyniidae (*Gastropoda*, *Saenogastropoda*) бассейнов рек Урал, Эмба, Иргиз и Сырдарья // Фауна Урала и Сибири. 2023. № 2. С. 8–27.
- Андреева С. И., Старостина О. Ю., Свердлова А. В. Моллюски семейства Bithyniidae: видовое разнообразие и зараженность возбудителем описторхоза на отдельных территориях Западной Сибири // Моллюски: биология, экология, эволюция и формирование малакофаун: Материалы междунар. науч. конф. Архангельск: КИРА, 2024. С. 9–13.
- Бабушкин Е. С. Пресноводные моллюски бассейна реки Большой Юган (фауна и экология) : Дис. ... канд. биол. наук. Омск, 2017. 209 с.
- Безр С. А. Биология возбудителя описторхоза. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2005. 336 с.
- Винарский М. В., Андреев Н. И., Андреева С. И., Каримов А. В., Лазуткина Е. А. Широтная изменчивость разнообразия пресноводных брюхоногих моллюсков (*Mollusca: Gastropoda*) водоемов Западной Сибири // Биология внутренних вод. 2012. № 1. С. 75–83.
- Винарский М. В., Гребенников М. Е., Андреева С. И., Лазуткина Е. А. Водные брюхоногие моллюски (*Mollusca: Gastropoda*) Висимского заповедника и его окрестностей // Современное состояние и перспективы развития ООПТ Урала: Материалы науч.-практ. конф. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2011. С. 82–85.
- Винарский М. В., Каримов А. В. Брюхоногие моллюски (*Gastropoda*) водоемов заповедника «Малая Сосьва» (Западная Сибирь) // *Ruthenica: Rus. Malacol. J.* 2015. Vol. 25, № 2. С. 25–35.
- Гвоздецкий Н. А., Михайлов Н. И. Физическая география СССР. Азиатская часть: Учебник для студентов геогр. фак. ун-тов. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Мысль, 1978. 512 с.
- Долгин В. Н. Биотопическое распределение пресноводных моллюсков в водоемах Севера Сибири // Вестник ТГПУ. 2003. Вып. 4 (36). С. 55–61.
- Долгин В. Н. Пресноводные моллюски бассейна верхнего Енисея и озер Тувы // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. Вып. 7 (122). С. 129–130.
- Долгин В. Н. Пресноводные моллюски Субарктики и Арктики Сибири (фауна, экология, зоогеография) : Дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2001. 423 с.
- Долгин В. Н., Иоганзен Б. Г. Экологическая и морфологическая характеристика новых и малоизвестных пресноводных моллюсков севера Западной Сибири // Новые данные о сибирской фло-

- ре и фауне. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1979. С. 47–61.
- Кузменкин Д. В. К фауне пресноводных гребнежаберных моллюсков (Gastropoda: Pectinibranchia) бассейна Верхней Оби // Сборник научных статей международной молодежной школы-семинара «Ломоносовские чтения на Алтае» / Под ред. Е. Д. Родионова. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2013. Ч. 6. С. 20–26.
- Лазуткина Е. А., Андреева С. И., Андреев Н. И. Редкие виды брюхоногих моллюсков (Mollusca, Gastropoda) в водоемах юга Западной Сибири // Животный мир Казахстана и сопредельных территорий: Материалы междунар. конф. / Под ред. А. М. Мелдебекова. Алма-Аты: Нур-Принт, 2012. С. 132–134.
- Лазуткина Е. А., Андреева С. И., Андреев Н. И. *Boreoelona sibirica* (Westerlund, 1886) (Gastropoda, Pectinibranchia, Bithyniidae) в водоемах Западной Сибири и Среднего Урала // Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2010. Vol. 20, № 2. С. 103–108.
- Макунина Г. С. Западно-сибирская равнина // Большая российская энциклопедия. 2017. URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/4138680> (дата обращения: 24.01.2026).
- Прозорова Л. А. Аннотированный список водных моллюсков бассейна оз. Ханка // Бюллетень Дальневосточного малакологического общества. 2000. Вып. 4. С. 10–29.
- Прозорова Л. А. Состав и биогеографическая характеристика пресноводных брюхоногих моллюсков Приморского края // Зоологический журнал. 1991. Т. 70, вып. 9. С. 54–63.
- Прозорова Л. А., Богатов В. В., Саенко Е. М. Новые данные по фауне пресноводных моллюсков острова Сахалин // Растительный и животный мир острова Сахалин. Ч. 1. Тип. ФГУП Изд-во Дальнаука ДВО РАН, 2004. С. 138–144.
- Прозорова Л. А., Шедько М. Б. Моллюски озера Азабачье (Камчатка) и их биоценоотическое значение // Труды Камчатского филиала Тихоокеанского института географии ДВО РАН. Вып. IV. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2003. С. 120–151.
- Старобогатов Я. И., Затравкин М. Н. Bithynioidae (Gastropoda, Pectinibranchia) фауны СССР // Моллюски: результаты и перспективы их исследований: Автореф. докл. 8 Всесоюз. совещ. / Под ред. Я. И. Старобогатова, А. Н. Голикова, И. М. Лихарева Л.: Наука, 1987. С. 150–153.
- Старобогатов Я. И., Прозорова Л. А., Богатов В. В., Саенко Е. М. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Моллюски / Под ред. С. Я. Цалолыхина. Т. 6. СПб.: Наука, 2004. С. 9–491.
- Степанов Л. Н. Зообентос озер бассейна реки Байдарата (Ямало-Ненецкий автономный округ) // Фауна Урала и Сибири. 2023. № 2. С. 134–145.
- Степанов Л. Н. Разнообразие зообентоса водоемов и водотоков бассейнов рек Сетная и Нгояха (полуостров Ямал, Ямало-Ненецкий автономный округ) // Фауна Урала и Сибири. 2016. № 1. С. 90–104.
- Русинек О. Т., Ситникова Т. Я., Кондратистов Ю. Л. Состояние Иркутского очага описторхоза и вопросы его дальнейшего изучения // Известия Иркутского государственного университета. № 4. Серия Биология. Экология. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2012. Т. 5. С. 125–134.
- Холмогорова Н. В., Каргапольцева И. А., Винарский М. В. Материалы к фауне пресноводных брюхоногих моллюсков (Mollusca: Gastropoda) Удмуртской Республики // Вестник Удмуртского университета. Вып. 2. Ижевск: Удмуртский гос. ун-т, 2012. С. 47–55.
- Хохуткин И. М. Новые данные о пресноводной малакофауне полуострова Ямал. Вопросы малакологии Сибири // Материалы межвузовской науч.-методич. конф. / Под ред. Б. Г. Иоганзена. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1969. С. 56–57.
- Шихова Т. Г. Пресноводная малакофауна бассейна р. Чепца // Актуальные вопросы современной малакологии: Труды Всерос. науч. конф. с междунар. участием / Под ред. Э. А. Снегина. Белгород: Изд. дом «Белгород», 2017. С. 107–113.
- Andreeva S. I., Khrebtova I. S., Kondakov A. V., Vinarski M. V. A new species of the family Bithyniidae (Gastropoda: Littorinimorpha) from Russia, with remarks on some genera of this family // Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2025. Vol. 35, № 3. P. 143–156.
- Lazutkina E., Andreyev N., Andreyeva S., Gloer P., Vinarski M. On the taxonomic state of *Bithynia troscheliivar. sibirica* Westerlund, 1886, a Siberian endemic bithyniid snail (Gastropoda: Bithyniidae) // Mollusca. 2009. Vol. 27, № 2. P. 113–122.
- Piechocki A., Wawrzyniak-Wydrowska B. Guide to Freshwater and Marine Mollusca of Poland Poznan: Boguski Wydawnictwo Naukowe, 2016. 280 p.
- Sitnikova T. Ya., Sysoev A. V., Kijashko P. V. Species of freshwater Gastropods described by Ya.I. Starobogatov: Pulmonata (Acroloxidae), Heterobranchia (Valvatidae) and Caenogastropoda (Viviparoidae, Truncatelloidea and Cerithioidea) // Proceedings of the Zoological Institute RAS. 2017. № 321 (3). P. 247–299.
- Vinarski M. V., Nekhaev I. O., Glöer P., von Proschwitz T. Type materials of freshwater gastropod species described by C.A. Westerlund and accepted in current malacological taxonomy: a taxonomic and nomenclatorial study // Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2013. Vol. 23, № 2. P. 79–108.

Благодарности

Авторы глубоко признательны Н. И. Андрееву, Е. С. Бабушкину, М. В. Винарскому, А. А. Герасимову, А. А. Евсеевой, В. Н. Долгину, А. В. Каримову, Е. С. Кряжевой, А. В. Свердловой, И. М. Усланиной, Р. Г. Фаттахову, Т. А. Шараповой и Т. В. Шарафутдиновой за предоставленные сборы моллюсков.

ON THE LATITUDINAL DISTRIBUTION OF GASTROPODS OF THE GENERA *BOREOELONA* AND *OPISTHORCHOPHORUS* IN THE RESERVOIRS OF WESTERN SIBERIA

ANDREEVA
Svetlana Iosifovna

DSc, Omsk State University of Railway Transport, 35 Marx ave., Omsk, Omsk oblast, Russia, siandreeva@yandex.ru

GRISHINA
Yulia Borisovna

PhD, Omsk State University of Railway Transport, 35 Marx ave., Omsk, Omsk oblast, Russia, gubuly@mail.ru

KRASNOGOROVA
Anastasia Nikolaevna

PhD, Omsk State Transport University, 35 Marx ave., Omsk, Omsk oblast, Russia, krasnogorova@inbox.ru

Key words:

Bithyniidae
species richness
latitude range

Summary: The article presents the results of an analysis of long-term data on the distribution of freshwater gastropods of the genera *Boreoelona* and *Opisthorchophorus* in the waters of Western Siberia. These include the Tyumen region, the Yamalo-Nenets and Khanty-Mansi Autonomous Okrugs, Tomsk, Novosibirsk, and Omsk regions, Northern and partially Central Kazakhstan. The source materials were collected in 1972, 1973, 1981, 2000, 2003, 2005–2014, 2017, and 2019–2024 in 124 water bodies of various types: coastal zone of rivers, tributary water bodies of rivers, reservoirs, and floodplain and non-floodplain lakes. The presence of 2 species of the genus *Boreoelona* and 5 species of the genus *Opisthorchophorus* was revealed. It was established that the distribution of the identified species was characterized by significant variability depending on the latitude of the area. According to the distribution features, three groups of species are distinguished. The first group of species with a wide latitude range for the studied region includes *Boreoelona contortrix*, *B. sibirica* and *Opisthorchophorus abakumovae*, found mainly in the northern regions of Western Siberia. The second group of species contains *O. baudonianus* and *O. valvatoides*, it prefers the middle latitudes of the region. The third group includes species with a relatively broad latitude distribution in the study region, but tending to the central part of the region, namely *O. confusus* and *O. troscheli*. The recent findings of *O. confusus* and *O. troscheli* in the northern regions may be related to the warming observed in recent years. At high latitudes (north of 65° N), Bithyniidae are found only in the tributary waters of the Lower Ob and occasionally in the estuarine zones of the Ob tributaries. Thus, the assumption is confirmed that the large rivers of Western Siberia serve as natural highways for the movement of freshwater Gastropoda over significant distances.

Received on: 03 November 2025

Published on: 27 March 2026

References

- Andreev N. I. Andreeva S. I. Abakumova E. A. Mollusks of the Bithyniidae family in the middle reaches of the Irtysh River, Estestvennye nauki i ekologiya. Omsk, 1999. P. 152–161.
- Andreev N. I. Andreeva S. I. Babushkin E. S. Mollusks of the Valvatidae Gray 1840 family (Gastropoda, Heterobranchia) of the Taz basin (Western Siberia), Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2021. Vol. 31, No. 1. P. 7–19.
- Andreev N. I. Andreeva S. I. Vinarskiy M. V. Karimov A. V. Lazutkina E. A. New data on gastropods (Mollusca: Gastropoda) from the water bodies of the Tomsk Region, Estestvennye nauki i ekologiya. Omsk, 2008. P. 64–73.
- Andreev N. I. Andreeva S. I. Mollusks of the Bithyniidae family (Gastropoda, Pectinibranchia) of the reservoirs of the Korgalzhynsky reserve, Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2014. No. 5-1. P.

227.

- Andreev N. I. Andreeva S. I. To the mollusk fauna of the Bithyniidae family in the Oka River basin, Mollyuski: biologiya, ekologiya, evolyuciya i formirovanie malakofaun: Tezisy Vserop. konf. s mezhdunar. uchastiem, Pod red. M. V. Vinarskogo. Yaroslavl': Filigran', 2019. P. 6.
- Andreeva S. I. Andreev N. I. Grebennikov M. E. To the fauna of mollusks of the Bithyniidae family (Gastropoda, Pectinibranchia) of the Sverdlovsk Region, Fauna Urala i Sibiri. 2018a. No. 1. P. 19–27.
- Andreeva S. I. Andreev N. I. Grebennikov M. E. To the fauna of the comb-branchial snails of the Northern Aral Sea, Fauna Urala i Sibiri. 2016. No. 1. P. 7–16.
- Andreeva S. I. Andreev N. I. Lazutkina E. *Boreoelona contortrix* (Lindholm, 1909) (Bithyniidae, Gastropoda, Mollusca) in reservoirs of Western Siberia and Kazakhstan, Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2018b. Vol. 28, No. 4. P. 139–150.
- Andreeva S. I. Grebennikov M. E. To the fauna of mollusks of the Bithyniidae family (Gastropoda, Caenogastropoda) of the Ural, Emba, Irgiz, and Syrdarya River basins, Fauna Urala i Sibiri. 2023. No. 2. P. 8–27.
- Andreeva S. I. Starostina O. Yu. Sverdlova A. V. Mollusks of the Bithyniidae family: species diversity and infection with the opisthorchiasis pathogen in certain territories of Western Siberia, Mollyuski: biologiya, ekologiya, evolyuciya i formirovanie malakofaun: Materialy mezhdunar. nauch. konf. Arhangel'sk: KIRA, 2024. P. 9–13.
- Andreeva S. I. Vinarskiy M. V. Potapova N. K. Species composition of mollusks (Mollusca) in the water bodies of Yakutsk, Fauna Urala i Sibiri. 2017. No. 1. P. 7–18.
- Andreeva S. I. Discovery of the freshwater gastropod *Opisthorchophorus valvatoides* in the water bodies of the Urals and Western Siberia, Fauna Urala i Sibiri. 2022. No. 2. P. 7–14.
- Andreeva S. I. Mollusks of the Bithyniidae family (Mollusca, Gastropoda) of the Tyumen Region, Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2023. Vol. 33, No. 2. P. 47–57.
- Andreeva S. I., Khrebtova I. S., Kondakov A. V., Vinarski M. V. A new species of the family Bithyniidae (Gastropoda: Littorinimorpha) from Russia, with remarks on some genera of this family, Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2025. Vol. 35, No. 3. P. 143–156.
- Babushkin E. S. Freshwater Mollusks of the Bolshoy Yugan River Basin (Fauna and Ecology): Dip. ... kand. biol. nauk. Omsk, 2017. 209 p.
- Beer S. A. Biology of the pathogen of opisthorchiasis. M.: Tovarischestvo nauch. izd. KMK, 2005. 336 p.
- Dolgin V. N. Loganzen B. G. Ecological and morphological characteristics of new and little-known freshwater mollusks from the north of Western Siberia, Novye dannye o sibirskoy flore i faune. Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 1979. P. 47–61.
- Dolgin V. N. Biotopic distribution of freshwater mollusks in the water bodies of Northern Siberia, Vestnik TGPU. 2003. Vyp. 4 (36). P. 55–61.
- Dolgin V. N. Freshwater Mollusks of the Subarctic and Arctic Regions of Siberia (Fauna, Ecology, Zoogeography): Dip. ... d-ra biol. nauk. Tomsk, 2001. 423 p.
- Dolgin V. N. Freshwater mollusks of the Upper Yenisei basin and lakes of Tuva, Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. 2012. Vyp. 7 (122). P. 129–130.
- Gvozdeckiy N. A. Mihaylov N. I. SR. Physical Geography of the USSR. The Asian Part. M.: Mysl', 1978. 512 p.
- Hohutkin I. M. New data on the freshwater malacofauna of the Yamal Peninsula. Issues of Malacology in Siberia, Materialy mezhvuzovskoy nauch, metodich. konf., Pod red. B. G. Loganzena. Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 1969. P. 56–57.
- Holmogorova N. V. Kargapol'ceva I. A. Vinarskiy M. V. Materials on the fauna of freshwater gastropods (Mollusca: Gastropoda) of the Udmurt Republic, Vestnik Udmurtskogo universiteta. Vyp. 2. Izhevsk: Udmurtskiy gop. un-t, 2012. P. 47–55.
- Kuzmenkin D. V. To the fauna of freshwater comb-branchial snails (Gastropoda: Pectinibranchia) of the Upper Ob basin, Sbornik nauchnyh statey mezhdunarodnoy molodezhnoy shkoly-seminara «Lomonosovskie chteniya na Altae», Pod red. E. D. Rodionova. Barnaul: Izd-vo Altayskogo gop. un-ta, 2013. Ch. 6. P. 20–26.
- Lazutkina E. A. Andreeva S. I. Andreev N. I. *Boreoelona sibirica* (Westerlund, 1886) (Gastropoda, Pectinibranchia, Bithyniidae) in the water bodies of Western Siberia and the Middle Urals, Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2010. Vol. 20, No. 2. P. 103–108.
- Lazutkina E. A. Andreeva S. I. Andreev N. I. Rare species of gastropods (Mollusca, Gastropoda) in the water bodies of the south of Western Siberia, Zhivotnyy mir Kazahstana i sopredel'nyh territoriy: Materialy mezhdunar. konf., Pod red. A. M. Meldebekova. Alma-Aty: Nur-Print, 2012. P. 132–134.
- Lazutkina E., Andreyev N., Andreyeva S., Gloer P., Vinarski M. On the taxonomic state of Bithynia troscheliivar. sibirica Westerlund, 1886, a Siberian endemic bithyniid snail Gastropoda: Bithyniidae), Mollusca. 2009. Vol. 27, No. 2. R. 113–122.
- Makunina G. S. The West Siberian Plain, Bol'shaya rossiyskaya enciklopediya. 2017. URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/4138680> (data obrascheniya: 24.01.2026).
- Piechocki A., Wawrzyniak-Wydrowska B. Guide to Freshwater and Marine Mollusca of Poland Poznan:

- Boguski Wydawnictwo Naukowe, 2016. 280 p.
- Prozorova L. A. Bogatov V. V. Saenko E. M. New data on the freshwater mollusk fauna of Sakhalin Island, Rastitel'nyy i zhivotnyy mir ostrova Sahalin. Ch. 1. Tip. FGUP Izd-vo Dal'nauka DVO RAN, 2004. P. 138–144.
- Prozorova L. A. Shed'ko M. B. Mollusks of Lake Azabachye (Kamchatka) and their biocenotic significance, Trudy Kamchatskogo filiala Tihookeanskogo instituta geografii DVO RAN. Vyp. IV. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatskiy pechatnyy dvor, 2003. P. 120–151.
- Prozorova L. A. Annotated list of aquatic mollusks in Lake Khanka, Byulleten' Dal'nevostochnogo malakologicheskogo obschestva. 2000. Vyp. 4. P. 10–29.
- Prozorova L. A. Composition and biogeographical characteristics of freshwater gastropods in Primorsky Krai, Zoologicheskii zhurnal. 1991. T. 70, vyp. 9. P. 54–63.
- Rusinek O. T. Sitnikova T. Ya. Kondratistov Yu. L. The state of the Irkutsk opisthorchiasis focus and issues of its further study, Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. No. 4. Seriya Biologiya. Ekologiya. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo gop. un-ta, 2012. T. 5. P. 125–134.
- Shihova T. G. Freshwater malacofauna of the Cheptsa river basin, Aktual'nye voprosy sovremennoy malakologii: Trudy Vserop. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, Pod red. E. A. Snegina. Belgorod: Izd. dom «Belgorod», 2017. P. 107–113.
- Sitnikova T. Ya., Sysoev A. V., Kijashko P. V. Species of freshwater Gastropods described by Ya. I. Starobogatov: Pulmonata (Acroloxidae), Heterobranchia (Valvatidae) and Caenogastropoda (Viviparoidea, Truncatelloidea and Cerithioidea), Proceedings of the Zoological Institute RAS. 2017. No. 321 (3). P. 247–299.
- Starobogatov Ya. I. Prozorova L. A. Bogatov V. V. Saenko E. M. Identification guide of freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Mollusks, Pod red. P. Ya. Calolihina. T. 6. SPb.: Nauka, 2004. P. 9–491.
- Starobogatov Ya. I. Zatravkin M. N. Bithynioidae (Gastropoda, Pectinibranchia) of the USSR fauna, Mollyuski: rezul'taty i perspektivy ih issledovaniy: Avtoref. dokl. 8 Vsesoyuz. sovesch., Pod red. Ya. I. Starobogatova, A. N. Golikova, I. M. Lihareva L.: Nauka, 1987. P. 150–153.
- Stepanov L. N. Diversity of zoobenthos in reservoirs and watercourses of the basins of the rivers Setnaya and Ngoyakha (Yamal Peninsula, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug), Fauna Urala i Sibiri. 2016. No. 1. P. 90–104.
- Stepanov L. N. Zoobenthos of the lakes in the Baydarata River basin (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug), Fauna Urala i Sibiri. 2023. No. 2. P. 134–145.
- Vinarski M. V., Nekhaev I. O., Glöer P., von Proschwitz T. Type materials of freshwater gastropod species described by C.A. Westerlund and accepted in current malacological taxonomy: a taxonomic and nomenclatorial study, Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2013. Vol. 23, No. 2. P. 79–108.
- Vinarskiy M. V. Andreev N. I. Andreeva S. I. Karimov A. V. Lazutkina E. A. Latitudinal variability of the diversity of freshwater gastropods (Mollusca: Gastropoda) in the water bodies of Western Siberia, Biologiya vnutrennih vod. 2012. No. 1. P. 75–83.
- Vinarskiy M. V. Grebennikov M. E. Andreeva S. I. Lazutkina E. A. Aquatic gastropods (Mollusca: Gastropoda) of the Visim Nature Reserve and its surroundings, Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya OOPT Urala: Materialy nauch. prakt. konf. Ekaterinburg: OOO «UIPC», 2011. P. 82–85.
- Vinarskiy M. V. Karimov A. V. Gastropods (Gastropoda) of the Malaya Sosva Nature Reserve (Western Siberia), Ruthenica: Rus. Malacol. J. 2015. Vol. 25, No. 2. P. 25–35.



УДК 574.64

РАДИОСТИМУЛЯЦИЯ НИЗКИМИ ДОЗАМИ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЫШАЕТ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АККУМУЛЯЦИИ, СМЯГЧАЕТ СТРЕСС ОТ ИЗБЫТКА МЕДИ У ВОДНОГО РАСТЕНИЯ-ФИТОРЕМЕДИАТОРА РЯСКИ МАЛОЙ (*LEMNA MINOR* L.)

БОДНАРЬ
Ирина Сергеевна

кандидат биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, bodnar-irina@mail.ru

ЧЕБАН
Евгения Васильевна

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, gesha_lesik@mail.ru

Ключевые слова: малые дозы ионизирующего излучения медь фиторемедиация водоемов ряска малая

Аннотация: Ряска малая (*Lemna minor* L.) является умеренным аккумулятором меди с высоким процентом удаления из загрязненных вод, характеризуется высокой скоростью размножения преимущественно вегетативным путем, что позволяет использовать растения при фиторемедиации загрязненных водоемов. Однако эффективность очистки воды может снижаться из-за токсичности меди для ряски. Повышение аккумуляции и устойчивости растений к меди способствовало бы более эффективному удалению ионов из загрязненных вод. В данной работе исследуется возможность радиостимуляции – облучения в малых дозах (7 Гр) – для улучшения показателей роста и аккумуляции меди ряской в условиях избыточного содержания ионов меди (Cu^{2+}) (3, 5, 6 мкмоль/л) в водной среде. Показано, что малые дозы гамма-излучения способствовали повышению устойчивости ряски малой к избытку Cu^{2+} . У облученных растений, выращенных на избытке Cu^{2+} , по сравнению с растениями без облучения снизилась доля повреждений фрондов в виде хлорозов и/или некрозов на 10–24 % ($p \leq 0.05$). Содержание хлорофиллов $a + b$ после радиостимуляции стало выше на 14.5–17.2 % в зависимости от концентрации Cu^{2+} . Стимуляция растений малыми дозами не привела к изменению уровня малонового диальдегида у ряски после воздействия Cu^{2+} ($p \leq 0.05$). Накопление Cu^{2+} в сырой массе растений увеличилось на 16.7–19.4 % при сохранении на том же уровне скорости роста и средней площади фрондов ряски. Стимуляцию растений малыми дозами можно применять как способ повышения эффективности фиторемедиации при очистке загрязненных медью сточных промышленных и городских вод.

Рецензент: Л. Н. Ольшанская

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 27 ноября 2025 года

Подписана к печати: 27 марта 2025 года

Введение

Медь – тяжелый металл, встречается в пресноводных водоемах в виде простого вещества и ионов Cu^+ и Cu^{2+} (Varma, Misra, 2018). К источникам загрязнения медью относят добычу руды, отходы металлургических предприятий, промышленность, очистные сооружения, поверхностный сток (от транспорта, зданий и атмосферных осадков), сельское хозяйство и естественные процессы (Izydorczyk et al., 2021; Comber et al., 2022). Вследствие распространенности и опасности загрязнения гидросферы Cu^{2+} важно разработать недорогие, осуществимые и устойчивые технологии очистки сточных вод (Liu et al., 2023). Технологии удаления меди включают физико-химические методы, а также биологические методы, к которым относят биосорбцию, биоаккумуляцию и биоминерализацию, а также фиторемедиацию (Liu et al., 2023). Фиторемедиация – это эффективная технология очистки окружающей среды от различных органических и неорганических загрязнителей с использованием растений и связанных с ними микробов (Pilon-Smits, 2005). Одними из наиболее распространенных видов-фиторемедиаторов пресных водоемов являются растения семейства рясковые. Ряска малая – эврибионт, встречается повсеместно в пресноводных водоемах северного полушария (Vog et al., 2020). Ряска малая используется в токсикологических исследованиях, для фиторемедиации природных и сточных вод благодаря высокой репродуктивной скорости и способности поглощать различные металлы (Elmasi et al., 2009; Üçüncü et al., 2013). Ряска подходит для фиторемедиации водных экосистем, загрязненных Cu^{2+} , благодаря высоким показателям биоаккумуляции металла, простоте и дешевизне культивирования. Ряска является умеренным аккумулятором меди с высоким процентом ($\geq 90\%$) удаления из промышленных и муниципальных стоков (Bokhari et al., 2016). Однако, согласно Üçüncü et al. (2013), при фиторемедиации эффективность очистки вод может снижаться из-за высокой токсичности Cu^{2+} для ряски. Повышение аккумуляции и устойчивости растений к Cu^{2+} способствовало бы более эффективному удалению ионов из загрязненных вод.

Результаты экспериментов по комбинированному действию на ряску малую гамма-излучения в средних и больших дозах и Cu^{2+} показали, что накопление Cu^{2+} у предвари-

тельно облученных растений усиливается, но после облучения в больших дозах происходит угнетение темпов роста популяции (Bodnar, Cheban, 2022). Гамма-излучение относится к коротковолновым электромагнитным излучениям, которое возникает при радиоактивном распаде определенных элементов и обладает высокой проникающей способностью. Радиация оказывает влияние на морфологические, физиологические, биохимические, генетические и цитологические свойства клеток и тканей, а эффекты зависят от дозы и интенсивности воздействия (Kiani et al., 2022). Повышение толерантности растений к абиотическому стрессу возможно добиться посредством низких доз гамма-излучения (Zhang et al., 2016). Стимулирование стрессоустойчивости посредством малых доз радиации называется радиостимуляцией или радиопраймингом (Villegas et al., 2025). Радиостимуляция малыми дозами используется для повышения урожайности сельскохозяйственных растений, при этом усиливается скорость прорастания семян, ферментативная активность, усвоение питательных веществ, деление и рост клеток, что способствует стойкости к абиотическим и биотическим факторам (Katiyar et al., 2022).

Если для сельскохозяйственных культур важно получить в результате радиостимуляции улучшенную всхожесть семян и повышение урожайности культуры, то для растений-фиторемедиаторов необходимо, чтобы они накапливали большее количество металлов без ущерба для таких важных параметров, как скорость роста и биомасса. Предполагаем, что облучение ряски малыми дозами радиации будет способствовать лучшему накоплению металла, не оказывая негативного влияния на рост и развитие растений. Целью данной работы было изучение реакции растений ряски малой на действие гамма-излучения в малых дозах и избыток Cu^{2+} . Возможность использования ионизирующего излучения для повышения эффективности фиторемедиации загрязненных вод не изучена, но есть работы, в которых показано, что низкие дозы повышают устойчивость растений к тяжелым металлам (Wang et al., 2017). Изучение изменения поглощения тяжелых металлов после облучения имеет фундаментальное значение для токсикологии растений, радиоэкологии, на практике может применяться для фиторемедиации загрязненных водоемов, а также для фитодобычи.

Материалы

В работе использовали ряску малую (*Lemna minor* L.) из лабораторной культуры Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Растения выращивали на среде Штейнберга (Steinberg, 1946) в климатической камере Binder с контролем температуры (24 ± 0.1 °C) и режима освещения (16 часов день / 8 часов ночь) (OECD, 2006).

Методы

Условия эксперимента

Для эксперимента растения облучили в дозе 7 Гр на установке гамма-излучения с источником Cs^{137} («Исследователь», Россия) с мощностью дозы 0.74 Гр/мин. После облучения ряску промыли в дистиллированной воде и перенесли по 12 растений в стеклянные емкости с питательной средой, содержащей Cu^{2+} (3, 5 или 6 мкмоль/л) в виде $CuCl_2$. Эксперимент проводили в трех независимых повторностях (по 5 емкостей на вариант в каждой). В качестве контроля использовали растения без воздействия, выращенные на среде Штейнберга. На среде с Cu^{2+} растения культивировали в течение 7 дней. Рассматриваемые концентрации Cu^{2+} соответствуют реальному загрязнению водных объектов и приводят к угнетению роста ряски малой (Боднарь и др., 2018). У растений определяли удельную скорость роста, среднюю площадь фрондов, долю фрондов с повреждениями. Удельную скорость роста рассчитывали как отношение разности натуральных логарифмов числа фрондов в последние и первые сутки ко времени (OECD, 2006). Повреждение фрондов рассматривали как отношение фрондов с повреждениями (хлорозы, некрозы) к общему числу фрондов. Среднюю площадь фрондов рассчитывали по фотографиям с использованием программы Jmage J (NIH, USA).

Анализ содержания Cu^{2+} в растениях определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Для разложения растительных образцов (каждый по 500 мг) использовалась микроволновая минерализация HNO_3 и H_2O_2 . Анализ проводили в Экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Эксперимент проводили в трех независимых повторностях.

Определение хлорофиллов и каротиноидов

Хлорофиллы и каротиноиды определяли в сырой массе растений через четверо суток после начала эксперимента в спиртовой вытяжке спектрофотометрически при длинах волн 470, 649 и 664 нм, концентрацию рассчитывали по формуле (Lichtenthaler, 1987). Пробоподготовка включала измельчение растительного материала (25 мг) с кварцевым песком и карбонатом кальция и экстракцию 95 % водным раствором этанола. Эксперимент проводили в трех независимых повторностях (по 5 образцов свежей растительной ткани в каждой).

Определение малонового диальдегида (МДА)

Концентрацию МДА у растений определяли через четверо суток после начала эксперимента по методу, основанному на способности МДА реагировать с тиобарбитуровой кислотой в кислой среде при нагревании с образованием окрашенного триметинового комплекса, который можно измерить фотометрически по максимуму поглощения при 532 нм (Молекулярно-генетические и биохимические методы..., 2012). Навеску свежей растительной ткани (50 мг) высушивали при комнатной температуре, затем перетирали с кварцевым песком и добавляли 1.5 мл 20 % трихлоруксусной кислоты, далее центрифугировали в течение 15 мин при 10000 об./мин. После отбирали 0.3 мл супернатанта и добавляли 1.2 мл 0.5 % тиобарбитуровой кислоты в 20 % трихлоруксусной кислоте, нагревали при 95 °C в течение 30 мин, центрифугировали. Эксперимент повторяли три раза (по пять образцов на каждый вариант).

Статистическая обработка данных

Для анализа накопления Cu^{2+} рассчитывали коэффициент биоконцентрации (КБК), соотношение между содержанием элемента в сырой массе растений и начальным содержанием в среде (Vidakovic-Cifrec et al., 2015). Экспериментальные и контрольные группы сравнивали с использованием критериев Стьюдента и Манна – Уитни. Для оценки связи использовали коэффициент корреляции Пирсона (r). Статистический анализ выполнен с использованием программного пакета Statistica 6.0 (StatSoft, 2001).

Результаты

Облучение в малых дозах не привело к изменению темпов роста лабораторной культуры ряски малой, скорость роста не от-

личалась от контрольной ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента). Воздействие Cu^{2+} в концентрациях 3, 5, 6 мкмоль/л способствовало дозозависимому снижению удельной скорости ряски на 30, 43 и 55 % соответственно. Сравнение темпов роста показало, что скорость роста облученных и необлученных растений за 7 дней роста на среде с 3, 5, 6 мкмоль/л Cu^{2+} одинакова ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента).

Облученные растения были насыщенно зеленого цвета, уровень повреждений ряски после 7 Гр не отличался от контрольного и составлял ≤ 2 %. Cu^{2+} в рассматриваемых концентрациях приводила к росту доли повреждений фрондов в популяции (табл. 1). После однократного воздействия гамма-излучения снизился уровень повреждений фрондов у растений, которые выросли на среде с избытком Cu^{2+} ($p \leq 0.05$, критерий

Манна – Уитни). Значимый эффект радиостимуляции наблюдали при низкой концентрации Cu^{2+} (3 мкмоль/л). Уровень повреждений после облучения снизился на 24 % по сравнению с необлученными растениями. Популяции растений после 7 дней культивирования растений на 3 мкмоль/л Cu^{2+} отличались по цвету: ряска без облучения стала желто-зеленой, у облученных растений – светло-зеленой. У облученных растений уровень повреждений при действии 6 мкмоль/л Cu^{2+} снизился на 10 %, а при 5 мкмоль/л – на 14.5 % относительно необлученных растений.

Площадь фрондов после облучения в дозе 7 Гр соответствовала контрольным растениям ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента). У облученных и необлученных растений после недели воздействия Cu^{2+} площадь изменялась одинаково ($p \leq 0.05$).

Таблица 1. Сравнение основных параметров роста у ряски малой

Cu^{2+} , мкмоль/л	Удельная скорость роста, сутки ⁻¹		Повреждения фрондов, %		Площадь фрондов ($S_{\text{end}}/S_{\text{start}}$)	
	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением
0	0.3±0.004	0.29±0.003	0.56±0.14	0.55±0.15	0.97±0.023	0.93±0.18
3	0.21±0.005	0.209±0.003	27.5±1.5	20.8±1.3*	0.56±0.025	0.61±0.01
5	0.172±0.006	0.176±0.002	77.2±1.3	63.5±1.9*	0.52±0.019	0.52±0.09
6	0.159±0.003	0.157±0.005	100	79.4±1.7*	0.61±0.026	0.55±0.015

Примечание. * – отличия достоверны по сравнению с необлученными растениями, $p \leq 0.01$, критерий Стьюдента.

Концентрация хлорофиллов снизилась после воздействия Cu^{2+} (табл. 2). Радиостимуляцией удалось повысить уровень хлорофиллов у растений, растущих на избытке Cu^{2+} . У растений после радиостимуляции повысилось содержание хлорофилла а, суммы хлорофиллов а + b в сравнении с необлученными растениями в варианте с 3 мкмоль/л

Cu^{2+} на 14.5 и 17.2 % соответственно. Во всех остальных вариантах с избытком Cu^{2+} содержание хлорофиллов у облученных и необлученных растений одинаково ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента). Содержание каротиноидов снизилось при воздействии Cu^{2+} и совпадало у облученных и необлученных растений ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента).

Таблица 2. Содержание хлорофиллов и каротиноидов

Cu^{2+} , мкмоль/л	Хлорофилл а, мг/г сырого веса		Хлорофилл b, мг/г сырого веса		Хлорофилл а + b, мг/г сырого веса		Каротиноиды, мг/г сырого веса	
	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением
0	0.85±0.02	0.89±0.02	0.33±0.03	0.39±0.02	1.16±0.04	1.28±0.04	0.22±0.01	0.20±0.01
3	0.62±0.04	0.71±0.02*	0.31±0.02	0.35±0.02	0.93±0.05	1.09±0.04*	0.16±0.01	0.17±0.00
5	0.57±0.05	0.58±0.02	0.32±0.04	0.32±0.01	0.89±0.09	0.93±0.02	0.15±0.01	0.16±0.01
6	0.53±0.03	0.58±0.02	0.29±0.02	0.34±0.02	0.81±0.05	0.91±0.03	0.15±0.01	0.16±0.01

Примечание. * – отличия достоверны по сравнению с необлученными растениями, $p \leq 0.01$, критерий Стьюдента.

При действии Cu^{2+} повышалось содержание МДА, который является продуктом перекисного окисления липидов клеточных мембран, вследствие развития окислительного стресса (табл. 3). После облучения в дозе 7 Гр содержание МДА у растений соответство-

вало контрольному уровню. Катионы Cu^{2+} способствовали повышению уровня МДА ($p \leq 0.05$). Стимуляция растений малыми дозами не привела к снижению уровня МДА у ряски после воздействия Cu^{2+} .

Таблица 3. Концентрация малонового диальдегида (МДА)

Cu^{2+} , мкмоль/л	МДА, нмоль/г сырой массы	
	Без облучения	С облучением
0	9.4±1.4	10.1±1.8
3	19.5±1.1	18.7±1.5
5	47.7±1.6	45.56±1.7
6	56.75±1.6	52.4±1.7

Радиостимуляция способствовала большему накоплению Cu^{2+} в растениях по сравнению с растениями без облучения (табл. 4). Наиболее эффективно накапливали Cu^{2+} облученные растения при 6 мкмоль/л Cu^{2+} , наименее – при 3 мкмоль/л. Коэффициент

биоаккумуляции (БАК) Cu^{2+} увеличился у облученных растений на 16.8 % (с 208 до 243) после культивирования при 6 мкмоль/л Cu^{2+} , при концентрации меди 3 мкмоль/л Cu^{2+} – на 19.4 % (с 134 до 160).

Таблица 4. Содержание Cu^{2+} в растениях

Cu^{2+} в среде, мкмоль/л	Содержание Cu^{2+} в растениях, мг/кг сырой массы (коэффициент биоаккумуляции)	
	Без облучения	С облучением
3 (0.201 мг/л)	26.8±1 (134)	32±1.8 (160)*
5 (0.32 мг/л)	66.25±9.2 (207)	66.3±5 (207.2)
6 (0.403 мг/л)	84±4.1 (208)	98±5.9 (243)

Примечание. * – отличия достоверны по сравнению с необлученными растениями, $p \leq 0.05$, критерий Манна – Уитни.

Обсуждение

Повышение эффективности фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами водоемов с помощью ряски малой является актуальным направлением в биотехнологии и водной экотоксикологии. При использовании ряски в очистке сточных вод есть ограничения. Высокое накопление Cu^{2+} в биомассе вызывает токсичность, что внешне проявляется пожелтением фрондов (хлорозами) и приводит к снижению эффективности удаления Cu^{2+} (Al-Baldawi et al., 2022). Как было уже показано ранее (Боднарь и др., 2018) и подтверждено в данной работе, воздействие Cu^{2+} (3–6 мкмоль/л) привело к снижению удельной скорости роста популяции ряски, повышению уровня повреждений в виде хлорозов и/или некрозов фрондов в сравнении с контрольными растениями без обработки, уменьшению средней площади фрондов. Медь относится к тяжелым металлам, но в физиологических количествах является необходимым для роста и развития

растений элементом, т. к. входит в состав пластоцианина и цитохромоксидазы, ключевых белков для фотосинтеза и дыхания, необходимых для усвоения углерода и генерации АТФ (Singh et al., 2020; Raj et al., 2020; Singh et al., 2022). Ионы Cu^{2+} при избыточном поступлении оказывают отрицательное воздействие на растения, приводят к снижению роста, всхожести и прорастания семян, уменьшению размеров листьев, хлорозам, подавляют фотосинтез и провоцируют развитие окислительного стресса у растений (Mir et al., 2021). В загрязненных средах Cu^{2+} может вызывать нарушение поступления питательных веществ, физиологические, морфологические и биохимические изменения (Adrees et al., 2015). Ионы Cu^{2+} воздействуют на фотосистему II (ФСII), снижают содержание фотосинтетических пигментов и разрушают тилакоидные мембраны (Miras-Moreno et al., 2022).

Для улучшения эффективности аккумуляции и одновременно повышения устойчивости растений к Cu^{2+} использовали

однократное облучение в дозе 7 Гр. Низкие дозы гамма-излучения оказывают стимулирующее действие на растения, в отличие от высоких доз, вызывающих ингибирование роста (Villegas et al., 2023). Анализ зависимости доза – эффект показал, что угнетение скорости роста начинается от 11–18 Гр, поэтому 7 Гр можно отнести к малым дозам для ряски (Боднарь и др., 2016). В данном исследовании это подтвердилось, т. к. облучение в дозе 7 Гр не вызвало изменения скорости роста, снижения площади фрондов, отличного от контроля увеличения частоты появления некрозов и хлорозов ($p \leq 0.05$).

Предоблучение растений в дозе 7 Гр перед воздействием не способствовало повышению токсичности Cu^{2+} для ряски. Радиостимуляция, основанная на концепции гормезиса, предполагает, что низкие дозы стрессора вызывают полезные адаптивные реакции, повышая устойчивость растений к последующим, более интенсивным стрессорам (Villegas et al., 2023). В качестве положительного эффекта воздействия радиации в данном эксперименте можно рассматривать снижение повреждений фрондов от воздействия Cu^{2+} на 10–24 %, поэтому облучение в дозе 7 Гр можно считать стимулирующим. У растений явление радиационного гормезиса проявляется в виде усиления роста, ускоренного развития, повышения устойчивости к стрессорам или накопления интересующих соединений в ответ на облучение в низких дозах (Volkova et al., 2022). Воздействие радиации в малых дозах вызывает множественные модификации физиологических и биохимических процессов в растениях, например антиоксидантной ферментативной активности, веществ осмотической регуляции, сигнальных путей передачи и вторичных метаболитов, которые помогают растениям быстрее и эффективнее реагировать на повторяющийся стресс или передавать эту возможную защитную меру следующему поколению (Li et al., 2018; Zhang et al., 2023).

Увеличение уровня повреждений фрондов при воздействии Cu^{2+} связано со снижением содержания хлорофиллов ($r = -0.9$, $p \leq 0.005$). Ингибирующее воздействие на рост вызвано влиянием Cu^{2+} на процесс фотосинтеза, а именно снижением транспорта электронов к фотосистеме I, при этом большая часть поглощенной энергии рассеивается в

виде тепла из-за увеличения количества неактивных реакционных центров (Sigh et al., 2022). Предоблучение способствовало снижению уровня повреждений фрондов при 3 мкмоль/л Cu^{2+} , что согласуется с результатами по увеличению содержания хлорофиллов $a + b$. На ряске малой было показано, что низкие дозы хронического γ -облучения (27–1500 мГр/ч) повышают экспрессию генов, отвечающих за усиление фотосинтеза у *Lemna minor* (Van Hoesck et al., 2017).

Ряска малая способна аккумулировать Cu^{2+} из водной среды, что подтверждено исследованиями, проводимыми в естественных условиях (Panfili et al., 2017). Благодаря способности к аккумуляции, быстрому росту, неприхотливости к условиям данный вид используется в фиторемедиации природных и сточных вод с высоким содержанием Cu^{2+} (Копаксі, 2024). Для повышения аккумуляции меди и смягчения фитотоксического действия меди экспериментально исследованы различные варианты предварительной обработки растений, в т. ч. физические факторы, например воздействие электромагнитного излучения, а также биопрепараты (Арефьева и др., 2021; Miras-Morena et al., 2022). В данной работе анализ накопления Cu^{2+} в сырой массе растений показал, что после облучения имеется тенденция к повышению эффективности биоаккумуляции Cu^{2+} при сохранении ростовых характеристик популяции. Большому накоплению Cu^{2+} растений после радиостимуляции может способствовать снижение доли фрондов с хлорозами или некрозами. Эффективность накопления Cu^{2+} ряской повысилась на 19.4 % при 3 мкмоль/л Cu^{2+} , на 16.7 % – при 6 мкмоль/л Cu^{2+} .

Заключение

Облучение в малых дозах (7 Гр) не ухудшило характеристик роста популяции ряски, более того, можно отметить такие признаки смягчения фитостресса от избытка Cu^{2+} у растений, как снижение доли растений с поврежденными фрондами. Радиостимуляция способствовала увеличению накопления Cu^{2+} в растениях, выращенных на среде с избытком Cu^{2+} . Использование при фиторемедиации облученной в малых дозах ряска малой можно рекомендовать для повышения эффективности очищения загрязненных Cu^{2+} сточных и природных вод.

Библиография

- Арефьева О. А., Ольшанская Л. Н., Валиев Р. Ш. Изучение эффективности очистки водных сред ряской малой *Lemna minor* L. от солей тяжелых металлов с использованием энергии электромагнитных излучений и регенерации фиторемедианта // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 2. С. 84–97. DOI: 10.21685/2307-9150-2021-2-8
- Боднарь И. С., Чебан Е. В., Зайнуллин В. Г. Особенности воздействия ионов меди и стронция на ряску малую (*Lemna minor* L.) // Принципы экологии. 2018. № 2. С. 4–18. DOI: 10.15393/j1.art.2018.7402
- Боднарь И. С., Юшкова Е. А., Зайнуллин В. Г. Влияние γ -излучения на морфометрические характеристики ряски малой (*Lemna minor* L.) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 6. С. 617–622. DOI: 10.7868/S0869803116060035
- Молекулярно-генетические и биохимические методы в современной биологии растений / Под ред. Вл. В. Кузнецова, В. В. Кузнецова, Г. А. Романова. М., 2012. 487 с.
- Adrees M., Ali S., Rizwan M., Ibrahim M., Abbas F., Farid M., Zia-ur-Rehman M., Irshad M. K., Bharwana S. A. The Effect of Excess Copper on Growth and Physiology of Important Food Crops: A Review // Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. Vol. 22. P. 8148–8162. DOI: 10.1007/s11356-015-4496-5
- Al-Baldawi I. A., Yasin S. R., Jasim S. S., Abdullah S. R. S., Almansoori A. F., Ismail N. I. Removal of copper by *Azolla filiculoides* and *Lemna minor*: phytoremediation potential, adsorption kinetics and isotherms // Heliyon. 2022. Vol. 8, No 11. P. e11456. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11456
- Bodnar I. S., Cheban E. V. Combined action of gamma radiation and exposure to copper ions on *Lemna minor* L. // International Journal of Radiation Biology. 2022. Vol. 98, No 6. P. 1120–1129. DOI: 10.1080/09553002.2021.1894655
- Bog M., Sree K. S., Fuchs J., Hoang P. T., Schubert I., Kuever J., Rabenstein A., Paolacci S., Jansen M. A. K., Appenroth K.-J. A taxonomic revision of *Lemna* sect. *Uninerves* (*Lemnaceae*) // Taxon. 2020. Vol. 69, No 1. P. 56–66. DOI: 10.1002/tax.12188
- Bokhari S. H., Ahmad I., Mahmood-Ul-Hassan M., Mohammad A. Phytoremediation potential of *Lemna minor* L. for heavy metals // Int. J. Phytoremediation. 2016. Vol. 18. P. 25–32. DOI: 10.1080/15226514.1058331
- Comber S., Deviller G., Wilson I., Peters A., Merrington G., Borrelli P., Baken S. Sources of copper into the European aquatic environment // Integrated environmental assessment and management. 2022. Vol. 19, No 4. P. 1031–1047. DOI: 10.1002/ieam.4700
- Elmaci A., Özengin N., Yonar T. Removal of chromium (III), copper (II), lead (II) and zinc (II) using *Lemna minor* L. // Fresen Environ Bull. 2009. Vol. 18, No 5. P. 538–542.
- Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management // Environmental Research. 2021. Vol. 197. P. 111050. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111050
- Katiyar P., Pandey N., Keshavkant S. Gamma radiation: A potential tool for abiotic stress mitigation and management of agroecosystem // Plant Stress. 2022. Vol. 5. P. 100089. DOI: 10.1016/j.stress.2022.100089
- Kiani D., Borzouei A., Ramezanpour S., Soltanloo H., Saadati S. Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents // Scientific Reports. 2022. Vol. 12, No 1. P. 11082. DOI: 10.1038/s41598-022-14949-6
- Konakci N. Accumulation assessment of Mo^{4+} , Pb^{2+} , and Cu^{2+} in the acidic water of copper mines with *Lemna minor* and *Lemna gibba* // Water. 2024. Vol. 16, No 7. P. 975. DOI: 10.3390/w16070975
- Li X. N., Brestic M., Tan D. X., Zivcak M., Zhu X. C., Liu S. Q., Song F. B., Reiter R. J., Liu F. L. Melatonin alleviates low PS I-limited carbon assimilation under elevated CO_2 and enhances the cold tolerance of offspring in chlorophyll b-deficient mutant wheat // J. Pineal Res. 2018. Vol. 64, No 1. e12453. DOI: 10.1111/jpi.12453
- Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids; pigments of photosynthetic biomembranes // Method Enzymology. 1987. Vol. 148. P. 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
- Liu Y., Wang H., Cui Y., Chen N. Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2023. Vol. 20, No 5. P. 3885. DOI: 10.3390/ijerph20053885
- Mir A. R., Pichtel J., Hayat S. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil // Biometals. 2021. Vol. 34, No 4. P. 737–759. DOI: 10.1007/s10534-021-00306-z
- Miras-Moreno B., Senizza B., Regni L., Tolisano C., Proietti P., Trevisan M., Lucini L., Roupheal Y., Buono D. D. Biochemical Insights into the Ability of *Lemna minor* L. Extract to Counteract Copper Toxicity in Maize // Plants. 2022. Vol. 11, No 19. P. 1–15. DOI: 10.3390/plants11192613
- OECD Guidelines for the testing chemicals. *Lemna* sp. Growth Inhibition Test. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, 2006. DOI: 10.1787/9789264016194-en

- Panfili I., Bartucca M. L., Ballerini E., Del Buono D. Combination of aquatic species and safeners improves the remediation of copper polluted water // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 601–602. P. 1263–1270. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.003
- Pilon-Smits E. Phytoremediation // *Annu Rev Plant Biol*. 2005. Vol. 56. P. 15–39. DOI: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214
- Raj S., Singh H., Trivedi R., Soni V. Biogenic synthesis of AgNPs employing Terminalia arjuna leaf extract and its efficacy towards catalytic degradation of organic dyes // *Sci. Rep*. 2020. Vol. 10. P. 9616. DOI: 10.1038/s41598-020-66851-8
- Singh H., Kumar D., Soni V. Copper and mercury induced oxidative stresses and antioxidant responses of *Spirodela polyrhiza* (L.) // *Schleied. Biochem. Biophys. Rep*. 2020. Vol. 23. P. 100781. DOI: 10.1016/j.bbrep.2020.100781
- Singh H., Kumar D., Soni V. Performance of chlorophyll a fluorescence parameters in *Lemna minor* under heavy metal stress induced by various concentration of copper // *Sci Rep*. 2022. Vol. 12, No 1. P. 10620. DOI: 10.1038/s41598-022-14985-2
- StatSoft, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 6.0. Tulsa, OK, USA. 2001.
- Steinberg R. A. Mineral requirement of *Lemna minor* // *Plant Physiology*. 1946. Vol. 21. P. 42–48. DOI: 10.1104/pp.21.1.42
- Üçüncü E., Tunca E., Fikirdeşici Ş., Özkan A. D., Altındağ A. Phytoremediation of Cu, Cr and Pb Mixtures by *Lemna minor* // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2013. Vol. 91, No 5. P. 600–604. DOI: 10.1007/s00128-013-1107-3
- Van Hoeck A., Horemans N., Nauts R., Van Hees M., Vandenhove H., Blust R. *Lemna minor* plants chronically exposed to ionising radiation: RNA-seq analysis indicates a dose rate dependent shift from acclimation to survival strategies // *Plant Sci*. 2017. Vol. 257. P. 84–95. DOI: 10.1016/j.plantsci.2017.01.010
- Varma V. G., Misra A. K. Copper contaminated wastewater – An evaluation of bioremedial options // *Indoor and Built Environment*. 2018. Vol. 27, No 1. P. 84–95. DOI: 10.1177/1420326x16669397
- Vidaković-Cifrek Ž., Tkalec M., Šikić S., Tolić S., Lepeduš H., Pevalek-Kozlina B. Growth and photosynthetic responses of *Lemna minor* L. exposed to cadmium in combination with zinc or copper // *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*. 2015. Vol. 66, No 2. P. 141–152. DOI: 10.1515/aiht-2015-66-2618
- Villegas D., Sepúlveda C., Ly D. Use of low-dose gamma radiation to promote the germination and early development in seeds / Ed: E. Yildirim, S. Ermiş, E. Özden // *Seed Biology – New Advances*. 2023. P. 1–21. DOI: 10.5772/intechopen.1003137
- Villegas D., Sepúlveda-Hernández C., Salamé M. J., Poupin M. J. Enhancing growth and salinity stress tolerance in *Arabidopsis* with low-dose gamma radiation priming through a hormesis approach // *Plant Stress*. 2025. Vol. 16. P. 100834. DOI: 10.1016/j.stress.2025.100834
- Volkova P. Y., Bondarenko E. V., Kazakova E. A. Radiation hormesis in plants // *Current Opinion in Toxicology*. 2022. Vol. 30. P. 100334. DOI: 10.1016/j.cotox.2022.02.007
- Wang X., Ma R., Cui D., Cao Q., Shan Z., Jiao Z. Physio-biochemical and molecular mechanism underlying the enhanced heavy metal tolerance in highland barley seedlings pre-treated with low-dose gamma irradiation // *Sci. Rep*. 2017. Vol. 7. P. 14233. DOI: 10.1038/s41598-017-14601-8
- Zhang L., Zheng F., Qi W., Wang T., Ma L., Qiu Z., Li J. Irradiation with low-dose gamma ray enhances tolerance to heat stress in *Arabidopsis* seedlings // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 128. P. 181–188. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.025
- Zhang P., Yang H., Liu F., Li X. Stress Memories for Better Tolerance in Plants – A Potential Strategy for Crop Breeding // *Agronomy*. 2023. Vol. 13. P. 2105. DOI: 10.3390/agronomy13082105

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Формирование ответных реакций на действие малых доз ионизирующего излучения и механизмы трансформации форм нахождения радионуклидов в биосистемах (№ 125020501526-3)».

RADIOSTIMULATION WITH LOW DOSES OF Γ -RADIATION INCREASES THE EFFICIENCY OF ACCUMULATION AND ALLEVIATES STRESS FROM EXCESS COPPER IN THE AQUATIC PLANT-PHYTOREMEDIATOR *LEMNA MINOR* L.

BODNAR
Irina Sergeevna

PhD, Institute of Biology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russia, bodnar-irina@mail.ru

CHEBAN
Evgenia Vasilevna

Institute of Biology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russia, gesha_lesik@mail.ru

Key words:

low doses of ionizing radiation
copper
phytoremediation of water bodies
duckweed

Summary: Due to the prevalence and severity of copper pollution in the hydrosphere, it is important to develop affordable, feasible, and sustainable wastewater treatment technologies (Liu et al., 2023). Phytoremediation is an effective technology for environmental remediation of various organic and inorganic pollutants using plants and associated microbes (Pilon-Smits, 2005). Duckweed is suitable for phytoremediation of copper-contaminated aquatic ecosystems due to its high bioaccumulation rates and ease of cultivation. Duckweed is a moderate copper accumulator with a high percentage ($\geq 90\%$) of removal from wastewater (Bokhary et al., 2016). However, the effectiveness of phytoremediation may be reduced by copper's high toxicity for duckweed (Ucuncu et al., 2013). Plant tolerance to abiotic stress can be increased using low doses of gamma radiation (Zhang et al., 2016). Stimulating stress resistance with low doses of radiation is called radiostimulation or radioprimering (Villegas et al., 2025). We hypothesized that irradiating duckweed with low doses of radiation would promote metal accumulation without adversely affecting plant growth and development. The use of ionizing radiation to enhance the effectiveness of polluted water phytoremediation was not studied, but some studies have shown that low doses increase plant tolerance to heavy metals (Wang et al., 2017). Studying changes in heavy metal absorption after irradiation is of fundamental importance for plant toxicology and radioecology and can be applied in practice to the phytoremediation of polluted water bodies. A duckweed culture was grown on Steinberg's medium (Steinberg, 1946) in a climate chamber with controlled temperature (24 ± 0.1 °C) and lighting (16 hours day/8 hours dark) (OECD, 2006). For the experiment, the plants were irradiated with 7 Gy using a gamma-irradiation system with a Cs137 source at a dose rate of 0.74 Gy/min. After irradiation, the plants were rinsed in distilled water, and 12 plants were transferred to five glass containers for each treatment with Steinberg's medium containing Cu^{2+} (3, 5, or 6 $\mu\text{mol/L}$) as CuCl_2 . The experiments were repeated three times. Pre-irradiation of plants with 7 Gy before exposure did not increase Cu^{2+} toxicity to duckweed. After irradiation, the growth rate and frond area remained at the same level as non-irradiated plants grown only in excess Cu^{2+} ($p \leq 0.05$). A 10–24 % reduction in frond damage from Cu^{2+} exposure can be considered a positive effect of radiation exposure in this experiment; therefore, irradiation at a dose of 7 Gy can be considered stimulating. An increase in the level of frond damage under Cu^{2+} exposure is associated with a decrease in chlorophyll content ($r = -0.9$, $p \leq 0.005$). In plants exposed to radiostimulation, the content of chlorophyll a and the sum of chlorophylls a+b increased by 14.5 % and 17.2 %, respectively, compared to non-irradiated plants in the variant with 3 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} . Radiostimulation contributed to a greater accumulation of Cu^{2+} in plants compared to unirradiated plants. Irradiated plants accumulated Cu^{2+} most effectively at 6 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} , and the least effectively at 3 $\mu\text{mol/L}$. The accumulation efficiency increased by 19.4 % at 3 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} and 16.7 % at 6 $\mu\text{mol/L}$ Cu^{2+} . The greater accumula-

tion of Cu^{2+} in plants after radiostimulation may be due to a decrease in the proportion of fronds with chlorosis and/or necrosis. Thus, low-dose irradiation (7 Gy) did not impair the growth characteristics of duckweed, but rather increased Cu^{2+} accumulation in plants. The duckweed irradiated with a low-dose in phytoremediation can be used to improve the efficiency of copper-contaminated wastewater and natural water treatment.

Reviewer: L. N. Olshanskaya

Received on: 27 November 2025

Published on: 27 March 2025

References

- Üçüncü E., Tunca E., Fikirdeşici Ş., Özkan A. D., Altındağ A. Phytoremediation of Cu, Cr and Pb Mixtures by *Lemna minor*, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2013. Vol. 91, No 5. P. 600–604. DOI: 10.1007/s00128-013-1107-3
- Adrees M., Ali S., Rizwan M., Ibrahim M., Abbas F., Farid M., Zia-ur-Rehman M., Irshad M. K., Bharwana S. A. The Effect of Excess Copper on Growth and Physiology of Important Food Crops: A Review, Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. Vol. 22. P. 8148–8162. DOI: 10.1007/s11356-015-4496-5
- Al-Baldawi I. A., Yasin S. R., Jasim S. S., Abdullah S. R. S., Almansoori A. F., Ismail N. 'I. Removal of copper by *Azolla filiculoides* and *Lemna minor*: phytoremediation potential, adsorption kinetics and isotherms, Heliyon. 2022. Vol. 8, No 11. P. e11456. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11456
- Aref'eva O. A. Ol'shanskaya L. N. Valiev R. Sh. The study of the effectiveness of purification of aquatic environments with duckweed small *Lemna minor* L. of heavy metal salts using electromagnetic radiation energy and phytoremediant regeneration., Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki. 2021. No. 2. P. 84–97. DOI: 10.21685/2307-9150-2021-2-8
- Bodnar I. S., Cheban E. V. Combined action of gamma radiation and exposure to copper ions on *Lemna minor* L., International Journal of Radiation Biology. 2022. Vol. 98, No 6. P. 1120–1129. DOI: 10.1080/09553002.2021.1894655
- Bodnar' I. S. Cheban E. V. Zaynullin V. G. Features of the effect of copper and strontium ions on the laboratory culture of duckweed (*Lemna minor* L.), Principy ekologii. 2018. No. 2. P. 4–18. DOI: 10.15393/j1.art.2018.7402
- Bodnar' I. S. Yushkova E. A. Zaynullin V. G. Effect of γ -radiation on morphometric characteristics of duckweed (*Lemna minor* L.), Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. 2016. T. 56, No. 6. P. 617–622. DOI: 10.7868/S0869803116060035
- Bog M., Sree K. S., Fuchs J., Hoang P. T., Schubert I., Kuever J., Rabenstein A., Paolacci S., Jansen M. A. K., Appenroth K, J. A taxonomic revision of *Lemna* sect. *Uninerves* (Lemnaceae), Taxon. 2020. Vol. 69, No 1. P. 56–66. DOI: 10.1002/tax.12188
- Bokhari S. H., Ahmad I., Mahmood-Ul-Hassan M., Mohammad A. Phytoremediation potential of *Lemna minor* L. for heavy metals, Int. J. Phytoremediation. 2016. Vol. 18. P. 25–32. DOI: 10.1080/15226514.1058331
- Comber S., Deviller G., Wilson I., Peters A., Merrington G., Borrelli P., Baken S. Sources of copper into the European aquatic environment, Integrated environmental assessment and management. 2022. Vol. 19, No 4. P. 1031–1047. DOI: 10.1002/ieam.4700
- Elmaci A., Özençin N., Yonar T. Removal of chromium (III), copper (II), lead (II) and zinc (II) using *Lemna minor* L., Fresen Environ Bull. 2009. Vol. 18, No 5. P. 538–542.
- Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management, Environmental Research. 2021. Vol. 197. P. 111050. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111050
- Katiyar P., Pandey N., Keshavkant S. Gamma radiation: A potential tool for abiotic stress mitigation and management of agroecosystem, Plant Stress. 2022. Vol. 5. P. 100089. DOI: 10.1016/j.stress.2022.100089
- Kiani D., Borzouei A., Ramezanpour S., Soltanloo H., Saadati S. Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents, Scientific Reports. 2022. Vol. 12, No 1. P. 11082. DOI: 10.1038/s41598-022-14949-6
- Konacki N. Accumulation assessment of Mo^{4+} , Pb^{++} , and Cu^{++} in the acidic water of copper mines with *Lemna minor* and *Lemna gibba*, Water. 2024. Vol. 16, No 7. P. 975. DOI: 10.3390/w16070975
- Li X. N., Brestic M., Tan D. X., Zivcak M., Zhu X. C., Liu S. Q., Song F. B., Reiter R. J., Liu F. L. Melatonin alleviates low PS I-limited carbon assimilation under elevated CO_2 and enhances the cold tolerance of offspring in chlorophyll b-deficient mutant wheat, J. Pineal Res. 2018. Vol. 64, No 1. e12453. DOI: 10.1111/jpi.12453
- Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids; pigments of photosynthetic biomembranes, Method Enzymology. 1987. Vol. 148. P. 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

- Liu Y., Wang H., Cui Y., Chen N. Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review, Int. J. Environ. Res. Public Health. 2023. Vol. 20, No 5. P. 3885. DOI: 10.3390/ijerph20053885
- Mir A. R., Pichtel J., Hayat S. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil, Biometals. 2021. Vol. 34, No 4. P. 737–759. DOI: 10.1007/s10534-021-00306-z
- Miras-Moreno B., Senizza B., Regni L., Tolisano C., Proietti P., Trevisan M., Lucini L., Roupheal Y., Buono D. D. Biochemical Insights into the Ability of *Lemna minor* L. Extract to Counteract Copper Toxicity in Maize, Plants. 2022. Vol. 11, No 19. P. 1–15. DOI: 10.3390/plants11192613
- Molecular-genetic and biochemical methods in modern plant biology, Pod red. Vl. V. Kuznecova, V. V. Kuznecova, G. A. Romanova. M., 2012. 487 p.
- OECD Guidelines for the testing chemicals. Lemna sp. Growth Inhibition Test. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, 2006. DOI: 10.1787/9789264016194-en
- Panfili I., Bartucca M. L., Ballerini E., Del Buono D. Combination of aquatic species and safeners improves the remediation of copper polluted water, Science of The Total Environment. 2017. Vol. 601–602. P. 1263–1270. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.003
- Pilon-Smits E. Phytoremediation, Annu Rev Plant Biol. 2005. Vol. 56. P. 15–39. DOI: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214
- Raj S., Singh H., Trivedi R., Soni V. Biogenic synthesis of AgNPs employing Terminalia arjuna leaf extract and its efficacy towards catalytic degradation of organic dyes, Sci. Rep. 2020. Vol. 10. P. 9616. DOI: 10.1038/s41598-020-66851-8
- Singh H., Kumar D., Soni V. Copper and mercury induced oxidative stresses and antioxidant responses of Spirodela polyrhiza (L.), Schleid. Biochem. Biophys. Rep. 2020. Vol. 23. P. 100781. DOI: 10.1016/j.bbrep.2020.100781
- Singh H., Kumar D., Soni V. Performance of chlorophyll a fluorescence parameters in *Lemna minor* under heavy metal stress induced by various concentration of copper, Sci Rep. 2022. Vol. 12, No 1. P. 10620. DOI: 10.1038/s41598-022-14985-2
- Steinberg R. A. Mineral requirement of Lemna minor, Plant Physiology. 1946. Vol. 21. P. 42–48. DOI: 10.1104/pp.21.1.42
- Van Hoek A., Horemans N., Nauts R., Van Hees M., Vandenhove H., Blust R. *Lemna minor* plants chronically exposed to ionising radiation: RNA-seq analysis indicates a dose rate dependent shift from acclimation to survival strategies, Plant Sci. 2017. Vol. 257. P. 84–95. DOI: 10.1016/j.plantsci.2017.01.010
- Varma V. G., Misra A. K. Copper contaminated wastewater – An evaluation of bioremedial options, Indoor and Built Environment. 2018. Vol. 27, No 1. P. 84–95. DOI: 10.1177/1420326x16669397
- Vidaković-Cifrek Ž., Tkalec M., Šikić S., Tolić S., Lepeduš H., Pevalek-Kozlina B. Growth and photosynthetic responses of *Lemna minor* L. exposed to cadmium in combination with zinc or copper, Arhiv za higijenu rada i toksikologiju. 2015. Vol. 66, No 2. P. 141–152. DOI: 10.1515/aiht-2015-66-2618
- Villegas D., Sepúlveda C., Ly D. Use of low-dose gamma radiation to promote the germination and early development in seeds, Ed: E. Yıldırım, S. Ermiş, E. Özden, Seed Biology – New Advances. 2023. P. 1–21. DOI: 10.5772/intechopen.1003137
- Villegas D., Sepúlveda-Hernández C., Salamé M. J., Poupin M. J. Enhancing growth and salinity stress tolerance in Arabidopsis with low-dose gamma radiation priming through a hormesis approach, Plant Stress. 2025. Vol. 16. P. 100834. DOI: 10.1016/j.stress.2025.100834
- Volkova P. Y., Bondarenko E. V., Kazakova E. A. Radiation hormesis in plants, Current Opinion in Toxicology. 2022. Vol. 30. P. 100334. DOI: 10.1016/j.cotox.2022.02.007
- Wang X., Ma R., Cui D., Cao Q., Shan Z., Jiao Z. Physio-biochemical and molecular mechanism underlying the enhanced heavy metal tolerance in highland barley seedlings pre-treated with low-dose gamma irradiation, Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 14233. DOI: 10.1038/s41598-017-14601-8
- Zhang L., Zheng F., Qi W., Wang T., Ma L., Qiu Z., Li J. Irradiation with low-dose gamma ray enhances tolerance to heat stress in Arabidopsis seedlings, Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016. Vol. 128. P. 181–188. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.025
- Zhang P., Yang H., Liu F., Li X. Stress Memories for Better Tolerance in Plants – A Potential Strategy for Crop Breeding, Agronomy. 2023. Vol. 13. P. 2105. DOI: 10.3390/agronomy13082105
- Компьютерная программа. Tulsa, OK, USA. 2001.



УДК 574.24

АКСАНТИЗМ У КРАСНОБРЮХОЙ ЖЕРЛЯНКИ (*BOMBINA BOMBINA*) ИЗ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

ЛЕБЕДИНСКИЙ
Андрей Артемьевич

кандидат биологических наук, Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, leb-nn@yandex.ru

Ключевые слова:

краснобрюхая жерлянка
аксантизм

Аннотация: Работа содержит информацию о случае аксантизма у краснобрюхой жерлянки (*Bombina bombina* L., 1761), пойманной в мае 2019 г. в Нижегородской области. Обнаруженная аномалия проявляется в отсутствии характерных для этого вида бесхвостых земноводных красных или оранжевых пятен в окраске нижней части туловища, ног и головы.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: А. П. Кутенков

Подписана к печати: 27 марта 2025 года

Введение

Аномалии окраски различных видов бесхвостых амфибий неоднократно описывались разными авторами. Так, Флиндт (Flindt, 1985) отмечает случай отсутствия пигментации яиц зеленой жабы, проследившая их развитие до стадии сеголеток и констатируя формирование у них обычной для этого вида окраски. Аллан и Гудман (Allan, Goodman, 2017) описывают аксантизм, обнаруженный у одной из травяных лягушек, пойманных на территории Великобритании. Коленда с соавторами (Kolenda et al., 2017) рассматривают различные варианты цветовых aberrаций и аномалий окраски у ряда видов амфибий и рептилий, встречающихся на территории Польши. Миура (Miura, 2018) дает обзор аномалий окраски нескольких видов бесхвостых амфибий, обитающих в Японии, и анализирует особенности их генетической обусловленности. Брингс (Bringsoe, 2022) описывает случаи альбинизма и пиебалдизма (частичного альбинизма) у травяных лягушек на территории Дании. Гуарабыра и Карвалхо (Guarabyra, Carvalho-e-Silva, 2023) рассматривают встреченные ими в Бразилии варианты морфологических аномалий жаб рода *Rhinella*, включая и патологии по окраске. Таким образом, случаи аномалий окраски бесхвостых амфибий в целом

не обделены вниманием исследователей. В то же время публикаций, так или иначе связанных с проявлениями отклонений в окраске жерлянок рода *Bombina*, нами обнаружено не было. Можно сослаться лишь на один интернет-источник (m.vk.com/wall-12140902_59482), где приводится информация об интересном варианте окраски дальневосточной жерлянки *Bombina orientalis* – в результате аксантизма типичная для этого вида фоновая зеленая окраска верхней части туловища меняется на ярко-голубую. Такие жерлянки культивируются террариумистами.

Материалы

Материалом для данной работы послужила краснобрюхая жерлянка аномальной окраски, пойманная в одном из водоемов окрестностей г. Дзержинска Нижегородской области 19 мая 2019 г. Это был самец характерного для половозрелых особей размера, длина его тела составляла 5.2 см (Банников и др., 1977).

Методы

Сбор полевого батрахологического материала, в процессе которого была поймана жерлянка, проводился в поздневечернее время с использованием электрических фонарей. Амфибии, в зависимости от обстоя-

тельств, ловились руками или гидрологическим сачком. Водоем, вдоль береговой линии которого пролегал маршрут, представляет собой достаточно старый пруд противопожарного назначения, размером примерно 30 × 15 м, с высокими, круто уходящими в воду берегами, сформированными за счет отвалов грунта, образовавшихся при создании котлована. С северо-восточной стороны пруда находится забор территории садового товарищества, с остальных сторон он окружен смешанным лесом. Никаких признаков или источников возможного антропогенного загрязнения водоема визуально не обнаружено. После поимки жерлянка была сфотографирована, измерена с помощью штангенциркуля и отпущена обратно в водоем.

Результаты

При поимке была отмечена необычная окраска нижней части головы, туловища и конечностей, где имеется типичный для это-

го вида белый крап на черном фоне, но полностью отсутствуют не менее характерные оранжевые или красные пятна (рис. 1), являющиеся элементами демонстрационной окраски, связанной с особой ядовитостью кожных выделений.

Очевидно, что в данном случае мы сталкиваемся с аксантизмом, т. е. с отсутствием в кожных покровах ксантофоров и обычно сопутствующих им эритрофоров. При этом интересно, что, в отличие от упомянутого выше случая с дальневосточной жерлянкой, в окраске верхней части туловища это никак не проявляется и она ничем не отличается от обычной для краснобрюхой жерлянки, сочетающая оливковые, темно-серые и черные тона (рис. 2). Возможно, у данной жерлянки отсутствуют и иридофоры, которые не содержат пигментов, но могут влиять на окраску благодаря свойственной им способности преломлять световые лучи.



Рис. 1. Аномальная окраска нижней части головы, туловища и конечностей краснобрюхой жерлянки
Fig. 1. Abnormal coloration of the lower part of the head, trunk, and limbs of the fire-bellied toad



Рис. 2. Окраска верхней части головы, туловища и конечностей краснобрюхой жерлянки
Fig. 2. Coloration of the upper part of the head, trunk, and limbs of the fire-bellied toad

Заключение

По сути дела, в данном случае мы сталкиваемся с отсутствием демонстрационной (предостерегающей) окраски, свойственной жерлянкам, что, тем не менее, не повлияло на выживаемость этой амфибии, достигшей

размеров и, соответственно, возраста взрослой половозрелой особи. Очевидно, что для ответа на все возникающие в связи с данной находкой вопросы целесообразна дальнейшая фиксация подобных фактов и их более детальный анализ.

Библиография

- Банников А. Г., Даревский И. С., Ищенко В. Г., Рустамов А. К., Щербак Н. Н. Определитель земноводных и пресмыкающихся фауны СССР. М.: Просвещение, 1977. 203 с.
- Allan S. J. R., Goodman M. J. A case of xanthochromism in the common frog (*Rana temporaria*) // The Herpetological Bulletin 139. 2017. P. 39–40.
- Bringsoe H. Albinisme, sorte øjne, piebaldisme og ungedragter ved Budsnudet Frø *Rana temporaria* // Nordisk Herpetologisk Forening. 2022. Argang 63. Udgave 1. P. 81–91.
- Flindt R. Lalenter Albinismus und Mißbildungen bei Kaulquappen von Wechselkröten *Bufo viridis* Laurenti, 1768 (Balientia: Bufonidae) // Salamandra. 1985. Vol. 21. P. 298–303.
- Guarabyra B., Carvalho-e-Silva S. P. Records on morphological abnormalities in two *Rhinella* species from southeastern Brazil // Herpetology Notes. 2023. Vol. 16. P. 91–94.
- Kolenda K., Najbar B., Kaczmarek P., Kaczmarek P., Kaczmarek T. Rare color aberrations and anomalies of amphibians and reptiles recorded in Poland // Herpetology Notes. 2017. Vol. 10. P. 103–109.
- Miura I. Anomalies in the coloration of Japanese amphibians and their applications in genetic research // The Second International conference "Amphibian and reptiles anomalies and pathology: methodology, evolutionary significance, monitoring and environmental health", KnE Life Sciences. 2018. P. 97–107. DOI: 10.18502/kl.v4i3.2110

AXSANTHISM IN THE FIRE-BELLIED TOAD (*BOMBINA BOMBINA*) FROM THE NIZHNY NOVGOROD REGION

**LEBEDINSKY
Andrey Artemievich**

*PhD, Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky, 23,
Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603022, Russia, leb-nn@yandex.ru*

Key words:

fire-bellied toad
axanthism

Summary: The work contains information about a case of axanthism in a fire-bellied toad (*Bombina bombina* L., 1761) caught in the Nizhny Novgorod region in May 2019. The found anomaly is manifested in the absence of red or orange spots characteristic of this species of tailless amphibians in the coloration of the lower body, legs and head. At the same time, the coloration of the upper part of the body of this individual is not anomalous; it is completely typical for the fire-bellied toad.

Reviewer: A. P. Kutenkov

Received on: 03 November 2025

Published on: 27 March 2025

References

- Allan S. J. R., Goodman M. J. A case of xanthochromism in the common frog (*Rana temporaria*), The Herpetological Bulletin 139. 2017. P. 39–40.
- Bannikov A. G. Darevskiy I. S. Ischenko V. G. Rustamov A. K. Scherbak N. N. Identification guide of amphibian and reptile fauna of the USSR. M.: Prosveschenie, 1977. 203 p.
- Bringsoe H. Albinisme, sorte øjne, piebaldisme og ungedragter ved Budsnudet Frø *Rana temporaria*, Nordisk Herpetologisk Forening. 2022. Argang 63. Udgave 1. P. 81–91.
- Flindt R. Lalenter Albinismus und Mißbildungen bei Kaulquappen von Wechselkröten *Bufo viridis* Laurenti, 1768 (Balientia: Bufonidae), Salamandra. 1985. Vol. 21. P. 298–303.
- Guarabyra B., Carvalho-e-Silva S. P. Records on morphological abnormalities in two *Rhinella* species from southeastern Brazil, Herpetology Notes. 2023. Vol. 16. P. 91–94.
- Kolenda K., Najbar B., Kaczmarek P., Kaczmarek T. Rare color aberrations and anomalies of amphibians and reptiles recorded in Poland, Herpetology Notes. 2017. Vol. 10. P. 103–109.
- Miura I. Anomalies in the coloration of Japanese amphibians and their applications in genetic research, The Second International conference «Amphibian and reptiles anomalies and pathology: methodology, evolutionary significance, monitoring and environmental health», KnE Life Sciences. 2018. P. 97–107. DOI: 10.18502/kls.v4i3.2110



УДК 57.574.5

СТРУКТУРА И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАС- ПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА ВЫБОРГ- СКОГО ЗАЛИВА В XXI ВЕКЕ

ЛЯШЕНКО

Оксана Александровна

кандидат биологических наук, Санкт-Петербургский филиал
ВНИРО, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 26,
lyashenko_oa@niorh.vniro.ru

Ключевые слова:
Балтийское море
Финский залив
Выборгский залив
фитопланктон
структура
биомасса
пространственное
распределение

Аннотация: Исследования фитопланктона Выборгского залива Балтийского моря проводили для оценки его структуры и уровня количественного развития в XXI в. на фоне проводившихся крупномасштабных гидротехнических работ. Представлены и проанализированы результаты исследований фитопланктона верхней, средней и нижней частей залива в пространственном и временном аспектах в 2000–2024 гг. Пробы отбирали из трофогенного слоя (глубиной три прозрачности по диску Секки) через каждый метр, интегральную пробу фиксировали раствором Люголя с добавлением уксусной кислоты и формалина, концентрировали фильтрационным методом. Результаты исследований показали, что при сходстве таксономического состава и структуры фитопланктона различные части залива характеризуются определенной спецификой его развития. Так, максимальные величины биомассы в верхней части отмечены в середине лета, а в нижней и средней – в весенний период. В целом для Выборгского залива биомасса весеннего фитопланктона варьировалась в пределах 0.23–12.18 г/м³, преобладали преимущественно диатомовые, в отдельные годы – также динофитовые, летом при величинах биомассы в диапазоне 0.33–17.66 г/м³ ее основу составляли преимущественно цианобактерии. Осенью биомасса фитопланктона залива составляла от 0.12 до 3.35 г/м³, в нижней и средней частях залива преобладали цианобактерии, в верхней – диатомовые. Среднюю часть залива, где отмечались наибольшие биомассы фитопланктона, можно охарактеризовать как эвтрофную. Верхнюю часть залива, принимающую воды Сайменского канала, и нижнюю часть, прилегающую к глубоководному району восточной части Финского залива, – как мезотрофные. В годы исследований количественные показатели развития фитопланктона залива и его структура были сходны с отмечавшимися в конце XX в. Проводившиеся в XXI в. крупномасштабные гидротехнические работы не привели к изменениям количественного развития фитопланктона и структуры его доминирующего комплекса.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 22 декабря 2025 года

Подписана к печати: 01 апреля 2026 года

Введение

Настоящая работа – обобщение данных о фитопланктоне Выборгского залива в период интенсивного антропогенного воздействия в XXI в. и оценка его структуры, количественного развития и пространственного распределения.

Выборгский залив – самый крупный (площадь 450 км²) из заливов второго порядка

восточной части Финского залива, вдается в сушу в северо-восточном направлении на 60 км, его береговая линия сильно изрезана, акватория состоит из ряда мелководных бухт с большим количеством островов.

Акватория Выборгского залива делится на три части: верхнюю, среднюю и нижнюю (таблица).

Характеристики частей Выборгского залива (Терешенкова, 2006; Дроздов, Коробков, 2010)

Часть	Площадь, км ²	Преобладающие глубины, м	Доля островов в общей площади, %	Прозрачность воды в литорали, м	Соленость в верхнем горизонте, ‰
Верхняя	140	3.5–4.0	21	до 1.0	0–3.0
Средняя	160	10	16	до 2.0	1.5–2.0
Нижняя	120	25–30	2	до 3.5	2.3–4.0

Верхняя часть занимает акваторию от места впадения Сайменского канала до разреза за пос. Советский – пос. Подборовье (рис. 1). Сложность очертаний береговой линии обусловила замедленный водообмен акватории этого района с другими частями залива.

Здесь расположен подходной фарватер Сайменского канала, связывающий оз. Сайма с Финским заливом, и верхняя часть залива испытывает значительное распресняющее воздействие от поступления его водных масс.

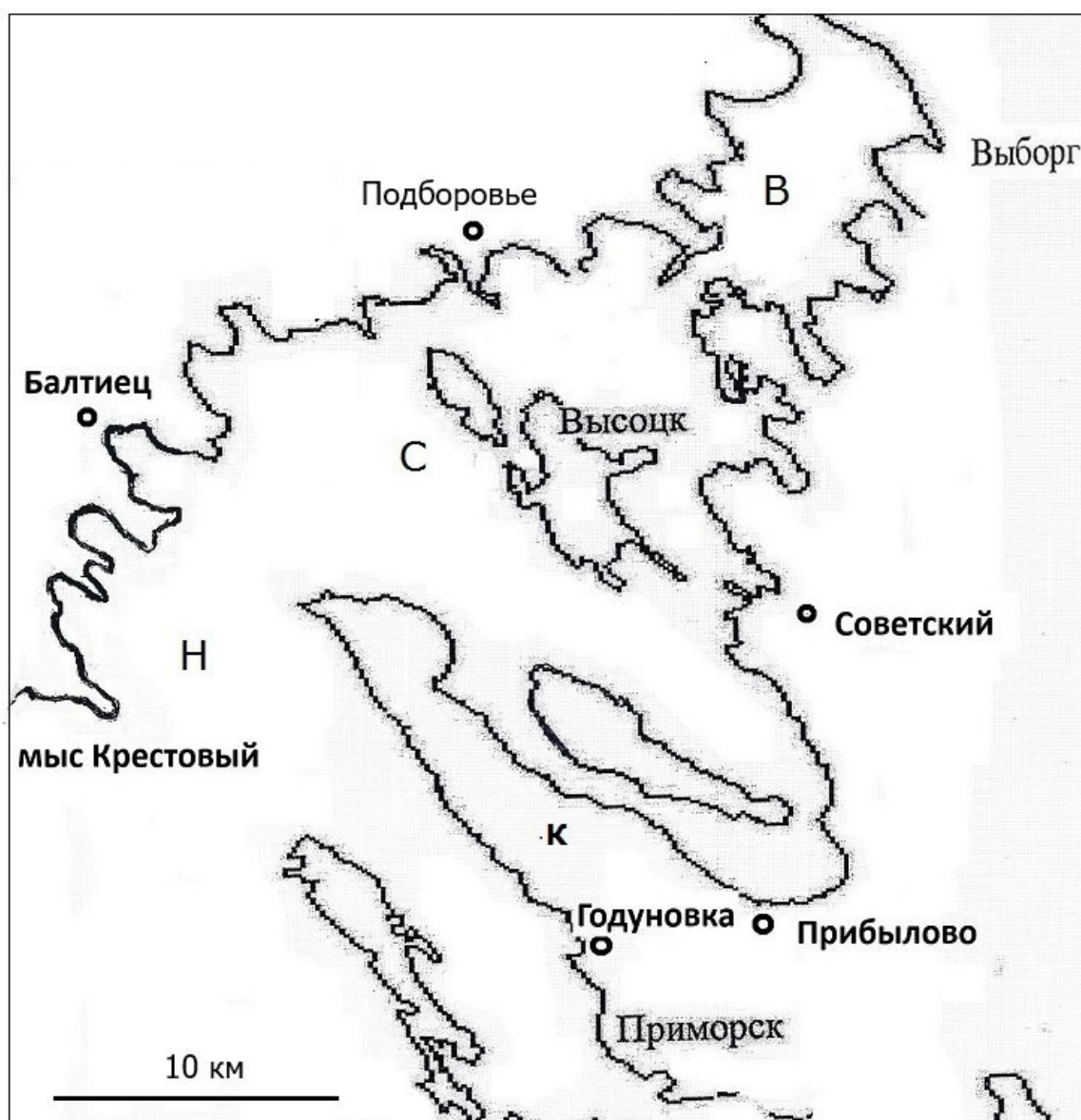


Рис. 1. Схема Выборгского залива Балтийского моря: В – верхняя часть; С – средняя часть; Н – нижняя часть; К – полуостров Киперорт

Fig. 1. Scheme of the Vyborg Bay of the Baltic Sea: V – upper part; C – middle part; N – lower part; K – Kiperort Peninsula

Средняя часть распространяется на юг до разреза пос. Прибылово – мыс севернее залива Балтиец (см. рис. 1), что совпадает с наиболее узкой частью акватории залива (ширина 6 км). Полуостров Киперорт, вытянутый в северном направлении, перегородивает залив и ограничивает проникновение солоноватых вод из нижней части в среднюю. В то же время пресный сток здесь меньше, чем в верхней части, и соленость несколько выше (см. таблицу).

Нижняя часть ограничена от открытой акватории восточной части Финского залива разрезом пос. Годуновка – мыс Крестовый. Доля акватории, занятая островами, минимальна. В наибольшей степени испытывает влияние вод открытой части Финского залива.

Режим солености Выборгского залива не стабилен и определяется сгонно-нагонными перемещениями осолоненных вод Финского залива, а также распресняющим влиянием Сайменского канала и многочисленных притоков. В целом залив характеризуется соленостью от 0 до 4 ‰ и может быть отнесен к акваториям эстуарного типа.

Морфология и гидрологические особенности залива обуславливают значительную гетерогенность условий обитания гидробионтов, в частности планктонных водорослей, в то же время его фитопланктон недостаточно изучен по сравнению с другими заливами второго порядка восточной части Финского залива, первые данные эпизодичны и относятся к концу XX в. (Макарова, 1997; Терешенкова, 2006; Экосистема..., 2008).

Единственная станция государственного мониторинга расположена в нижней части Выборгского залива на границе с глубоководным районом Финского залива, данные о фитопланктоне основной его акватории не имеют систематического характера и получены преимущественно в связи с мониторинговыми исследованиями возможного влияния на фитопланктон крупномасштабных гидротехнических работ, проводившихся в XXI в. в различных частях акватории залива. Из наиболее масштабных можно упомянуть взрывные работы по углублению подходного фарватера Сайменского канала, работы по реконструкции причалов порта Выборг, длительные работы по развитию терминалов морского торгового порта Высоцк и другие работы по дноуглублению и помещению грунтов в подводные отвалы.

Представленная работа – первая попытка обобщения данных о фитопланктоне всей

акватории Выборгского залива на основании наблюдений в разные периоды его сезонной сукцессии с начала XXI в.

Материалы

Материалом для работы послужили результаты исследования фитопланктона залива в 2018–2024 гг. Пробы отбирали на станции государственного мониторинга в нижней части залива и на участках его акватории, связанных с проведением гидротехнических работ и эксплуатацией портовых сооружений, а также фоновых станциях.

Наряду с собственными, использованы архивные данные лаборатории гидробиологии Санкт-Петербургского филиала ВНИРО за 2000–2017 гг., отобранные и обработанные по аналогичной методике.

Проанализированы результаты обработки 160 проб фитопланктона.

Методы

Пробы воды отбирали батометром Паталаса в трофогенном слое (до глубины, соответствующей утроенной прозрачности по диску Секки) через каждый метр. Взятую в равных количествах из каждого слоя воду перемешивали, помещали в пластиковую емкость, фиксировали раствором Люголя с добавлением уксусной кислоты и формалина, концентрировали фильтрационным методом с использованием мембранных фильтров с диаметром пор 0.8–1.2 мкм. Фитопланктоном считали всю фотосинтезирующую часть планктона, подсчет его организмов проводили в счетной камере объемом 0.01 мл, биомассу определяли счетно-объемным методом на основании размеров водорослей, измеренных в процессе камеральной обработки (Методика изучения..., 1975; Методические рекомендации..., 1981). Таксономический состав фитопланктона определяли в процессе обработки количественных проб. Доминирующими считали систематические группы или отдельные таксоны рангом ниже рода, составляющие не менее 10 % общей численности или биомассы фитопланктона. Статистическую обработку проводили в программе MS Excel.

Результаты

Фитопланктон Выборгского залива в 2000–2024 гг. формировали водоросли 8 систематических групп: Cyanobacteria (цианобактерии), Chrysophyceae (золотистые), Bacillariophyta (диатомовые), Cryptophyceae (криптофитовые), Dinophyceae (дино-

фитовые), Euglenophyceae (эвгленовые), Chlorophyta (зеленые), Charophyta (харовые). В составе фитопланктона отмечалась также фотосинтезирующая инфузория *Myrionecta rubra* Jank. (Ciliophora).

В безледный период 2000–2024 гг. диапазон изменения биомассы фитопланктона залива составил 0.12–23.16 г/м³, т. е. ее вариативность достигала двух порядков, численность 1643–533270 млн кл/м³ изменялась более чем на три порядка.

Биомасса весеннего фитопланктона изменялась от 0.23 до 12.18 г/м³. В нижней части залива численно преобладали цианобактерии и зеленые водоросли, преимущественно рода *Monoraphidium*. Основу биомассы составляли диатомовые и динофлагеллаты, среди которых основными доминантами были *Diatoma tenuis* C. Ag. и *Apocalathium aciculiferum* (Lemm) Crav. Daugb. Maestr.

& Calad., в отдельные годы – эвгленовые, представленные *Eutreptiella gymnastica* Tronds., и фотосинтезирующая инфузория *Myrionecta rubra*, доля которой в общей биомассе в начале июня 2020 г. достигала 43%. В целом для весенних данных более половины биомассы составляли диатомовые, более трети – динофлагеллаты.

Весенний фитопланктон средней части был представлен преимущественно диатомовыми, составлявшими до 90% его биомассы, основными доминантами были *D. tenuis*, *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz., *Skeletonema subsalsum* (A. Cleve) Bethge, *S. costatum* (Grev.) Cleve. В верхней части численно и по биомассе также преобладали диатомовые, представители родов *Aulacoseira*, *Cyclotella* и *T. fenestrata*. В состав доминирующего комплекса входили криптофитовые и эвгленовые (рис. 2).

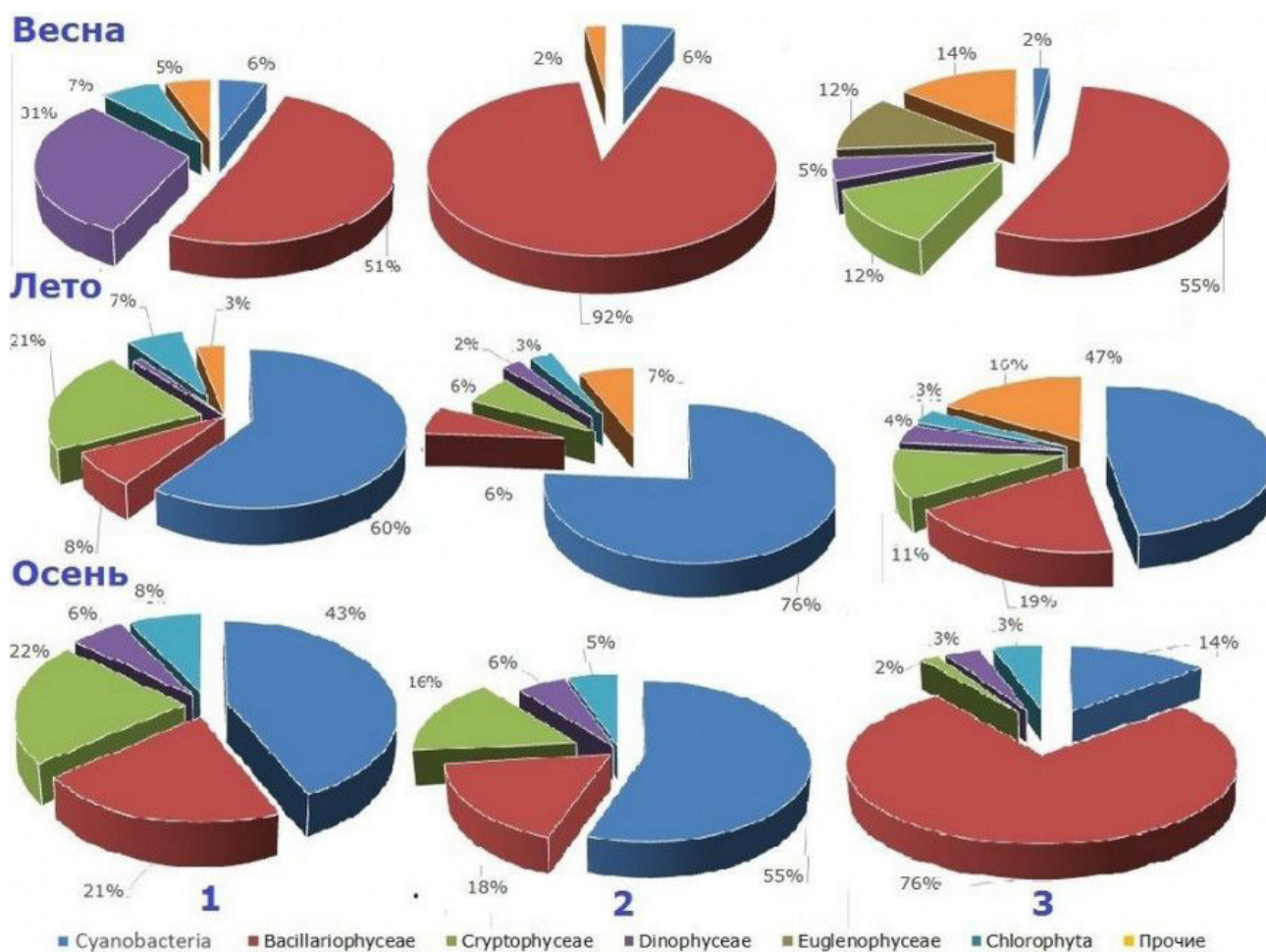


Рис. 2. Доля водорослей основных систематических групп в биомассе фитопланктона различных частей Выборгского залива: 1 – нижняя, 2 – средняя, 3 – верхняя

Fig. 2. The proportion of algae of the main systematic groups in the phytoplankton biomass of various parts of the Vyborg Bay : 1 – lower part, 2 – middle part, 3 – upper part

Летом биомасса изменялась от 0.33 до 17.66 г/м³, в нижнем районе ее основу составляли цианобактерии, доминировали *Aphanizomenon flosaquae* Ralfs ex Born. & Flah., *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. & Kom., *Pseudanabaena limnetica* (Lemm.) Kom., в доминирующий по биомассе комплекс также входили криптофитовые (виды р. *Cryptomonas*), диатомовые и зеленые водоросли (см. рис. 2).

Цианобактерии составляли основу численности и биомассы фитопланктона в среднем районе, доминировали *Aphanizomenon gracile* Lemm., *A. flosaquae*, *P. agardhii*, *P. limnetica*.

В верхней части залива доминирующий комплекс фитопланктона был более разнообразен. Наряду с цианобактериями значительную долю биомассы составляли диатомовые и криптофитовые (см. рис. 2), основные доминанты – *P. agardhii*, *Limnothrix planktonica* (Wolosz.) Meff., *Planktolyngbya subtilis* (West) Anagn. & Kom., *A. gracile*, водоросли рода *Cryptomonas*, *T. fenestrata*, *Cyclotella* sp., *Aulacoseira* sp.

Осенью биомасса фитопланктона залива составляла от 0.12 до 3.35 г/м³, количественные показатели развития фитопланктона его нижней части определяли цианобактерии (*P. agardhii*, *P. limnetica*, *A. flosaquae*). По биомассе, кроме цианобактерий, доминировали диатомовые и криптофитовые (водоросли родов *Fragilaria* и *Cryptomonas*).

В среднем участке основу численности, как и летом, составляли цианобактерии – *P. agardhii*, *P. limnetica*, *A. flosaquae*. По биомассе наряду с ними доминирующий комплекс формировали диатомовые с преобладанием *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Sim. и *S. costatum* и криптомонады – представители рода *Cryptomonas*, доля которых в биомассе к концу осени увеличивалась.

В верхнем участке при доминировании по численности цианобактерий (преимущественно *L. planktonica* и *P. subtilis*) диатомовые – с преобладанием *Aulacoseira italica*, (Eher.) Sim., *A. granulata* (Eher.) Sim., *S. subsalsum* составляли основу биомассы (см. рис. 2).

Специфику различных частей залива наглядно иллюстрирует характер изменения биомассы фитопланктона в сезонном аспекте: верхняя часть характеризуется максимальными величинами в середине лета, тогда как средняя и нижняя – в весенний период, что характерно для восточной части Финского залива. В целом весной диатомо-

вые доминируют во всех частях залива, в нижней в состав доминирующего комплекса входят динофлагеллаты. Средние величины весенних биомасс в нижней и верхней частях залива были сходны, а в средней части почти в 5 раз выше, чем в остальных двух. Летние биомассы в верхней части залива были в среднем в 3 раза выше, чем в нижней, а в средней – более чем в 2 раза выше, чем в верхней (рис. 3).

Минимальные биомассы во всех частях залива отмечены осенью (см. рис. 3), при этом в нижней части доминировали цианобактерии, свойственные летнему фитопланктону, что подтверждает представление об отсутствии специфического осеннего комплекса планктонных водорослей в восточной части Финского залива. В то же время в верхней части основу биомассы осеннего фитопланктона формировали диатомовые (см. рис. 3), что характерно для фитопланктона озерно-речного комплекса и, вероятно, обусловлено влиянием вод Сайменского канала. В осеннем фитопланктоне средней части залива доминировали цианобактерии и (с меньшей долей в биомассе) диатомовые.

Влияние значительной изрезанности береговой линии и наличия большого количества островов на формирование разнообразных условий вегетации фитопланктона наглядно демонстрирует его распределение в средней части залива в районе порта Высоцк в августе и октябре 2019 г. (рис. 4), когда на станциях, прилегающих к открытой части залива, основу биомассы составляли цианобактерии, а в бухте Ключевской, при максимальных величинах биомассы, фитопланктон формировали диатомовые, зеленые, цианобактерии, криптофитовые, золотистые, в бухте Малой Пихтовой, при минимальных величинах биомассы, основу ее составляли криптомонады. Значительно отличался от открытой части залива фитопланктон этих бухт и осенью – как величинами биомассы, так и значительной долей золотистых водорослей (см. рис. 4).

Межгодовые изменения величины биомассы летнего фитопланктона в нижней части залива, по данным станции государственного мониторинга, показали, что максимальная и минимальная величины биомасс здесь различались на порядок, наименьшие были характерны для периода 2010–2020 гг., а наибольшие отмечены в 2022–2023 гг. Состав доминирующего комплекса во все годы наблюдений был сходен и формировался

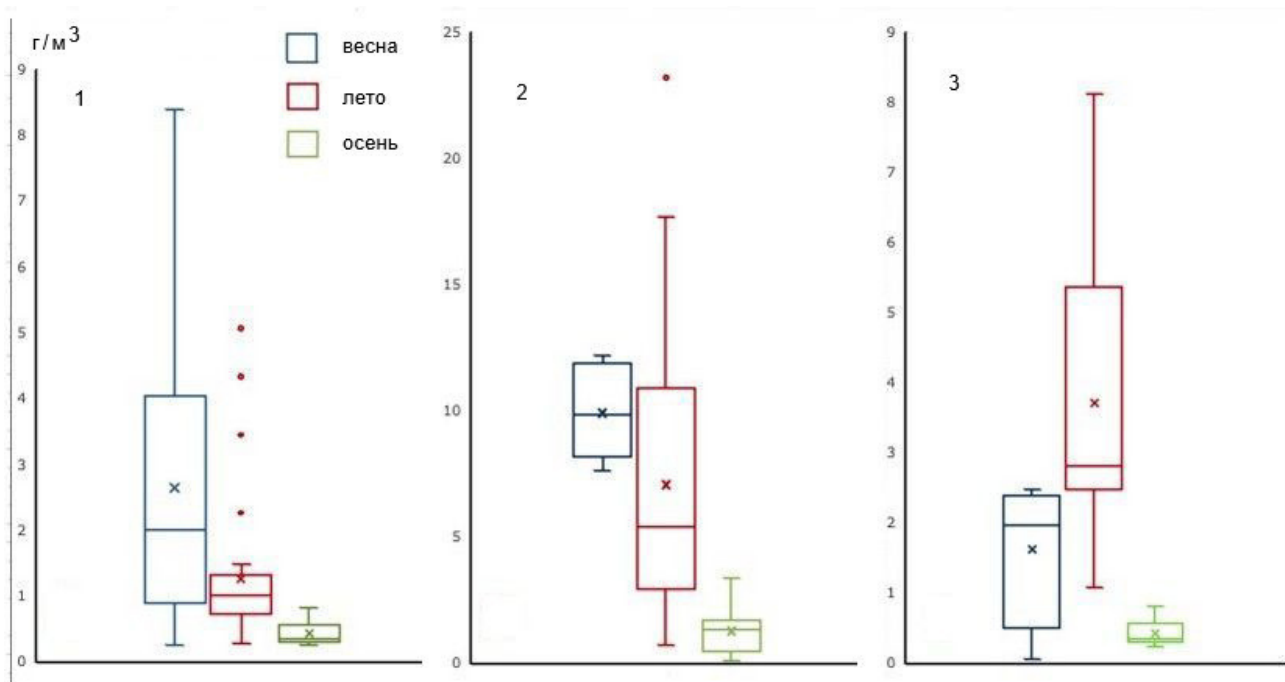


Рис. 3. Сезонные изменения средних биомасс фитопланктона Выборгского залива: 1 – нижняя часть, станция государственного мониторинга (2000–2024 гг.); 2 – средняя часть (2010–2023 гг.); 3 – верхняя часть (2001–2022 гг.)

Fig. 3. Seasonal changes in average phytoplankton biomass of the Vyborg Bay: 1 – lower part, state monitoring station (2000–2024); 2 – middle part (2010–2023); 3 – upper part (2001–2022)

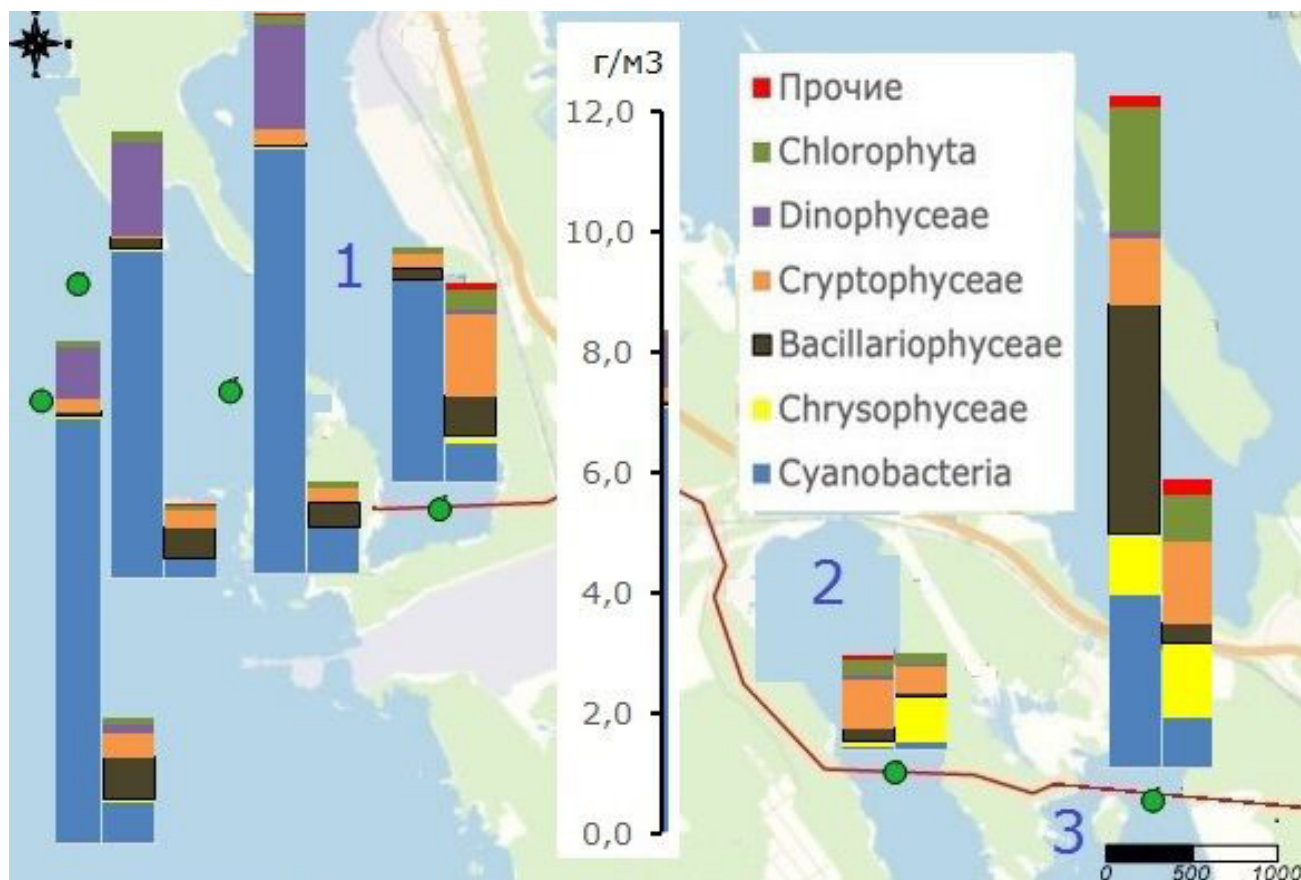


Рис. 4. Биомасса фитопланктона в средней части Выборгского залива (район порта Высоцк) в августе и октябре 2019 г.: 1 – бухта Большая Пихтовая; 2 – бухта Малая Пихтовая; 3 – бухта Ключевская

Fig. 4. Phytoplankton biomass in the middle part of Vyborg Bay (Vysotsk port area) in August and October 2019: 1 – Bolshaya Pikhtovaya Bay; 2 – Malaya Pikhtovaya Bay; 3 – Klyuchevskaya Bay

преимущественно цианобактериями, диатомовыми, криптофитовыми, в отдельные годы – зелеными водорослями (рис. 5.1).

В районе порта Высоцк в средней части залива в 2008–2024 гг. состав доминирующего комплекса летнего фитопланктона был ана-

логичен отмеченному в нижней части при значительно превышающих его величинах биомассы (рис. 5.2). Различие минимальных и максимальных средних для исследованных акваторий величин было трехкратным.

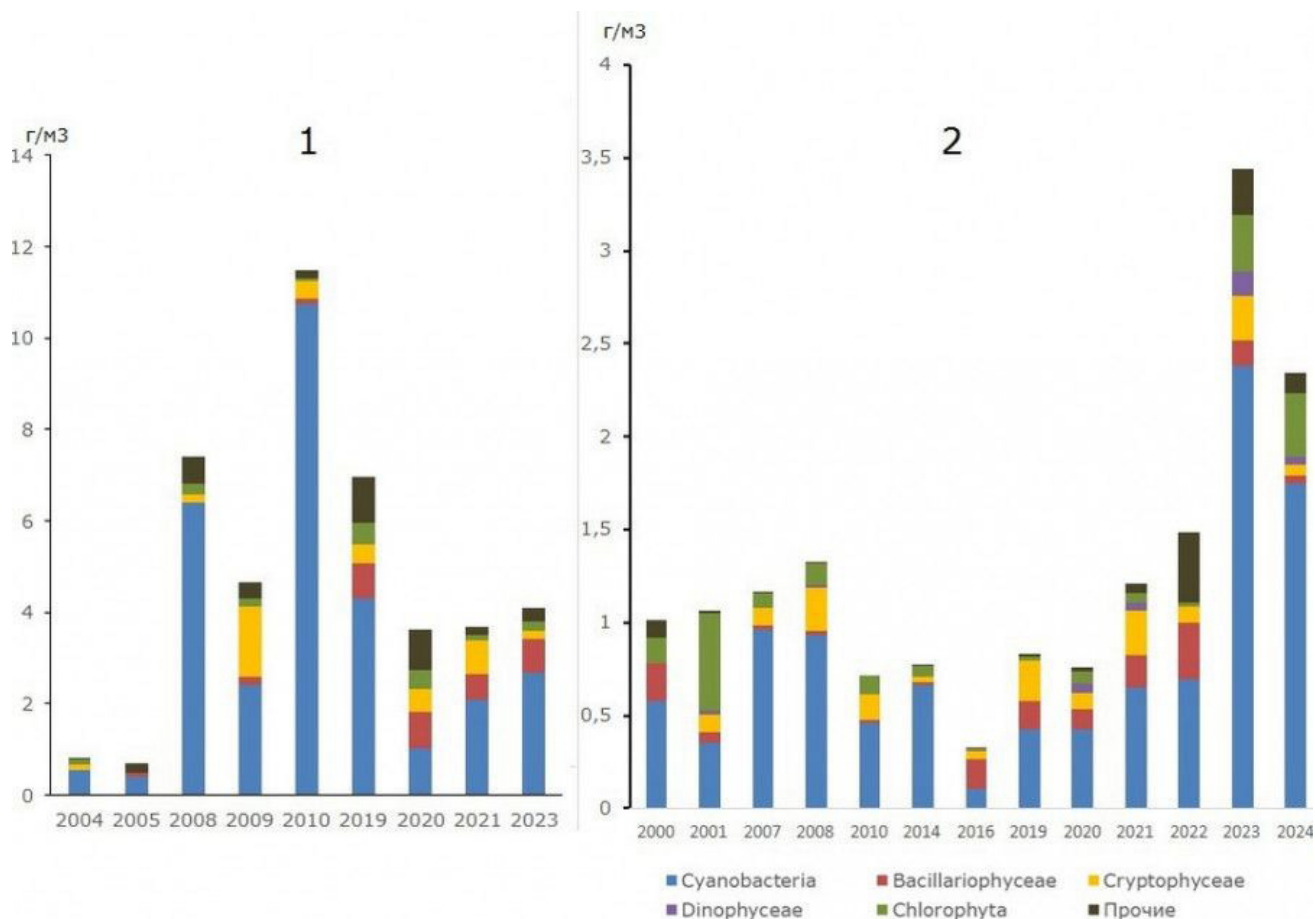


Рис. 5. Межгодовые изменения биомассы летнего фитопланктона: 1 – средней части Выборгского залива (район порта Высоцк); 2 – нижней части залива (станция государственного мониторинга)
 Fig. 5. Interannual changes in summer phytoplankton biomass: 1 – middle part of Vyborg Bay (Vysotsk port area); 2 – lower part of the bay (state monitoring station)

Обсуждение

По результатам исследований можно отметить, что состав доминирующего комплекса фитопланктона Выборгского залива в XXI в. не претерпел существенных изменений и характеризуется преобладанием цианопрокариот, диатомовых и криптофитовых со сходным с отмеченным в конце XX в. составом доминантов. В качестве отличий можно отметить доминирование весной – в начале лета в фитопланктоне нижней части залива, находящейся в области влияния вод глубоководной части Финского залива, эвгленовой *Eutreptiella gymnastica* и фотосинтезирующей (за счет клеточной пластики) инфузории *Myrionecta rubra* – компонента до-

минирующих комплексов фитопланктона в западных акваториях Финского залива (The Gulf of Finland..., 2016).

По средним за безледный период величинам биомассы (1.24 г/м³ в нижнем и 2.87 г/м³ – в верхнем) обе акватории характеризуются как мезотрофные (Трифонова, 1990), однако характер ее динамики наглядно демонстрирует изменения сообщества фитопланктона по мере повышения трофности акватории. В нижнем районе она близка к характерной для олиготрофно-мезотрофных – весенний максимум и значительное снижение биомассы летом, а в верхнем – значительное превышение летней биомассы над весенней, что характерно для

мезотрофных водоемов, причем разница между летними и весенними величинами биомассы у средних величин, характерных для мезотрофного водоема, демонстрирует степень его олиготрофно-эвтрофной сукцессии. Более корректно такие различия в трофности акваторий отражены в классификации, по которой нижний участок характеризуется как α -мезотрофный, а верхний – как β -мезотрофный (Китаев, 2007).

Средняя за безледный период величина биомассы фитопланктона средней части залива составила 6.83 г/м^3 и характеризует его акваторию как эвтрофную. Средний район выделялся наибольшими величинами биомассы, поскольку с юга испытывал меньшее по сравнению с нижней частью влияние вод Финского залива, а с севера – меньшее по сравнению с верхней частью воздействие поступления вод Сайменского канала.

По результатам исследований летнего фитопланктона нижней части Сайменского канала (от шлюза Пялли до шлюза Брусничное), проведенных в 2021 г., его биомасса при доминировании диатомовых (*T. fenestrata*, *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Cyclotella* sp.) в среднем составила 0.842 г/м^3 . Это подтверждает, что именно поступление водных масс канала снижает продуктивность фитопланктона верхней части залива, несмотря на обширные мелководья и другие благоприятные для развития фитопланктона условия.

Учитывая большую гетерогенность условий в акваториях верхней и средней частей залива из-за сложности морфологии его берегов, можно предположить, что обобщенная характеристика трофности этих акваторий является в значительной степени условной и зависит от местоположения станций отбора проб.

Сравнение результатов исследования фитопланктона Выборгского залива с данными 90-х гг. XX в. (Терешенкова, 2006) показало, что, несмотря на масштабные гидротехниче-

ские работы, проводившиеся на различных частях акватории Выборгского залива, в XXI в. не произошло существенных изменений как структуры доминирующего комплекса фитопланктона, так и количественных показателей его развития, что вполне объяснимо значительным восстановительным потенциалом этого сообщества, слагаемого организмами, при благоприятных условиях быстро наращивающими численность своих популяций. Выборгский залив в XXI в., как и ранее (Макарова, 1997; Лаврентьева и др., 1999; Терешенкова, 2006; Экосистема..., 2008), остается наиболее продуктивной акваторией восточной части Финского залива.

Заключение

Значительная вариабельность структуры и количественного развития фитопланктона в различных частях его акватории обусловлена морфологией берегов и гидрологическими особенностями залива, определяющими гетерогенность условий формирования фитопланктона.

Наибольшие величины биомассы фитопланктона отмечаются преимущественно в средней части, ее ориентировочно можно охарактеризовать как эвтрофную. Верхнюю часть залива, принимающую воды Сайменского канала, и нижнюю часть, прилегающую к глубоководному району восточной части Выборгского залива, – как мезотрофные.

Ядро планктонных альгоценозов залива сходно с таковым остальной акватории восточной части Финского залива и в XXI в. не претерпело значительных изменений.

Количественные показатели развития фитопланктона залива и его структура в XXI в. сходны с отмечавшимися в конце XX в. Проводившиеся в XXI в. крупномасштабные гидротехнические работы не привели к изменениям как структуры фитопланктона, так и количественных показателей его развития.

Библиография

- Дроздов В. В., Коробков А. В. Влияние процесса дноуглубительных работ на экологическое состояние акваторий Выборгского залива // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 12. С. 80–96.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.
- Лаврентьева Г. М., Мещерякова С. В., Мицкевич О. И., Огородникова В. А., Сулопарова О. Н., Терешенкова Т. В. Гидробиологическая характеристика Выборгского залива, пролива Бьеркезунд, бухты Батарейной и Лужской губы (восточная часть Финского залива) // Финский залив в условиях антропогенного воздействия. СПб., 1999. С. 211–256.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 241 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Фитопланктон и его продукция. Л., 1981. 32 с.
- Макарова С. В. Видовой состав и количественные характеристики фитопланктона // Экосистемные

модели. Оценка современного состояния Финского залива. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. С. 354–365.

Терешенкова Т. В. Сравнительная характеристика летнего фитопланктона Выборгского залива, Лужской и Копорской губ, пролива Бьеркезунд и Мелководного района восточной части Финского залива // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 2006. Вып. 331. Т. 1. С. 37–85.

Трифонов И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 184 с.

Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 477 с.

The Gulf of Finland assessment // Reports of the Finnish Environment institute. 2016. Vol. 27. 363 p.

Благодарности

С благодарностью за годы совместной работы и доброй памятью преждевременно ушедшей от нас в 2017 г. Терешенковой Татьяне Викторовне, которой получена основная часть использованных в этой работе архивных данных лаборатории гидробиологии СПб филиала ВНИРО (ГосНИОРХ им. Л. С. Берга).

STRUCTURE AND SPATIAL DISTRIBUTION OF PHYTOPLANKTON IN VYBORG BAY IN THE 21ST CENTURY

LIASHENKO

Oksana Alexandrovna

PhD, Saint-Petersburg brunch of VNIRO, Saint-Petersburg, Makarov Embankment, 26, lyashenko_oa@niorh.vniro.ru

Key words:

Baltic Sea
Gulf of Finland
Vyborg Bay
phytoplankton
structure
biomass
spatial distribution

Summary: The article presents the results of a study of phytoplankton in the Vyborg Bay of the Baltic Sea. The research was conducted to assess the structure and the level of quantitative development of phytoplankton in the 21st century against the background of large-scale hydraulic engineering works. The results of studies of phytoplankton in the upper, middle and lower parts of the Bay in spatial and temporal aspects in 2000–2024 are presented and analyzed. Samples were taken from the trophogenic layer (three transparency depths along the Secchi disk) every meter, the integral sample was fixed with a Lugol solution with the addition of acetic acid and formalin, and concentrated by filtration. The research showed that, despite similarities in taxonomic composition and phytoplankton structure, different parts of the bay are characterized by specific features of their development. Thus, the maximum values of biomass in the upper part are noted in the middle of summer, while in the middle and lower parts – in the spring period. In general, for Vyborg Bay, the biomass of spring phytoplankton ranged from 0.23 to 12.18 g/m³, dominated mainly by diatoms, in some years also by dinophytes. In summer, with biomass values in the range of 0.33–17.66 g/m³, it was mainly based on cyanobacteria. In autumn, the biomass of phytoplankton in the bay ranged from 0.12 to 3.35 g/m³; cyanobacteria dominated in the lower and middle parts of the bay, while diatoms dominated in the upper part. The middle part of the bay, where the largest phytoplankton biomass was observed, can be described as eutrophic. The upper part of the bay receiving waters from the Saimaa Canal, and the lower part, adjacent to the deep-water area of the eastern part of the Gulf of Finland, can be considered as mesotrophic. During the years of research, the quantitative indicators of phytoplankton development and its structure were similar to those observed at the end of the 20th century. The large-scale hydraulic engineering works carried out in the 21st century did not lead to significant changes in quantitative development of phytoplankton and the structure of its dominant communities.

Received on: 22 December 2025

Published on: 01 April 2026

References

- Drozdov V. V. Korobkov A. V. The Impact of Dredging Operations on the Environmental Condition of the Vyborg Bay Waters, *Uchenye zapiski RGGMU*. 2010. No. 12. P. 80–96.
- Ecosystem of the Neva River Estuary: Biological diversity and environmental issues. M.: *Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK*, 2008. 477 p.
- Guidelines for collecting and processing materials in hydrobiological research on freshwater bodies. Phytoplankton and its production. L., 1981. 32 p.
- Kitaev S. P. Basics of limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists. Petrozavodsk: *Karel'skiy nauchnyy centr RAN*, 2007. 395 p.
- Lavrent'eva G. M. Mescheryakova S. V. Mickevich O. I. Ogorodnikova V. A. Susloparova O. N. Tereshenkova T. V. Hydrobiological characteristics of Vyborg Bay, Björkezung Strait, Battery Bay, and Luga Bay (Eastern Part of the Gulf of Finland), *Finskiy zaliv v usloviyah antropogennogo vozdeystviya*. SPb., 1999. P. 211–256.
- Makarova S. V. Species composition and quantitative characteristics of phytoplankton, *Ekosistemnye modeli. Ocenka sovremennogo sostoyaniya Finskogo zaliva*. SPb.: *Gidrometeoizdat*, 1997. P. 354–365.
- Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies. M.: *Nauka*, 1975. 241 p.
- Tereshenkova T. V. Comparative characteristics of summer phytoplankton in Vyborg Bay, Luga Bay, Koporskaya Bay, Björkezung Strait, and the Shallow area of the Eastern Gulf of Finland, *Sbornik nauchnyh trudov GosNIORH*. 2006. Vyp. 331. T. 1. P. 37–85.
- The Gulf of Finland assessment, Reports of the Finnish Environment institute. 2016. Vol. 27. 363 p.
- Trifonova I. S. Ecology and Succession of Lake Phytoplankton. L.: *Nauka*, 1990. 184 p.



УДК 577.151.63+57.033+574.522

ИЗМЕНЕНИЕ БИОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ *MELANOIDES TUBERCULATA* ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЛИФОСАТА

ТИШИНА
Екатерина Александровна
Государственный университет просвещения, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, 89266182591@mail.ru

ДРОГАНОВА
Татьяна Сергеевна
Государственный университет просвещения, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, blackraven5@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ
Николай Валентинович
доктор химических наук, Государственный университет просвещения, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, kaf-obhim@guppros.ru

ПОЛИКАРПОВА
Людмила Викторовна
Государственный университет просвещения, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, ljudmilapolikarpova@yandex.ru

Ключевые слова:
пресноводные моллюски
Melanoides tuberculata
пестициды
глифосат

Аннотация: В современных условиях интенсивного сельского хозяйства актуальной проблемой становится загрязнение водных экосистем пестицидами, среди которых особое место занимает глифосат – один из наиболее распространенных гербицидов в Российской Федерации. В поисках биомаркеров пестицидного загрязнения водных объектов в исследовании рассмотрено изменение биохимических параметров моллюска *Melanoides tuberculata* под воздействием глифосата. В ходе исследования показано, что активность фермента обменного комплекса – кислой фосфатазы *Melanoides tuberculata* существенно изменяется относительно контрольных значений и это изменение имеет фазовый характер, что свидетельствует о сложной реакции моллюска на токсическое воздействие. Параллельно выявлению изменения биохимической активности электрофоретически определено наличие дополнительной множественной формы кислой фосфатазы, свидетельствующей об эпигенетическом механизме адаптации *Melanoides tuberculata* к действию глифосата. Полученные результаты не только расширяют представления о биохимических механизмах адаптации водных организмов к загрязнению, но и открывают перспективы для разработки новых биомаркеров, позволяющих оперативно оценивать уровень пестицидного загрязнения водоемов. Это особенно важно для мониторинга экологического состояния водных объектов и разработки мер по их охране.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: О. Ф. Филенко

Получена: 10 сентября 2025 года

Подписана к печати: 27 марта 2026 года

Введение

В биотическом комплексе гидробионтов моллюски имеют критически важные позиции, занимая верхние и средние слои бентоса в водных объектах и активно участвуя в трофических отношениях. Вместе с тем их значение при нормировании качества природных и бытовых вод практически не учитывается. При изучении гидробионтов, как правило, рассматриваются биохимические характеристики рыб, а в некоторых случаях коммерческих моллюсков (Вопросы экологического нормирования..., 2011; Голованова, Аминов, 2019). Для биохимического тестирования природных вод важен выбор тестовых биообъектов, которые по своей устойчивости и одновременно чувствительности могли бы адекватно реагировать на загрязнители различной природы. Известно, что для этих целей успешно применяются моллюски средней полосы России (Конин, Коничев, 2007; Романова и др., 2008; Дроганова и др., 2019, 2022; Тишина и др., 2024), однако они не всегда доступны исследователям. Из истории аквариумистики известно, что род пресноводных улиток *Melanoides* из семейства Тиаровые активно поведенчески реагирует на изменения внешней среды и примеси в воде (Фомичева, Горулев, 2019, Abdel-Wahab et al., 2023). Моллюск *Melanoides tuberculata* весьма активно размножается в искусственных условиях и в связи с этим весьма доступен для исследований. В последние годы глифосат вызывает все большую обеспокоенность в связи с проявлением токсичности по отношению к теплокровным (Лаптев и др., 2022).

Целью настоящей работы стала оценка изменений биохимических параметров моллюска *Melanoides tuberculata* под воздействием глифосата, который является одним из основных используемых гербицидов в Российской Федерации (Нефедьева и др., 2020; Kariyanna et al., 2024).

Материалы

Реакцию комплекса кислых фосфатаз *Melanoides tuberculata* в ответ на токсическое действие инсектицидов оценивали по результатам острого опыта (от 0 до 96 ч). Эксперименты выполнялись аналогично известным исследованиям, проведенным с целью биотестирования качества вод и оценки токсичности загрязнителей для гидробионтов (Kovačić et al., 2017). Опытные особи содержались в аквариумах объемом

10 л, накрытых стеклом. Контаминирующее действие глифосата исследовали при воздействии предельно допустимых концентраций (ПДК) (10 ПДК рыб-хоз) и высоких сублетальных доз (200 ПДК рыб-хоз) (ПДК рыб-хоз глифосат – 0.001 мг/дм³) (Приказ Министерства..., 2025). Моллюски в период эксперимента в качестве питания получали гранулированный корм и не взаимодействовали с субстратом (Nuseti et al., 2004). Экспозиция опыта составляла 0, 2, 4, 6, 12, 24, 48, 72 и 96 ч. Контрольные особи содержались в воде без добавления токсиканта при тех же условиях и временных интервалах. По истечении времени воздействия отбирали по 6 моллюсков и гомогенизировали в фарфоровой ступке в течение 5 мин растиранием с битым кварцевым стеклом и экстрагирующей жидкостью. В качестве экстрагирующей жидкости использовали 0.5%-ный раствор Тритон Х-100 на дистиллированной воде, прибавляемый в десятикратном объеме по отношению к навеске ткани. Экстракты очищали центрифугированием при 10000 g и 4 °C в течение 30 мин на рефрижераторной центрифуге (Дроганова и др., 2017). Полученные супернатанты отбирали и использовали в дальнейших исследованиях.

Методы

Концентрацию белка в экстрактах определяли методом Лоури (Lowry et al., 1951). Активность кислой фосфатазы определяли спектрофотометрически по скорости гидролиза модельного субстрата – *p*-нитрофенилфосфата. За единицу активности (Е) принимали количество фермента, дающего прирост содержания продукта ферментативной реакции на 1 мкмоль за 1 мин (Andersch, Szczypinski, 1947).

Обнаружение зон нахождения кислой фосфатазы проводили по методике Берстона, усовершенствованной Лойда с соавторами (Лойда и др., 1982). В качестве субстрата использовался 0.3 %-ный раствор α -нафтилфосфата, проявляющего пигмента – прочный синий Б (Fast Blue B, «Chemapol», Чехия).

По результатам измерения активности фермента кислой фосфатазы в эксперименте определялось среднее отношение активности фермента, вычисляемое как отношение средней величины изменений активности в эксперименте в сравнении с контрольными значениями: $\bar{X} = \sum X/n$, где $x = x_{оп} / x_{контр}$, n – количество точек эксперимента.

Относительную электрофоретическую подвижность (ОЭП) рассчитывали для каждой выявленной зоны активности кислой фосфатазы (КФ) как отношение пробега фермента к пробегу лидирующего красителя бромфенолового синего.

Все исследования проводили в трех аналитических повторностях. Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (p), при этом критическим уровнем значимости принимали $p \leq 0.05$. Статистическую обработку данных проводили при помощи Microsoft Excel. Результаты представлены в виде «среднее значение \pm стандартное отклонение».

Результаты

При действии глифосата (рис. 1) в первые часы экспозиции (0, 2, 4, 6, 12, 24, 48, 72 и 96 ч) выявлено чередование фаз снижения и повышения активности фермента и при низких (0.01 мг/дм^3), и при высоких концентрациях глифосата (0.2 мг/дм^3) относительно контроля. После 12 ч экспозиции активность фермента КФ угнетается и становится ниже контрольных значений. На 72 ч значение активности КФ незначительно превышает контрольные значения. К 96 ч активность фермента становится существенно ниже контрольных значений.

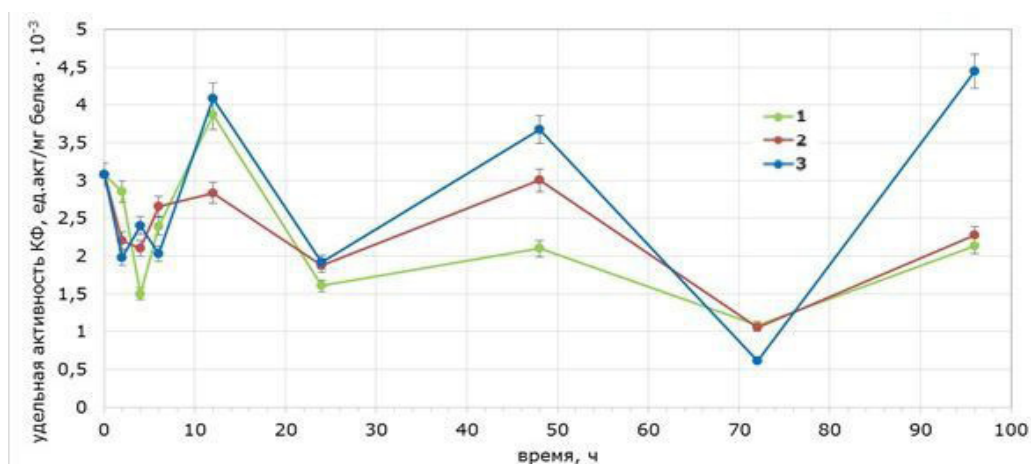


Рис. 1. Изменение удельной активности кислой фосфатазы мелании туберкулята *Melanoides tuberculata* под действием глифосата 10 ПДК (1), 200 ПДК (2) и контроль (3) (ПДК рыб-хоз. глифосат – 0.001 мг/дм^3). $p = 0.05$

Fig. 1. Changes in the specific activity of acid phosphatase in *Melanoides tuberculata* under the influence of glyphosate 10 MPC (1), 200 MPC (2) and control (3) (MPC of fish-farm glyphosate – 0.001 мг/дм^3). $p = 0.05$

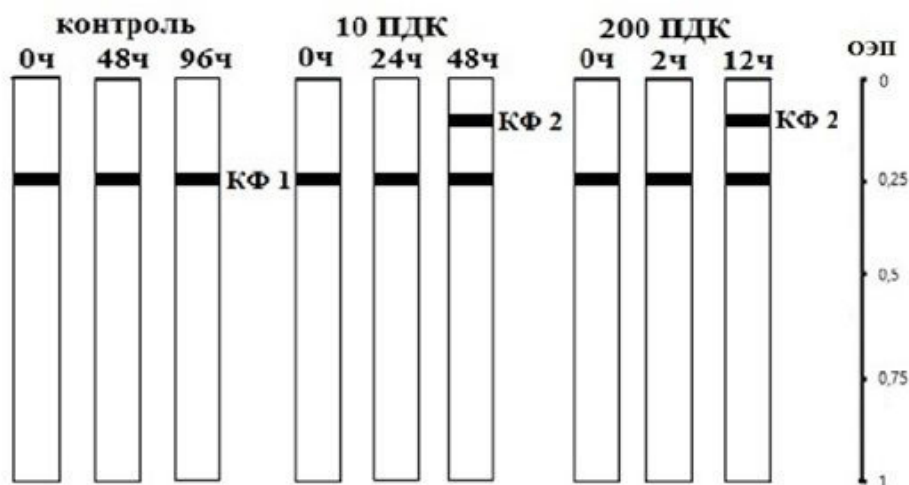


Рис. 2. Схемы электрофореграмм множественных форм КФ моллюска *Melanoides tuberculata* в норме и при воздействии глифосата (ПДК рыб-хоз глифосат – 0.001 мг/дм^3). (ОЭП – относительная электрофоретическая подвижность)

Fig. 2. Electropherograms of multiple CFforms of the mollusk *Melanoides tuberculata* normally and under the influence of glyphosate (MPC of fish farm glyphosate – 0.001 мг/дм^3). (REM – Relative electrophoretic mobility)

При проведении электрофореза у контрольной группы выявлена одна множественная форма фермента КФ со средней электрофоретической подвижностью (КФ1 = 0.25). Она же существует и у экспериментальной группы моллюсков. Действие глифосата привело к появлению новой множественной формы КФ с низкой электрофоретической подвижностью (КФ2 = 0.1).

Обсуждение

Исходя из полученных данных, минимум активности фермента КФ при воздействии глифосата (см. рис. 1) в концентрации 10 ПДК отмечается при 48 ч экспозиции, при действии концентрации 200 ПДК минимум активности фермента КФ отмечается раньше, при 12 ч экспозиции. Активность фермента в точках минимума оказалась ниже контрольных значений, при этом необычным является непропорционально меньшее угнетение ферментативной активности при действии высокой концентрации глифосата (0.2 мг/дм³) в сравнении с низкой (0.01 мг/дм³).

Расчитанные средние значения отношения активности фермента при 10 ПДК – 0.98 отн. ед., а при 200 ПДК – 1.002 отн. ед. сравнимы по величинам, что не соответствует разнице примененных концентраций. В связи с этим представлялось целесообразным изучить состав исследуемого фермента электрофоретическим способом.

При проведении электрофореза контрольной группы выявлено, что на энзим-электрофореграммах (рис. 2) существует одна форма КФ со средней электрофоретической подвижностью (КФ1 = 0.25). Она же существует и у экспериментальной группы моллюсков. Действие глифосата привело к появлению новой множественной формы КФ с низкой

электрофоретической подвижностью, которая появилась начиная с 48 ч экспозиции при низкой концентрации и существенно быстрее, с 12 ч экспозиции, при высокой концентрации, а затем сохранялась на протяжении всего эксперимента (КФ2 = 0.1).

Таким образом, действие глифосата приводит к синтезу новой формы фермента КФ в токсикологическом эксперименте, что происходит по эпигенетическому механизму и является адаптивным ответом на действие экотоксиканта. Ранее на примерах ферментов обменного комплекса *Melanoides tuberculata* такой характер воздействия не изучали.

Заключение

При биохимическом изучении воздействия глифосата выявлена колебательная динамика активности фермента обменного комплекса кислая фосфатаза у моллюска (*Melanoides tuberculata*), характеризующаяся существенным подавлением в сравнении с контролем.

Изменения активности не соотносятся с концентрацией использованного в экспериментах гербицида, что является результатом активных адаптационных процессов, проявляющихся, в частности, в появлении дополнительной множественной формы фермента КФ (КФ2 = 0.25), которая сохраняется до конца эксперимента. Данные биохимические изменения указывают на перестройку метаболизма моллюсков и их существенную адаптацию к токсическому воздействию. Время появления новой множественной формы фермента совпадает с интервалом максимального снижения активности фермента.

Библиография

- Вопросы экологического нормирования и разработка системы оценки состояния водоемов: Материалы Объединенного Пленума Научного совета ОБН РАН по гидробиологии и ихтиологии, Гидробиологического общества при РАН и Межведомственной ихтиологической комиссии / Отв. ред.: академик РАН Д. С. Павлов, член-корр. РАН Г. С. Розенберг, д. б. н. М. И. Шатуновский. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 196 с.
- Голованова И. Л., Аминов А. И. Физиолого-биохимический статус рыб под действием глифосат-содержащих гербицидов (обзор) // Биология внутренних вод. 2019. № 2-2. С. 83–94. DOI: 10.1134/S0320965219030082
- Дроганова Т. С., Поликарпова Л. В., Тишина Е. А. Изменение активности и множественных форм кислой фосфатазы живородки речной под влиянием гербицидов на основе глифосата // Современное состояние водных биоресурсов: Материалы конференции / Под ред. Е. В. Пищенко, И. В. Моружи. Новосибирск: НГАУ, 2019. С. 64–67.
- Дроганова Т. С., Поликарпова Л. В., Тишина Е. А., Анка М., Петренко Д. Б., Васильев Н. В. Влияние ионов Zn²⁺ на активность кислых нуклеаз пресноводных моллюсков // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2022. № 2. С. 219–224. DOI: 10.31857/S1026347022020056

- Дроганова Т. С., Коничев А. С., Петренко Д. Б., Поликарпова Л. В., Цветков И. Л. Влияние фторида натрия и фторуксусной кислоты на активность кислой ДНКазы, кислой фосфатазы и спектр растворимых белков гепатопанкреаса живородки речной // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2017. № 4. С. 36–45. DOI: 10.18384/2310-7189-2017-4-36-45
- Конин Д. Н., Коничев А. С. Влияние ионов тяжелых металлов на протеолитическую активность в печени моллюсков *Viviparus viviparus* L. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2007. № 1. С. 3–6.
- Лаптев Г. Ю., Иылдырым Е. А., Тюрина Д. Г., Ильина Л. А., Филиппова В. А., Калиткина К. А., Дубровин А. В., Новикова Н. И., Меликиди В. Х., Горфункель Е. П., Пономарева Е. С., Околелова Т. М. Чем опасен глифосат // Птицеводство. 2022. № 7-8. С. 37–42. DOI: 10.33845/0033-3239-2022-71-7-8-00-00
- Лойда З., Госсрау Р., Шиблер Т. Гистохимия ферментов: лабораторные методы / Пер. с англ. И. Б. Бухвалова и О. В. Копьева; Под ред. Н. Т. Райхлина. М.: Мир, 1982. 272 с.
- Нефедьева Е. Э., Белопухов С. Л., Ермошина Е. С. Классификационный анализ гербицидов, разрешенных к применению в 2018 году // АгроЭкоИнфо. 2020. № 2 (40). С. 13.
- Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями и дополнениями).. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=477262> (дата обращения: 12.10.2025).
- Романова Е. М., Индирякова О. А., Куранова А. П. Перспективность использования моллюсков в биоиндикации загрязнения водных объектов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2008. Т. 4, № 20-1. С. 157–159.
- Тишина Е. А., Дроганова Т. С., Поликарпова Л. В., Васильев Н. В. Влияние фосфорсодержащих пестицидов на ферментативную активность и множественные формы кислой фосфатазы живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 2. С. 151–158. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-2-151-158
- Фомичева Е. М., Горулев П. А. Устойчивость пресноводного брюхоногого моллюска *Melanoides granifera* к воздействию пониженных температур // Принципы экологии. 2019. № 4 (34). С. 81–90.
- Abdel-Wahab H. M., Alnady A. H., Mohamed Z., Younis A. E. Acute toxicity of some heavy metals on *Melanoides tuberculata* (Gastropoda: Thiaridae) as a bioindicator: a biochemical and molecular study // Aswan University Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 3, № 4. P. 357–370.
- Andersch M. A., Szczypinski A. J. Use of P-nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase // American Journal of Clinical Pathology. 1947. Vol. 17, No 7. P. 571–574. DOI: 10.1093/ajcp/17.7_ts.571
- Kariyanna B., Senthil-Nathan S., Vasantha-Srinivasan P., Subba Reddy B. V., Krishnaiah A., Meenakshi N. H., Han Y. S., Karthi S., Chakravarthy A. K., Park K. B. Comprehensive insights into pesticide residue dynamics: unraveling impact and management // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2024. Vol. 11, № 1. P. 182.
- Kovačić I., Fafandel M., Perić L., Batel I. Effect of Environmental Pollutant Mixtures on Acid DNase Activity in Mussel *Mytilus galloprovincialis*: Ex Situ and In Situ Study // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2017. Vol. 99, No 4. P. 433–437. DOI: 10.1007/s00128-017-2162-y
- Lowry O. H., Rosenbrought N. J., Farr A. L., Rangel R. L. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent // J. Biol. Chem. 1951. Vol. 193, No 2. P. 265–275.
- Nusetti O., Marcano L., Zapata E., Esclapés M., Nusetti S., Lodeiros C. Immunological and antioxidant enzyme responses in the pearl oyster *Pinctada imbricata* (Mollusca: Pteridae) exposed to sublethal levels of fuel oil No 6 // Interciencia. 2004. Vol. 29. P. 324–328.

CHANGES IN THE BIOCHEMICAL PARAMETERS OF *MELANOIDES TUBERCULATA* UNDER THE EXPOSURE OF GLYPHOSATE

TISHINA
Ekaterina Alexandrovna

State University of Education, 24 Vera Voloshina St. Mytischki Moscow Region 141014 Russia, 89266182591@mail.ru

DROGANOVA
Tatyana Sergeevna

State University of Education, 24 Vera Voloshina St. Mytischki Moscow Region 141014 Russia, blackraven5@mail.ru

VASILIEV
Nikolai Valentinovich

DSc, State University of Education, 24 Vera Voloshina St. Mytischki Moscow Region 141014 Russia, kaf-obhim@guppros.ru

POLIKARPOVA
Lyudmila Viktorovna

State University of Education, 24 Vera Voloshina St. Mytischki Moscow Region 141014 Russia, ljudmilapolikarpova@yandex.ru

Key words:
freshwater mollusks
Melanoides tuberculata
pesticides
glyphosate

Summary: In current conditions of intensive agriculture, pollution of aquatic ecosystems with pesticides is becoming an urgent problem. One of the most common herbicides in the Russian Federation is Glyphosate, it occupies a special place. In search of biomarkers of pesticide pollution of water bodies, the study examined changes in the biochemical parameters of the mollusk *Melanoides tuberculata* under the influence of glyphosate. The study shows that the activity of the enzyme of the exchange complex - acid phosphatase of *Melanoides tuberculata* - changes significantly relative to the control values and this change has a phase character. This indicates a complex reaction of the mollusk to toxic effects. In parallel with the detection of changes in biochemical activity, the presence of an additional multiple form of acid phosphatase was determined electrophoretically. This indicates an epigenetic mechanism of adaptation of *Melanoides tuberculata* to the action of glyphosate. The obtained results not only expand our understanding of the biochemical mechanisms of adaptation of aquatic organisms to pollution, but also open up prospects for the development of new biomarkers that allow rapid assessment of the level of pesticide pollution of water bodies. This is especially important for monitoring the ecological state of water bodies and developing measures for their protection.

Reviewer: O. F. Filenko

Received on: 10 September 2025

Published on: 27 March 2026

References

- Abdel-Wahab H. M., Alnady A. H., Mohamed Z., Younis A. E. Acute toxicity of some heavy metals on *Melanoides tuberculata* (Gastropoda: Thiaridae) as a bioindicator: a biochemical and molecular study, Aswan University Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 357–370.
- Andersch M. A., Szczypinski A. J. Use of P-nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase, American Journal of Clinical Pathology. 1947. Vol. 17, No 7. P. 571–574. DOI: 10.1093/ajcp/17.7_ts.571
- Droганova T. S. Konichev A. S. Petrenko D. B. Polikarpova L. V. Cvetkov I. L. The effect of sodium fluoride and fluoroacetic acid on the activity of acidic DNase, acid phosphatase, and the spectrum of soluble proteins in *Viviparous viviparus*, Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki. 2017. No. 4. P. 36–45. DOI: 10.18384/2310-7189-2017-4-36-45
- Droганova T. S. Polikarpova L. V. Tishina E. A. Anka M. Petrenko D. B. Vasil'ev N. V. The effect of Zn²⁺ ions on the activity of acid nucleases in freshwater mollusks, Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya. 2022. No. 2. P. 219–224. DOI: 10.31857/S1026347022020056
- Droганova T. S. Polikarpova L. V. Tishina E. A. Changes in the activity and multiple forms of acid phosphatase

- of *Viviparus viviparus* under the influence of glyphosate-based herbicides, *Sovremennoe sostoyanie vodnyh bioresursov: Materialy konferencii*, Pod red. E. V. Pischenko, I. V. Moruzi. Novosibirsk: NGAU, 2019. P. 64–67.
- Fomicheva E. M. Gorulev P. A. Resistance of the freshwater gastropod *Melanoides granifera* to low temperatures, *Principy ekologii*. 2019. No. 4 (34). P. 81–90.
- Golovanova I. L. Aminov A. I. Physiological and biochemical status of fish under the action of glyphosate-containing herbicides (review), *Biologiya vnutrennih vod*. 2019. No. 2-2. P. 83–94. DOI: 10.1134/S0320965219030082
- Issues of environmental regulation and the development of a system for assessing the condition of reservoirs: Materials of the Joint Plenum of the Scientific Council of the DEA RAS on Hydrobiology and Ichthyology, the Hydrobiological Society at the RAS and the Interdepartmental Ichthyological Commission, Otv. red.: akademik RAN D. P. Pavlov, chlen-korr. RAN G. P. Rozenberg, d. b. n. M. I. Shatunovskiy. M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2011. 196 c.
- Kariyanna B., Senthil-Nathan S., Vasanth-Srinivasan P., Subba Reddy B. V., Krishnaiah A., Meenakshi N. H., Han Y. S., Karthi S., Chakravarthy A. K., Park K. B. Comprehensive insights into pesticide residue dynamics: unraveling impact and management, *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 182.
- Konin D. N. Konichev A. S. The effect of heavy metal ions on proteolytic activity in the liver of *Viviparus viviparus* L. mollusks, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2007. No. 1. P. 3–6.
- Kovačić I., Fafandel M., Perić L., Batel I. Effect of Environmental Pollutant Mixtures on Acid DNase Activity in Mussel *Mytilus galloprovincialis*: Ex Situ and In Situ Study, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2017. Vol. 99, No 4. P. 433–437. DOI: 10.1007/s00128-017-2162-y
- Lowry O. H., Rosenbrought N. J., Farr A. L., Rangal R. L. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent, *J. Biol. Chem.* 1951. Vol. 193, No 2. P. 265–275.
- Laptev G. Yu. Yl'dyrym E. A. Tyurina D. G. Il'ina L. A. Filippova V. A. Kalitkina K. A. Dubrovin A. V. Novikova N. I. Melikidi V. H. Gorfunkel' E. P. Ponomareva E. S. Okolelova T. M. What is the danger of glyphosate, *Pticevodstvo*. 2022. No. 7-8. P. 37–42. DOI: 10.33845/0033-3239-2022-71-7-8-00-00
- Loyda Z. Gossrau R. Shibler T. Histochemistry of enzymes: laboratory methods, *Per. s angl. I. B. Buhvalova i O. V. Kop'eva; Pod red. N. T. Rayhlina. M.: Mir*, 1982. 272 p.
- Nefed'eva E. E. Belopuhov S. L. Ermoshina E. S. Classification analysis of herbicides approved for use in 2018, *AgroEkolInfo*. 2020. No. 2 (40). P. 13.
- Nusetti O., Marcano L., Zapata E., Esclapés M., Nusetti S., Lodeiros C. Immunological and antioxidant enzyme responses in the pearl oyster *Pinctada imbricata* (Mollusca: Pteridae) exposed to sublethal levels of fuel oil No 6, *Interciencia*. 2004. Vol. 29. P. 324–328.
- Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dated December 13, 2016 «On Approval of Water Quality Standards for Water Bodies of fisheries Significance, including Standards for Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in the Waters of water bodies of fisheries significance» (with Amendments and additions). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=477262> (data obrascheniya: 12.10.2025).
- Romanova E. M. Indiryakova O. A. Kuranova A. P. The prospects of using shellfish in bioindication of water pollution, *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008. T. 4, No. 20-1. P. 157–159.
- Tishina E. A. Drogonova T. S. Polikarpova L. V. Vasil'ev N. V. The effect of phosphorus-containing pesticides on the enzymatic activity and multiple forms of acid phosphatase of *Viviparus viviparus* L., *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2024. No. 2. P. 151–158. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-2-151-158



УДК 591.1:591.5:632.681

ЗНАЧЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ И НА РАЗНЫХ ГЛУБИНАХ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ УШАСТОЙ КРУГЛОГОЛОВКИ, *PHRYNOCEPHALUS MUSTACEUS*, НА БАРХАНЕ САРЫКУМ (РЕСПУБЛИКА ДАГЕСТАН, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ)

ЧЕРЛИН

Владимир Александрович

доктор биологических наук, Дагестанский государственный университет, 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 43-а, cherlin51@mail.ru

ОКШТЕЙН

Игорь Леонидович

Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 117218, г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25, okshtein@yandex.ru

ЛАБАЗАНОВ

Ибрагим Махмудович

Дагестанский государственный университет, 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 43-а, ibralabz.0@bk.ru

Ключевые слова:

ушастая круглоголовка
динамика факторов внешней среды
внутренние термальные потребности
внешние тепловые условия

Аннотация: В статье описываются закономерности суточной и сезонной динамики температуры на поверхности и в почве на разных глубинах во всей зоне, задействованной ушастыми круглоголовками (*Phrynocephalus mystaceus*) в их жизнедеятельности на бархане Сарыкум в Дагестане (от 2 см над поверхностью песка до примерно 80 см в его глубине). Эти различные слои воздуха и почвы предоставляют круглоголовкам богатый выбор термальных условий, позволяющий им регулировать температуру тела и организовывать их необходимые суточную и сезонную динамики, регулировать и способствовать протеканию у них в оптимальном режиме сезонных физиологических циклов. Показано, как отдельные температурные параметры внешней среды по-разному используются ящерицами для своей жизнедеятельности. Все описанные закономерности иллюстрируют скоординированное функциональное единство параметров гомеостаза, эндогенных потребностей в реализации сезонных физиологических циклов и динамики факторов внешней среды.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: А. А. Кидов

Получена: 24 ноября 2025 года

Подписана к печати: 27 марта 2026 года

Введение

На суточные и сезонные режимы активности ящериц большое влияние оказывают температуры воздуха и почвы. Но мы уже давно обращали внимание на то, что разные температуры окружающей среды могут функционально выступать для каких-то процессов или форм активности как оптимальные, как ограничивающие, как сигнальные, как опосредованные показатели тех или иных форм активности, физиологических состояний или циклов, как показатели сезонного состояния биотопа и фаз сезонных физиологических циклов у рептилий и т. п. При этом температура воздуха в приземном слое или на высоте 1–1.5 м над землей, температура поверхности почвы на горизонтальной поверхности или на склонах разной ориентации, на открытых участках или в тени, температура почвы на разных глубинах (5, 10, 20, 30, 50, 80, 100 см) несут разную функциональную нагрузку в экологии различных видов (Черлин, Целлариус, 1981; Черлин, Музыченко, 1983а, б; Черлин, 1988, 2021).

Кроме того, следует обратить внимание на то, что бархан Сарыкум – рефугиум среднеазиатской флоры и фауны на северо-востоке Кавказа, в течение десятков тысяч лет отделенный от исходной, «материнской» территории на сотни километров. Популяция ушастых круглоголовок, которая населяет бархан, длительное время изолирована от основного ареала и приобрела морфологические, физиологические, поведенческие особенности (Хонякина, 1965; Джамирзоев и др., 2011; Мазанаева, 2020). В связи с этими особенностями бархану был присвоен статус Особо охраняемой природной территории (ООПТ) и он был включен как отдельный участок в Дагестанский государственный заповедник.

Основной целью нашей работы было изучение значения разных участков биотопа ушастых круглоголовок с различными климатическими условиями в их экологии для реализации определенных физиологических процессов, сезонных циклов, поведенческих комплексов и состояний.

Материалы

Материалом для настоящей статьи явились два основных «блока»:

1) многолетние (более 55 лет) исследования одного из авторов (В. А. Черлина) по термобиологии и физиологической экологии разных групп и видов рептилий в естественных природных условиях в разных регио-

нах СССР и Российской Федерации (Черлин, 1988, 2013а, б; Черлин, Музыченко, 1983а, б); в течение многих лет одним из важных объектов исследований были ушастые круглоголовки (*Phrynocephalus mystaceus*), физиологическую экологию которых изучали в пустынях Каракумы (Туркменистан) и Кызылкумы (Узбекистан) (Черлин, Музыченко, 1983а, 1988);

2) исследования физиологической экологии ушастых круглоголовок всеми авторами данной статьи на бархане Сарыкум в Республике Дагестан в течение 8 лет 9с 2018 по 2025 г.) (Окштейн и др., 2021; Окштейн, Черлин, 2021; Черлин и др., 2023; Черлин, Лабазанов (в печати)).

Методы

Методики полевых исследований, проводимых до 2022 г., подробно описаны нами в многочисленных публикациях и сведены воедино в отдельных книгах (Черлин, 2010, 2014). Основными элементами этих исследований были наблюдения за ящерицами на маршрутах, отлов и измерения температур их тела и окружающей среды, изучение динамики температур почвы и воздуха на метеорологических площадках непосредственно в местах работ. После чего полученные данные специальным образом обрабатывались, что также описано в предыдущих публикациях (Черлин, 2013в, 2014). Подробно рассматривать детали этой обработки в данной статье не имеет смысла, поскольку в ней такая обработка данных нами не применялась.

Исследования на бархане Сарыкум были начаты в 2018 г. с применением описанной выше методики, с отловами и измерениями температуры тела ящериц и внешней среды с помощью контактного двухканального измерителя температуры Mastech MS6512 фирмы Precision Mastech с крохотной термопарой типа К в качестве датчика. Но с 2022–2023 гг. мы начали дополнительно применять новые технические средства – логгеры температуры ДТН3-28 (производитель ООО ЭМБИ РЕСЕРЧ, Россия, г. Новосибирск) весом 0.8–0.9 г и объемом 0.6 см³ с продолжительностью автономной работы до 5 месяцев. А в 2024–2025 гг. мы начали использовать логгеры температуры ДТН-5-448 того же производителя. Эти логгеры имели те же размеры, что и предыдущие, но продолжительность их автономной работы была уже больше 6 месяцев (Petrovskii, Zavjalov, 2023). Кроме регистрации температуры тела, оба типа

логгеров регистрировали и интенсивность двигательной активности ящериц. С соблюдением всех ветеринарных норм логгеры внедрялись интраперитонеально в ушастых круглоголовок на бархане Сарыкум (Окштейн, Черлин, 2021). Они давали возможность получать непрерывный график температуры тела и регистрировать динамику их активности вначале в течение 2–3 месяцев, а позже – в течение примерно полугодия, включая период зимовки. Это уже были данные совершенно нового типа и качества.

В то же время на бархане, непосредственно в месте работ, нами устанавливалась автоматическая метеорологическая площадка. Она была составлена из нескольких логгеров температуры типа RC-4 фирмы Elitech, которые мы использовали как климатические приборы. Логгеры имели отдельные выносные датчики на мягком проводе длиной примерно 1 м. Они позволяли получать подробные графики температур непрерывно в течение более полугодия. Логгеры регистрировали температуру приземного слоя воздуха на высоте 2 см, температуру поверхности почвы, температуру песка на разных глубинах, например 5, 30, 50 и 80 см. Один раз за каждый полевой сезон (весной или осенью) мы вырывали шурф глубиной 1 м и измеряли температуру на глубине 100 см. Чаше измерять температуру на больших глубинах не имело смысла, потому что колебаний температур в течение дней и недель там вообще не происходит (Черлин, Целлариус, 1981).

Кроме того, осенью 2025 года заместитель директора по науке Государственного природного заповедника «Дагестанский» Гаджибек Сефибекович Джамирзоев любезно предоставил нам во временное пользование тепловизионный бинокль ACCOLADE XP50 Фирмы «Pulsar». Этот прибор позволил не только инструментально зарегистрировать сам факт поздневечерней активности круглоголовок, но и изучить температурные условия этой активности, температурный баланс тела ящериц в это время, который в сумерках сильно отличается от дневного.

Результаты

Разные части биотопа, а следовательно, и их различные температурные условия могут иметь неодинаковое функциональное значение в экологии рептилий. В различных частях биотопа практически всегда имеется больша́я мозаичность температурных условий. Например, в верхней части бархана Сарыкум, где в основном живут ушастые

круглоголовки, можно выделить: открытые песчаные пространства с горизонтальными поверхностями и со склонами разной ориентации по отношению к солнцу, с участками, в разной степени заросшими травянистой и кустарниковой растительностью, с открытыми в данный момент, т. е. освещенными солнцем или находящимися в тени, участками, с норами разной глубины, которые круглоголовки роют для разных целей, и т. п. Кроме того, все эти части биотопа существуют рано утром, днем в жару, вечером, в сумерках, в начале или середине ночи. То есть одни и те же микробиотопические участки в разное время суток могут иметь различные функции. Таким образом, внешняя среда предоставляет ящерицам огромное разнообразие температурных условий и возможных направлений их функционального использования. Более ранние наши исследования уже показали ряд вариантов функционального значения различных температурных факторов внешней среды (Черлин, Музыченко, 1983б).

Ограничения

1. Ряд внешних факторов ограничивают активность животных. Так, наши работы в Каракумах (Туркменистан) показали, что ушастые круглоголовки не могут быть активны на открытых пространствах с температурой поверхности песка выше 58–59 °С (в данной статье все температуры указываются в градусах Цельсия), поскольку пальцы этих ящериц не выдерживают более высокую температуру (Черлин, Музыченко, 1988).

2. Кроме того, в жаркое время круглоголовки также вынуждены уходить в убежища (в норы), когда температура воздуха в приземном слое и очень близкая к ней температура поверхности песка в тени начинают превышать 42–43°. Это объясняется тем, что максимальная температура тела у круглоголовок при полной активности как раз 42–44°. Чтобы остановить рост температуры тела в такое время, ящерицы в первую очередь уходят в тень, где она, в отсутствие прямого солнечного излучения, почти полностью соответствует температуре воздуха в приземном слое и температуре поверхности почвы в тени. Если же температура внешней среды в середине дня продолжает расти, то у ящериц нет никакой другой возможности не только снизить температуру тела или остановить ее рост, как только уйти с поверхности в норы (Черлин, Музыченко, 1983а). На бархане Сарыкум, по нашим наблюдениям,

ушастые круглоголовки также не выходят на открытые пространства с температурой поверхности песка выше 58–59°.

Таким образом, оба указанных ограничения существенно влияют на режим активности ящериц.

Формирование циклов активности

Указанные в предыдущем абзаце ограничения функционально проявляются в том, что ушастые круглоголовки вынуждены либо уходить с открытых участков песка в тень, либо вообще покидать поверхность почвы, что, естественно, отражается на суточном режиме их активности.

На бархане Сарыкум максимум температуры поверхности почвы (65–70°) наступает примерно в 12–14 часов, минимум (25–28°) –

около 4–6 часов утра. Амплитуда колебаний температуры поверхности почвы составляет примерно 40° или даже немного больше. Уходя в норы, круглоголовки оказываются на глубине около 20–30 см. Динамика температуры почвы в норах, где ящерицы проводят большую часть времени, соответствует температуре почвы на этих же глубинах. Амплитуда суточных колебаний температуры в этой зоне существенно меньше (всего 4–5°): максимум около 33–34°, минимум – примерно 29–30°. При этом экстремумы температуры наступают на этой глубине существенно позже, чем на поверхности, т. е. минимум – около 10–11 часов, а максимум – в 19–20 часов (рис. 1).

Еще более отчетливо эта закономерность видна в форме, представленной на рис. 2.

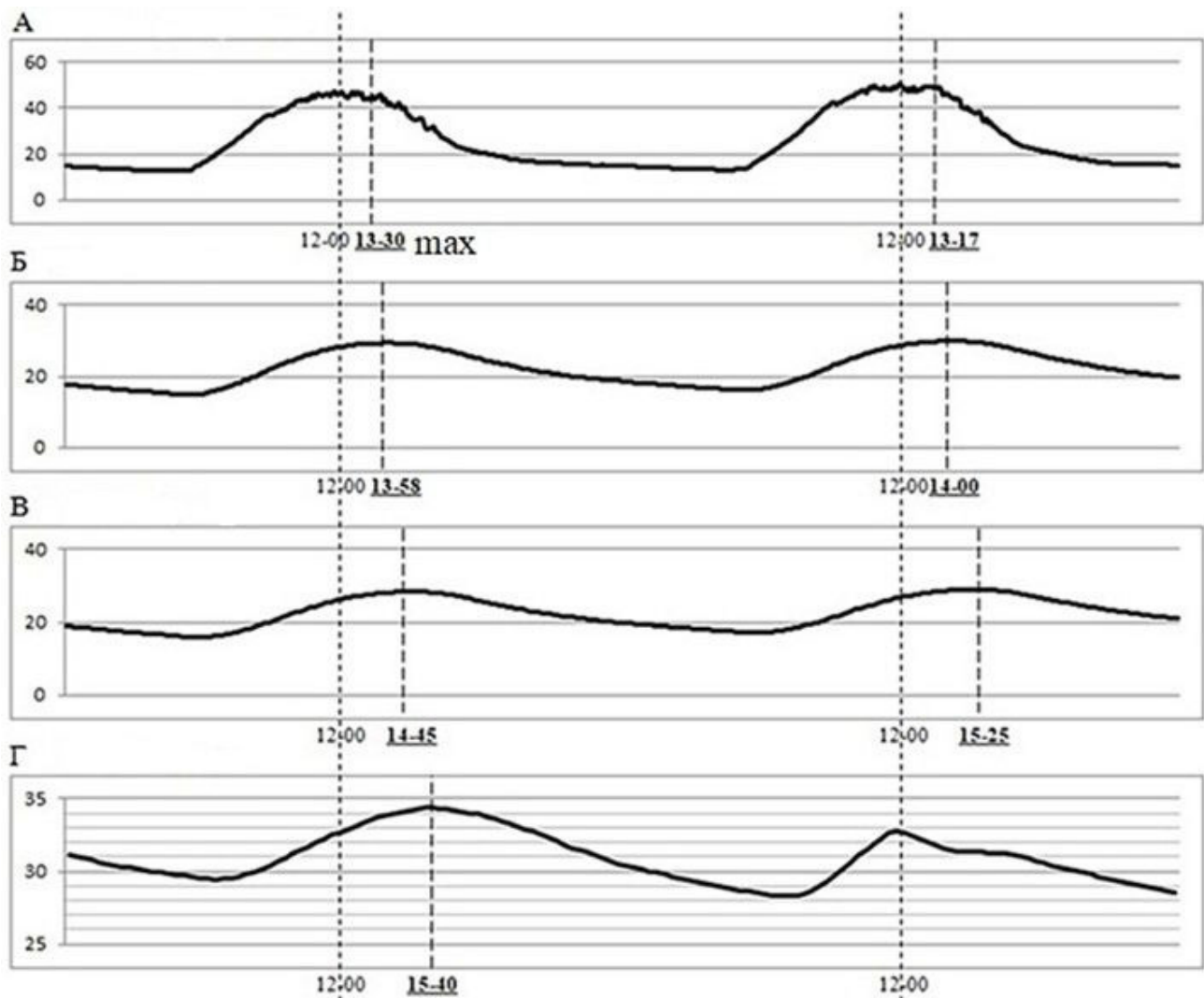


Рис. 1. Распределение и динамика температур 20–21.05.2024 на поверхности песка (А) и на разных глубинах – 5 (Б), 10 (В) и 20 см (Г) на бархане Сарыкум

Fig. 1. Distribution and dynamics of temperature on 20–21.05.2024 on the surface (A) and in the soil at different depths – 5 (B), 10 (B) and 20 cm (Г) in spring on the Sarykum dune

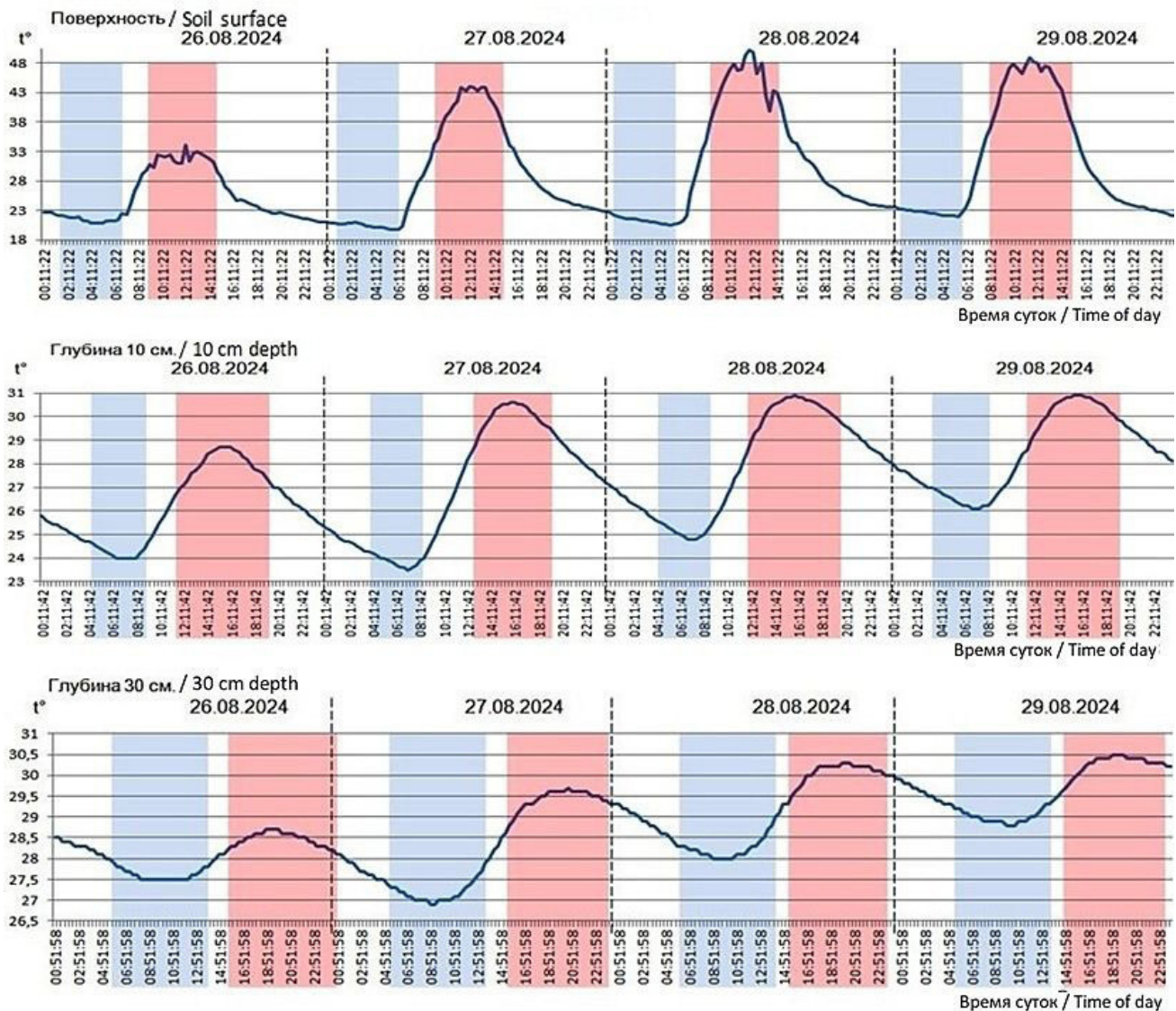


Рис. 2. Распределение и динамика температуры на поверхности и в почве на разных глубинах (10 и 30 см) осенью на бархане Сарыкум, полученные с помощью климатических логгеров. Розовыми полосами отмечены периоды, в которые наблюдались максимумы температуры на соответствующих глубинах, голубыми полосами – минимумы

Fig. 2. The distribution and dynamics of temperature on the surface and in the soil at different depths (10 and 30 cm) in autumn on the Sarykum dune, obtained using climate loggers. Pink bars indicate periods of maximum temperatures at the corresponding depths, and blue bars indicate minimum temperatures

На рис. 3 показано, как температурные факторы внешней среды достаточно жестко определяют возможные время и место нахождения ушастых круглоголовок (*Phrynocephalus mystaceus*) на бархане Сарыкум прохладной весной и жарким летом, т. е. как они формируют структуру их пространственно-временной активности, их экологические проявления.

Данная статья и многие другие опубликованные материалы – пример того, как динамика температур внешней среды, с одной стороны, и физиологические ограничения, с другой стороны, организуют пространственно-временную структуру суточной актив-

ности отдельных видов рептилий (Черлин, Целлариус, 1981; Черлин, 1988, 2019, 2021). В целом мы можем выявить несколько основных направлений проявления таких взаимодействий.

Оптимизация

В теплый период в активности ушастых круглоголовок имеется ряд периодов, в которые они стараются реализовать определенные физиологические потребности. Так, днем, особенно когда температура окружающей среды повышается настолько, что начинает угрожать нормальной жизнедеятельности или даже жизни круглоголовок,

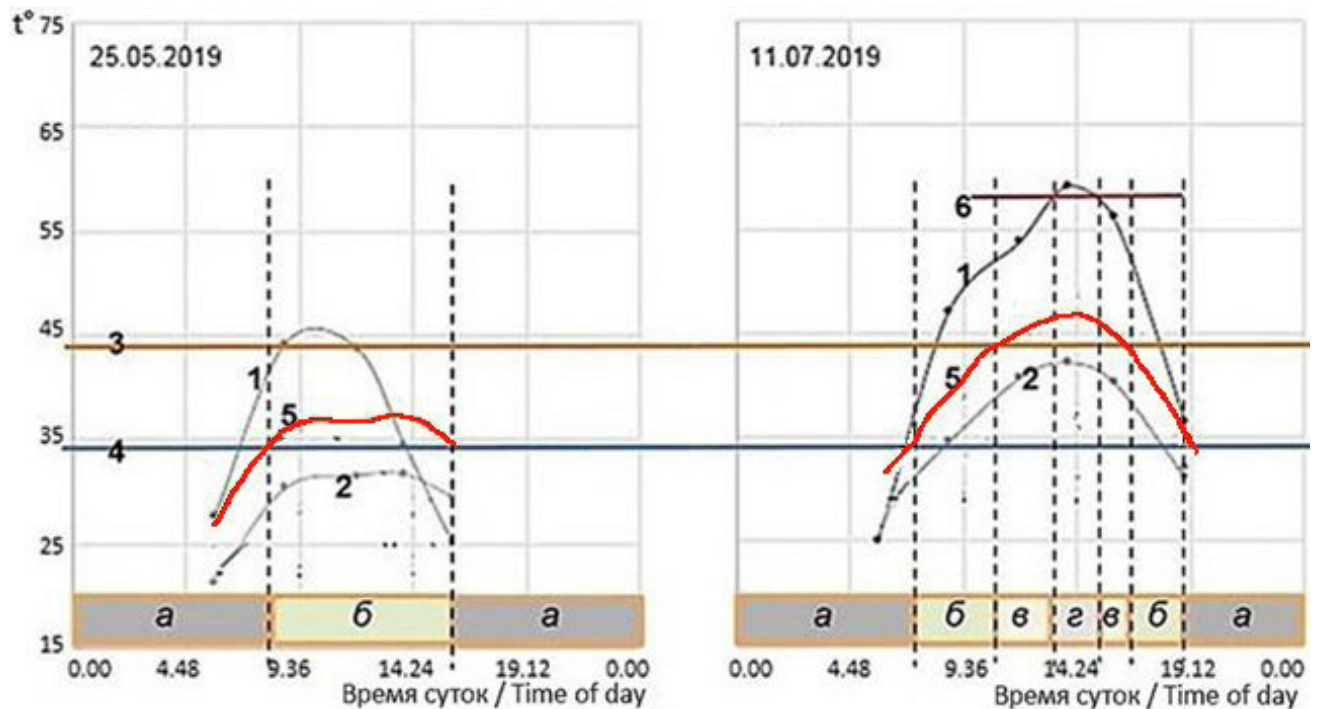


Рис. 3. Прогноз динамики режимов активности ушастых круглоголовок весной и летом на бархане Сарыкум. t° – температура; 1 – температура поверхности песка; 2 – температура воздуха на высоте 2 см; 3 – максимальная температура тела при полной активности у ушастых круглоголовок; 4 – минимальная температура тела при полной активности у ушастых круглоголовок; 5 – (красная линия) расчетная температура тела ушастых круглоголовок (расчетная температура тела = температура воздуха на высоте 2 см + 5°); 6 – критический уровень температуры поверхности почвы (58–59°), выше которого круглоголовки не могут находиться на поверхности. *а* – ночной покой, *б* – термостабилизирующее поведение (форма активности, при которой ящерицы реализуют комплекс поведенческих актов, направленных на удовлетворение своих индивидуальных потребностей, видоспецифичных потребностей жизнеобеспечения популяции и взаимодействие с биотическим окружением, т. е. выполняют активную функцию в биоценозе – питание, внутривидовые коммуникации, связанные с размножением, территориальностью, поддержанием социальной структуры популяции и т. п., межвидовые коммуникации – охрана территории и т. п.; температура их тела при этом активно удерживается или пассивно оказывается в определенном нешироком диапазоне температур полной активности, внутри которого стремится оказаться в еще более узких рамках – в диапазоне температур термостабилизации (Черлин, 2014)); *в* – активность преимущественно в тени, *г* – нахождение исключительно в тени или уход в норы

Fig. 3. Forecast of the dynamics of the modes of activity of toad-headed agamas (*Phrynocephalus mystaceus*) in spring and summer on the Sarykum dune. t° is the temperature; 1 – the sand surface temperature; 2 – the air temperature at a height of 2 cm; 3 – the maximum body temperature at full activity in toad-headed agamas; 4 – the minimum body temperature at full activity in toad-headed agamas; 5 – (red line) the calculated body temperature of toad-headed agamas (calculated body temperature = air temperature at a height of 2 cm + 5°); 6 – the critical level of soil surface temperature (58–59°), above which agamas cannot be on the surface. *a* – nocturnal rest, *б* – thermostabilizing behavior (a form of activity in which lizards implement a set of behavioral acts aimed to realize their individual needs, species-specific life support needs of the population and interaction with the biotic environment, i. e. they perform an active function in the biocenosis – nutrition, intraspecific communications related to reproduction, territoriality, maintenance of the social structure of the population, etc., interspecific communications – protection of the territory, etc.; at the same time, their body temperature is actively maintained or passively appears in a certain narrow temperature range of full activity, within which it tends to be in an even narrower range – in the temperature range of thermal stabilization (Cherlin, 2014)); *в* – activity mainly in the shade, *г* – activity exclusively in the shade or going into burrows

ящерицы либо переходят в тень, либо закапываются в верхние слои песка, либо уходят в норы. Это период дневного отдыха. И в это время, в любом случае, они стараются удерживать температуру своего тела примерно на некотором оптимальном уровне. На рис.

4 коричневым овалом выделен такой период дневного отдыха, в течение которого круглоголовки, находясь в норе, удерживают температуру примерно на одном уровне – около 35°.

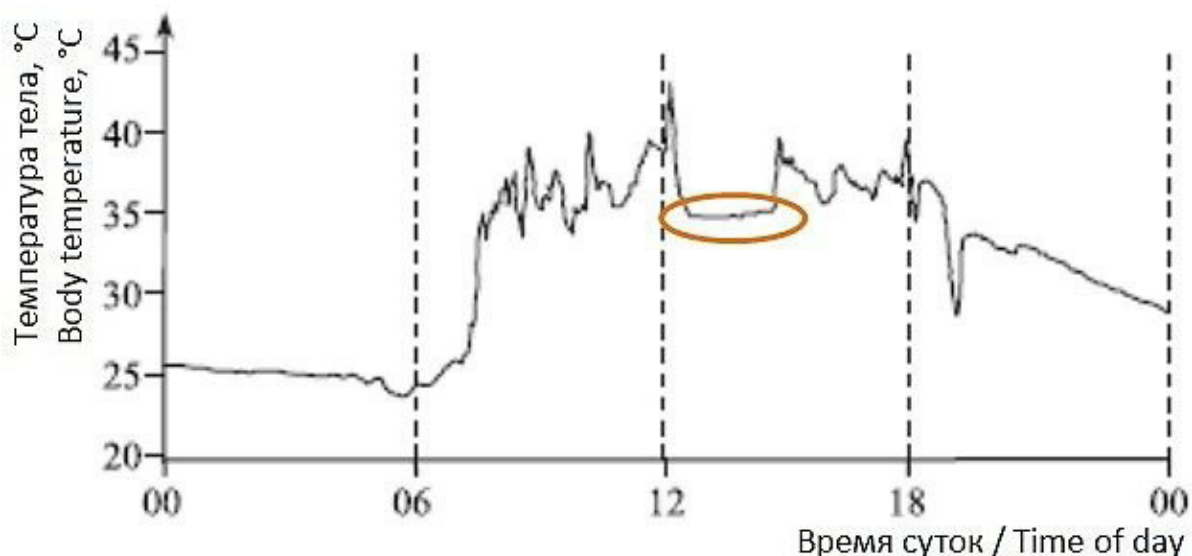


Рис. 4. Температура тела ушастой круглоголовки 31.08.2022, зафиксированная с помощью логгера
Fig. 4. Body temperature of the toad-headed agama in August 31, 2022, recorded by the logger

Регулирующие реакции

Эта регуляция возможна исключительно вследствие наличия тепловой мозаичности внешней среды, которая используется рептилиями для поведенческой регуляции температуры тела.

Длительные наблюдения над динамикой температуры тела ушастых круглоголовок и внешней среды, полученные с помощью логгеров на бархане Сарыкум (рис. 5), показывают, что, несмотря на изменчивость погодных условий и температурных показателей в разные дни, температура тела круглоголовок удерживается в определенном довольно узком диапазоне температур полной активности – примерно 35–42° (Черлин, 2025). Следовательно, мы имеем дело с хорошо развитыми и организованными регуляторными реакциями.

Одни и те же участки (микробиотопы) могут использоваться ящерицами для нагрева и остывания в разных режимах. Так, весной и осенью, т. е. в более прохладные сезоны, круглоголовки нагреваются на открытых участках («режим грелки»). Летом, в самую жару, находиться на открытых участках для ящериц становится невозможно (об этом мы писали выше), и они вынуждены переходить в «режим противодействия нагреванию», для чего уходят в полутень, в ажурную тень, в плотную тень, забираются на пучки травы, закапываются в верхний слой песка, уходят в норы, т.е. уходят в любое место, где в данное время тепловая нагрузка меньше. В это жаркое время в тени, в верхних слоях песка и в норах прохладнее, чем на поверхности.

Другими словами, «грелками» тогда являются открытые поверхности песка, а участки в тени, верхние слои почвы и норы служат местами для противодействия нагреванию.

Но летом и в начале осени, когда погода еще теплая, на бархане Сарыкум нами было описано удивительное явление – поздневечерняя и ранненочная активность ушастых круглоголовок (Окштейн, Черлин, 2021). В это время в сумерки, в плотные сумерки и уже практически в темноте эти вроде бы совершенно дневные ящерицы выходили из своих убежищ (выкапывались из верхних слоев песка или вылезали из нор) и некоторое время, иногда уже практически в темноте, вели активность, осуществляя все те же действия, что и днем, но только при температурах тела примерно на 5–10° ниже, чем днем. В этот теплый период соотношения температур тела и внешней среды менялись. Поздно вечером и в начале ночи температура на поверхности песка составляла вскоре после захода солнца примерно 26–30°, позже она постепенно опускалась и становилась на несколько градусов ниже. Но при этом температура в слое песка на глубине 5 см, куда в основном закапываются круглоголовки, была около 30–32°. Получалось, что круглоголовки, начиная свою вечернюю активность, оказывались на несколько градусов теплее, чем температуры среды на поверхности (рис. 6). Немного позже они постепенно остывали, но затем либо «прикапывались» в верхний слой песка, либо уходили в норы, где в это время было существенно теплее. То есть они использовали

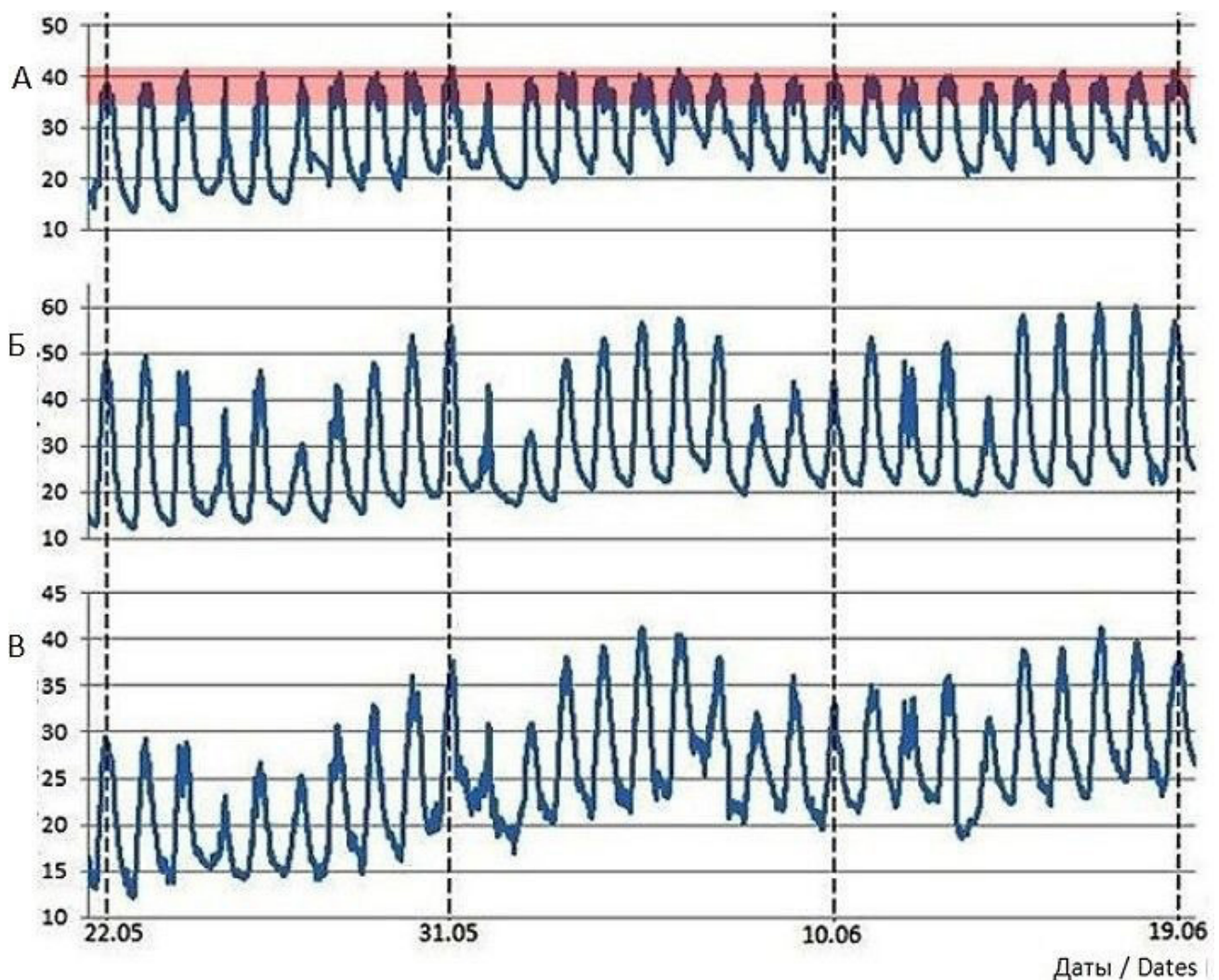


Рис. 5. Динамика температуры тела ушастой круглоголовки, *Phrynocephalus mystaceus*, полученная с помощью внедренного интраперитонеально логгера, и динамика температур внешней среды, полученных с помощью климатических логгеров, с 22 мая по 19 июня 2024 г. на бархане Сарыкум (Республика Дагестан, РФ) (по: Черлин, 2025). А – температура тела, Б – температура поверхности почвы (песка), В – температура воздуха на высоте 3 см от поверхности песка. Розовая полоса выделяет примерный температурный диапазон полной активности у круглоголовок

Fig. 5. Dynamics of the body temperature of the toad-headed agama, *Phrynocephalus mystaceus*, obtained by using an intraperitoneally embedded logger, and the dynamics of ambient temperatures, obtained by using climatic loggers from May 22 to June 19, 2024 on the Sarykum dune (Republic of Dagestan, Russian Federation) (according to Cherlin, 2025). A – the body temperature, Б – the soil surface temperature, В – the air temperature at a height of 3 cm above the surface of the sand. The pink stripe highlights the approximate temperature range of full activity in toad-headed agamas

эти слои почвы как «грелки». Такие ситуации проиллюстрированы на рис. 6.

Показатели сезонного состояния биотопа и фаз сезонных физиологических циклов у рептилий

Если исследователь приезжает в какое-либо место, например весной на бархан Сарыкум в Дагестане, и обнаруживает, что там уже тепло, температура воздуха достигает 28–30°, а температура поверхности песка в середине дня 45–50°, то он может предположить, что здесь немного ранее прошел достаточно длительный период с теплой

погодой, что рептилии уже давно вышли, у них в разгаре половая активность, самки начинают беременеть и т. п. Но на самом деле весной погода довольно изменчивая, и вполне вероятно, что предыдущее время было холодное, а теплая погода началась только с неделю назад, и рептилии еще совсем недавно вышли из зимовки. Как это распознать? Как точно определить фенологическую фазу на настоящий момент? Как понять, в каком физиологическом состоянии могут находиться в данный момент, например, ушастые круглоголовки на бархане?

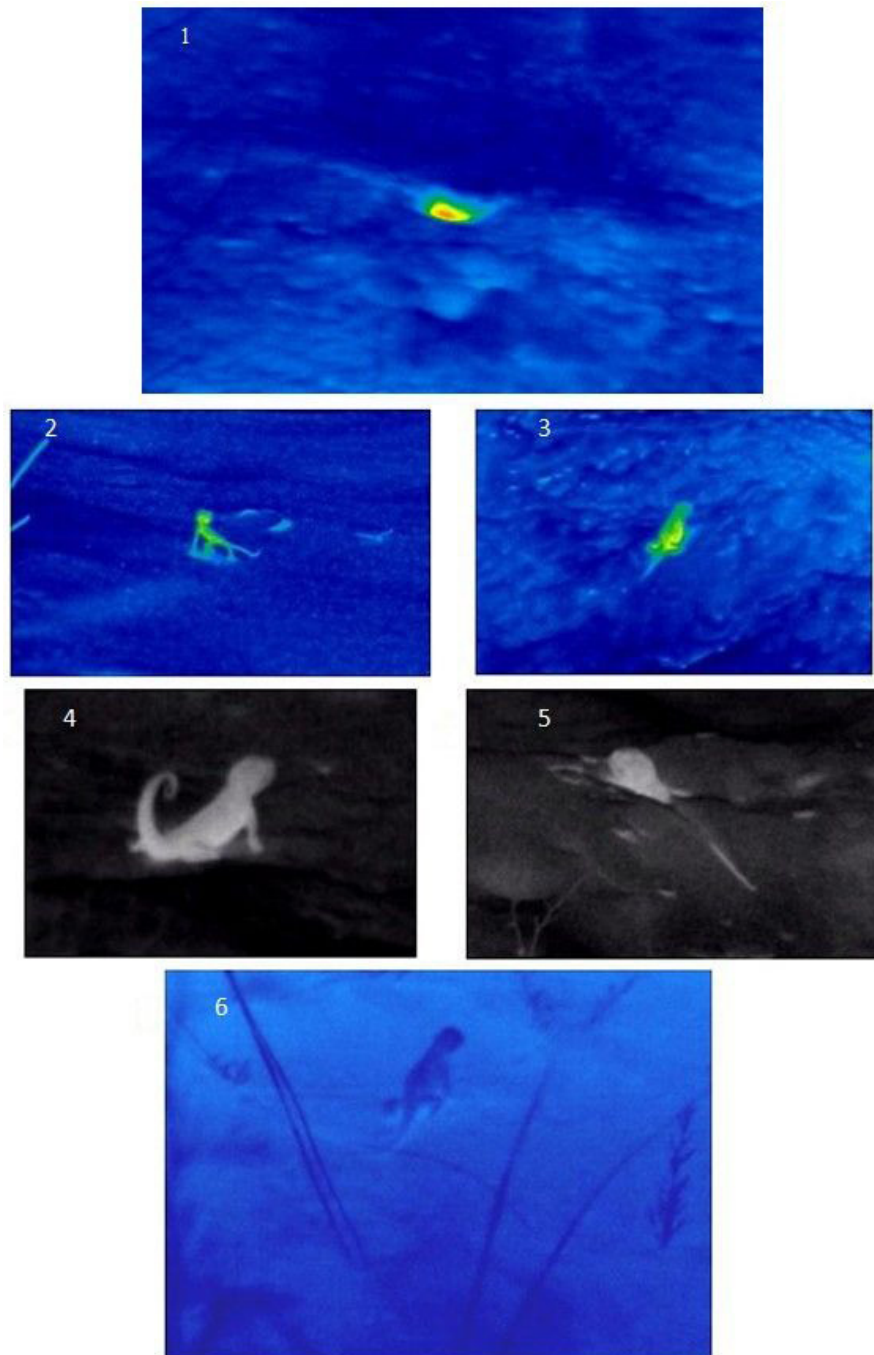


Рис. 6. Фотографии поздневечерней активности ушастых круглоголовок, выполненные И. Л. Окштейном с помощью тепловизионного бинокля. Комментарии к отдельным фотографиям приведены в тексте. 1 – теплая нора ярко выделяется на фоне прохладной поверхности песка; 2 – сеголеток ушастой круглоголовки имеет более нагретое ядро тела; 3 – круглоголовка имеет более нагретую нижнюю часть тела, поскольку она явно недавно сидела на более разогретом участке, который раскопала; 4 – нагретая взрослая круглоголовка сидит на прохладном песке; 5 – на фоне прохладной поверхности песка торчит передняя часть туловища круглоголовки, нагретая в верхних, еще теплых слоях песка; 6 – взрослая круглоголовка, которая, видимо, некоторое время была активной на поверхности, остыла в более прохладном воздухе и в данный момент оказалась прохладнее, чем поверхность песка

Fig. 6. Photographs of the late evening activity of toad-headed agamas, taken by I. L. Okshtein using Thermal imaging binocular. 1 – the warm burrow stands out vividly against the background of the cool sand surface; 2 – the fingerling of the toad-headed agama has a warmer body core; 3 – the toad-headed agama has a warmer lower part of its body, since it has clearly recently been sitting on a warmer area that it had excavated; 4 – a heated adult toad-headed agama is sitting on cool sand; 5 – the front part of the body of the toad-headed agama sticks out against the background of the cool sand surface, heated in the upper, still warm layers of sand; 6 – an adult toad-headed agama, which, apparently, had been active on the surface for some time, then cooled down in cooler air and at the moment turned out to be cooler than the sand surface

Оказывается, возможность это оценить есть. Для этого имеет смысл изучить дина-

мику температур в почве на глубине 80–100 см (рис. 7).

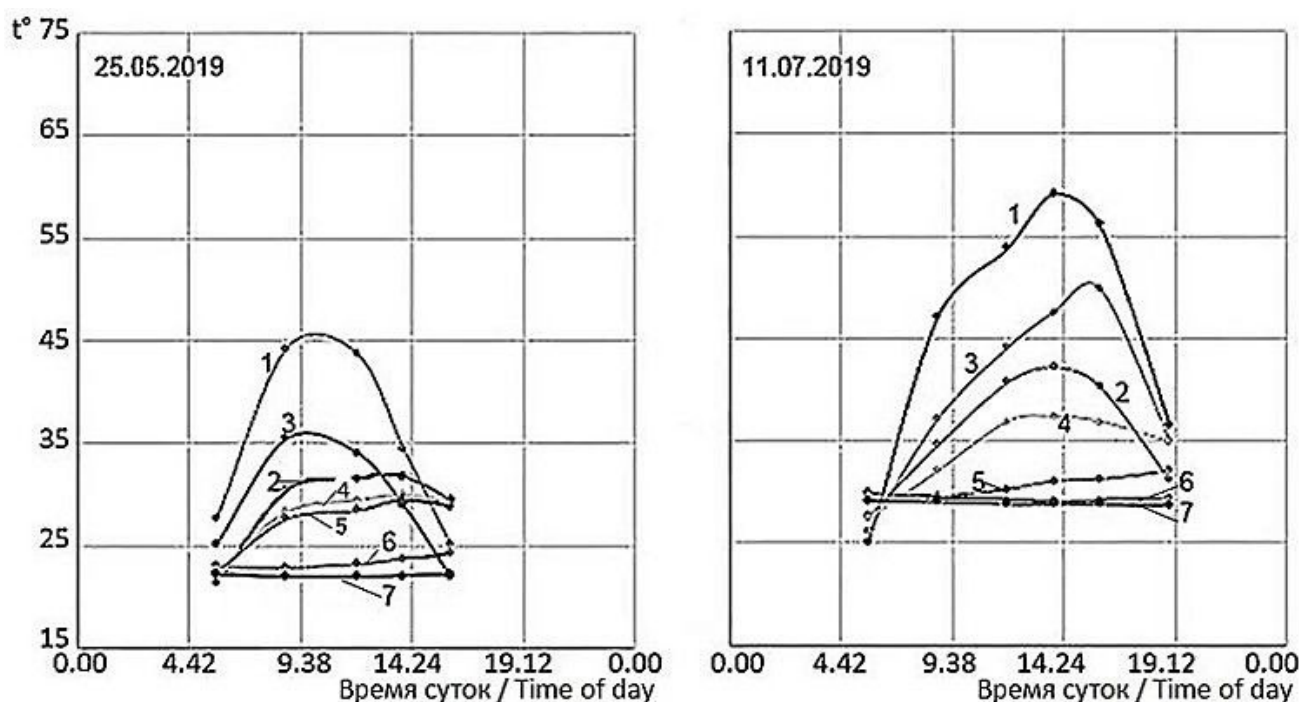


Рис. 7. Динамика климатических температур (пример типичных дней) в мае и июле на бархане Сарыкум. t° – температура; 1 – температура поверхности песка; 2 – температура воздуха на высоте 3 см; 3 – температура почвы на глубине 5 см; 4 – температура почвы на глубине 10 см; 5 – температура почвы на глубине 30 см; 6 – температура почвы на глубине 50 см; 7 – температура почвы на глубине 80 см

Fig. 7. The dynamics of climatic temperatures (example of typical days) in May and July on the Sarykum dune. t° – the temperature; 1 – the temperature of the sand surface; 2 – the air temperature at a height of 3 cm; 3 – the soil temperature at a depth of 5 cm; 4 – the soil temperature at a depth of 10 cm; 5 – the soil temperature at a depth of 30 cm; 6 – the soil temperature at a depth of 50 cm; 7 – the soil temperature at a depth of 80 cm

Из рис. 7 видно, что суточная динамика температур приземного слоя воздуха и почвы на небольших глубинах (примерно до 30 см) вполне отчетливая, она может быть изменчивой в связи с погодными колебаниями, ярко проявляющимися прежде всего в весенний и осенний периоды. А вот суточной динамики температуры в почве уже на глубинах примерно от 50 см и глубже вообще не прослеживается. Зато общий уровень этих температур на глубине 80 см с ранней весны (с конца марта – апреля) до середины лета и начала осени (до июля – начала августа) постепенно возрастает с 18–20° до 30–32°. И даже если на поверхности погода в это время изменчивая и неустойчивая, температуры на глубине 80–100 см будут показывать эти плавные, закономерно-сезонные изменения. Таким образом, температуры почвы на глубинах 80–100 см могут служить верным показателем фенологической фазы

в сезоне. Что бы исследователь ни застал на поверхности, приехав на бархан, – холод или тепло, температура на этих больших глубинах четко покажет: сейчас фенологическая весна, лето или осень, чего можно ждать, например, от ящериц – бурной половой активности, встреч беременных самок, новорожденных, активного питания, вечерней активности и т. п. Так, например, застав весной на поверхности теплую погоду, но зная, что на глубине 80 см в это время температура 21°, исследователь должен понимать, что сейчас, несмотря на тепло, все равно еще ранняя весна со всеми соответствующими этому фенологическими и физиологическими процессами.

Другими словами, не бархане Сарыкум (как и в других пустынных регионах) температуры почвы на глубинах 80–100 см достаточно точно показывают (как индикатор), в какой фенологической фазе находится при-

рода и в какой фазе сезонных физиологических циклов находятся живущие тут рептилии.

Обсуждение

Значение температуры приземного слоя воздуха

Температура приземного слоя воздуха (на высоте 2–3 см, т. е. в слое, в котором реально живут круглоголовки) также играет большую регулируемую роль. Она эффективно влияет на тепловой баланс тела, позволяя ящерицам вести полную активность при 36–39°, но не давая им быть активными, если она повышается до 41–42° и выше.

Значение температуры поверхности почвы

Как мы уже описывали выше, температура поверхности почвы (песка) эффективно участвует в формировании пространственно-временной структуры суточной активности ушастых круглоголовок. Она ограничивает и модифицирует активность ящериц, по крайней мере – сверху, но, скорее всего, и снизу тоже. Высокие температуры поверхности (выше 58–59°) не дают круглоголовкам находиться на открытых пространствах, «загоняют» их в тень, иногда даже заставляют забираться на пучки травы или на упавшие ветки, закапываться в верхние слои песка или уходить в норы.

Значение температуры на глубине 5–10 см

Одной из важных особенностей поведения ушастых круглоголовок является то, что при опасности и в ситуациях, когда им просто надо уходить с поверхности в жару, они боковыми движениями тела закапываются, как будто «тонут» в песке. Они оказываются на глубине около 5 см, редко – до 10 см. В этом положении и в этом слое песка они проводят довольно много времени. Поэтому знание температурных условий на этой глубине и их суточной динамики очень важно для изучения экологии ушастых круглоголовок.

Весной этот слой песка еще недостаточно прогревается. Границы суточных колебаний температуры в нем могут быть примерно от 10–12 до 30°, а суточная амплитуда колебаний около 15°. В это время круглоголовки большую часть времени проводят на открытых пространствах на поверхности песка, греясь и ведя активность на солнце. Важно то, что для правильного созревания половых продуктов ящерицам, как и всем рептилиям, требуется, чтобы хотя бы часть времени они проводили в достаточно холодных услови-

ях (Angelini et al., 1979, 1982; Action..., 1981; Callard et al., 1972; Licht, 1973; Bradshaw et al., 1980; Cowles, Bogert, 1944; Lang, 1979; Matz, 1984; Regal, 1966; Saint-Girons, 1982; Witten, Heatwole, 1978). Именно такая ситуация складывается у них весной: уходя с поверхности в норы или закапываясь в верхний слой песка, они попадают в холодные условия. И именно в этот период у них начинается половая активность, у самцов и у самок созревают половые продукты.

Летом в этом верхнем слое песка температуры колеблются примерно от 23–25 до 39–43° с суточной амплитудой колебаний около 10–15°. Таким образом, общий уровень температуры в этом слое повышается до уровня, близкого к предпочитаемому (37–39°), низких температур в то время уже не наблюдается. Все это позволяет ящерицам заняться восстановлением сил после сезона половой активности, а беременным самкам – выносить яйца.

Осенью температуры в слое песка на глубине 5–10 см постепенно понижаются, приближаясь постепенно к весенним значениям.

Значение температуры на глубине 20–30 см

Как мы уже упоминали выше, 20–30 см – это глубина, на которой в основном залегают норы ушастых круглоголовок. Весной в течение дня температуры там колебались примерно от 17 до 28°, а суточная амплитуда колебаний составляла около 7°. В середине лета на глубине 20 см температура была ~25–36° с суточной амплитудой 7–8°. К осени почва прогрелась на достаточно большую глубину, вследствие чего суточная амплитуда колебаний температуры даже в верхнем слое (~ до 30 см) уменьшалась. В результате с середины августа и в сентябре температура на глубине 20 см находилась в диапазоне примерно 27.5–30.0°, а суточная амплитуда колебаний была около 2.0–2.5°. На глубине 30 см эти значения были соответственно 27.5–28.5° с амплитудой около 1°. Такая температурная динамика поддерживала сезонные физиологические циклы, о чем мы упоминали в предыдущем разделе.

Значение температуры на глубине 50–80 см

Нор ушастых круглоголовок на глубинах 50 см и глубже мы не обнаружили. Температуры на этих и больших глубинах в биологии этих ящериц на бархане Сарыкум, видимо, существенного значения не имеют. Но ис-

следователем они могут быть использованы как косвенные показатели фенологического состояния природной среды и фазы сезонного цикла жизнедеятельности ящериц, что было показано выше.

Заключение

Для того чтобы ушастые круглоголовки, как и любые другие виды рептилий, могли успешно поддерживать подходящие им параметры жизнедеятельности и реализовывать необходимые сезонные физиологические циклы, должна существовать гармоничная и оперативная связь между эндогенными свойствами животных (параметрами гомеостаза) и характеристиками внешней среды. Характеристики внешней среды на-

прямую влияют на тепловой баланс тела, т. е. на температуру тела рептилий. Температурные условия внешней среды достаточно разнообразны, их конкретные значения, закономерные суточная и сезонная динамики во всей зоне, задействованной круглоголовками для своей активности (от температуры приземного слоя воздуха на высоте 2–3 см до температур на поверхности песка и на разных глубинах, которые по-разному используются ящерицами для своей жизнедеятельности), предоставляют рептилиям богатый выбор, позволяющий регулировать температуру тела и организовывать их необходимые суточную и сезонную динамики, регулировать и способствовать протеканию у них сезонных физиологических циклов.

Библиография

- Джамирзоев Г. С., Яровенко Ю. А., Букреев С. А. Результаты инвентаризации фауны наземных позвоночных животных участка «Сарыкумские барханы» ГПЗ «Дагестанский» // Труды Государственного природного заповедника «Дагестанский». 2011. № 4. С. 172–179.
- Мазанаева Л. Ф. Ушастая круглоголовка, *Phrynocephalus mystaceus* (Pallas, 1776) // Красная книга Республики Дагестан. Махачкала: Тип. ИП Джамалудинов М. А., 2020. С. 521–523.
- Окштейн И. Л., Черлин В. А. Необычная вечерняя активность ушастых круглоголовок (*Phrynocephalus mystaceus*) на бархане Сарыкум (Республика Дагестан, Российская Федерация) // Принципы экологии. 2021. Т. 11, № 4. С. 57–79.
- Окштейн И. Л., Черлин В. А., Вето Д. В., Кожара В. В., Корнеева А. А., Ложкина А. В., Мироненко-Маренков А. Д., Рябова Е. Д., Тищенко М. А., Турова М. А., Фраерман А. Ю., Яцук А. А. Сумеречная активность ушастых круглоголовок (*Phrynocephalus mystaceus*) на песчаном массиве Большой Сарыкум в Дагестане // Вопросы герпетологии: Программа и тезисы докладов VIII съезда Герпетологического общества имени А. М. Никольского при РАН «Современные герпетологические исследования Евразии» 3–9 октября 2021 г. М.: КМК Scientific Press, 2021. С. 199–201.
- Черлин В. А. К термобиологии серого геккона (*Cyrtopodion russowi*), полосатой ящурки (*Eremias scripta*) и степной агамы (*Trapelus sanguinolentus*) в Восточных Каракумах // Известия Академии наук Туркменской ССР. Серия биологических наук. 1988. № 5. С. 36–43.
- Черлин В. А. Термобиология рептилий. Общие сведения и методы исследований (руководство). СПб.: Русско-Балтийский информационный центр «БЛИЦ», 2010. 124 с.
- Черлин В. А. Сложности и возможные ошибки при полевых исследованиях по термобиологии рептилий // Современная герпетология: проблемы и пути их решения: Статьи по материалам докладов Первой международной молодежной конференции герпетологов России и сопредельных стран (Санкт-Петербург, Россия, 25–27 ноября 2013 г.) / Зоологический институт РАН. СПб., 2013а. С. 32–39.
- Черлин В. А. Сравнение термобиологии сцинкового (*Teratoscincus scincus scincus*) и гребнепалого (*Crossobamon evermanni*) гекконов // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. 2013б. Т. 18, вып. 6. С. 3110–3112.
- Черлин В. А. Сравнение термобиологии трех видов змей Средней Азии (*Echis multisquamatus*, *Spalerosophis diadema*, *Psammophis lineolatum*) // Праці Українського герпетологічного товариства. 2013в. № 4. С. 184–189.
- Черлин В. А. Рептилии: температура и экология. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. 442 с.
- Черлин В. А. Термобиологический механизм пространственно-временного разобщения активности средней, *Eremias intermedia*, и линейчатой, *E. lineolata*, ящурок (*Reptilia*, *Lacertidae*) в Кызылкумах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2019. № 1. С. 162–174.
- Черлин В. А. Термобиология и экология четырех видов агамовых ящериц в Средней Азии и на Северном Кавказе // Горные экосистемы и их компоненты: Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием, посвященной Году науки и технологий в Российской Федерации. 10–25 сентября 2021. Нальчик, 2021. С. 124–125.
- Черлин В. А. Приспособления разных экотермных животных к глобальным изменениям климата //

Принципы экологии. 2025. № 3. С. 4–39.

- Черлин В. А., Лабазанов И. М., Значение ветра в экологии ушастых круглоголовок (*Phrynocephalus mystaceus*) на бархане Сарыкум (Республика Дагестан, Российская Федерация) // Принципы экологии. 2025 (в печати).
- Черлин В. А., Музыченко И. В. Термобиология и экология сетчатой ящурки (*Eremias grammica*), ушастой (*Phrynocephalus mystaceus*) и песчаной (*Ph. interscapularis*) круглоголовок летом в Каракумах // Зоологический журнал. 1983а. Т. 62, № 6. С. 897–908.
- Черлин В. А., Музыченко И. В. Использование нор в терморегуляции рептилий // Прикладная этология: Материалы III Всесоюзной конференции по поведению животных. Т. 3. М.: Наука, 1983б. С. 172–174.
- Черлин В. А., Окштейн И. Л., Алигаджиев Э. Термобиологические характеристики ушастых круглоголовок (*Phrynocephalus mystaceus*) (Reptilia, Agamidae) на бархане Сарыкум (Дагестан, Россия), полученные с помощью логгеров температуры // Современная герпетология. 2023. Т. 23, вып. 3/4. С. 160–163.
- Черлин В. А., Целлариус А. Ю. Зависимость поведения песчаной эфы, *Echis multisquamatus* Cherlin, 1981 от температурных условий в Южной Туркмении // Фауна и экология амфибий и рептилий палеарктической Азии. Л.: Наука, 1981. С. 96–108. (Труды Зоологического института АН СССР, т. 101.)
- Хонякина З. П. Некоторые морфолого-меристические особенности ушастой круглоголовки Дагестана // Зоологический журнал. 1965. Т. XLIV, вып. 8. С. 1272–1274.
- Action des facteurs externes sur les cycles de reproduction. Les strategies de reproduction. 2 part // Bull. Soc. Zool. France. Vol. 106, No 4. P. 398–502.
- Angelini F., Botte V., D'Alterio E. Autumn photothermal regimes and reproductive functions in the female lizard *Podarcis s. sicula* Raf. // Monitore Zoologico Italiano, Firenze, (N.S.). 1982. Vol. 16. P. 133–148.
- Angelini F., Brizzi R., Barone C. The annual spermatogenetic cycle of *Podarcis sicula campestris* De Betta (*Reptilia, Lacertidae*). I. The spermatogenetic cycle in nature // Monitore Zoologico Italiano, Firenze, (N.S.). 1979. Vol. 13. P. 279–301.
- Callard J. P., Chan S. W. C., Potts M. The control of the reptilian gonads // Amer. Zool. 1972. Vol. 12, No 2. P. 273–287.
- Cowles R. B., Bogert C. M. Preliminary study of the thermal requirements of desert reptiles // Bulletin of the American Museum of Natural History. 1944. No 83. P. 261–296.
- Bradshaw S. D., Gans C., Saint-Girons H. Behavioral thermoregulation in a Pygopodid lizard, *Lialis burtonis* // Copeia. 1980. No 4. P. 738–743.
- Lang J. W. Thermophilic response of the American alligator and the American crocodile to feeding // Copeia. 1979. P. 48–59.
- Licht P. Photoperiodic and thermal influences on reproductive cycles in reptiles // Endocrinology. Amsterdam; New-York, 1973. P. 185–190.
- Matz G. La reproduction des reptiles et les facteurs de son induction // Acta zool. et pathol. Antwerp. No 78. Mainten. and reprod. reptile captive. 1984. Vol. 1. P. 33–68.
- Regal P. J. Thermophilic response following feeding in certain reptiles // Copeia. 1966. No 3. P. 588–590.
- Petrovskii D., Zavjalov E. Development and validation of an implantable sensor for measuring activity and body temperature for long-term studies in small wild and laboratory animals // Biological Rhythm Research. 2023. Vol. 54, No 9. P. 523–534.
- Saint-Girons H. Reproductive cycles of male snakes and their relationships with climate and female reproductive cycles // Herpetologica. 1982. Vol. 38, No 1. P. 5–16.
- Witten G. J., Heatwole H. Preferred temperature of the agamid lizard *Amphibolurus nobbinobbi* // Copeia. 1978. No 2. P. 362–364.

Благодарности

Выражаем свою искреннюю благодарность заведующей кафедрой зоологии и физиологии Дагестанского государственного университета Людмиле Фейзулаевне Мазанаевой за организационную, информационную помощь и научную поддержку нашей работы, а также заместителю директора по науке Государственного природного заповедника «Дагестанский» Гаджибеку Сефибековичу Джамирзоеву за организационную помощь, поддержку работы в условиях бархана Сарыкум на территории заповедника и за предоставление тепловизионной техники для осуществления исследований.

THE IMPORTANCE OF THE RATIO OF TEMPERATURE CONDITIONS ON THE SOIL SURFACE AND AT DIFFERENT DEPTHS FOR THE ECOLOGY OF THE TOAD-HEADED AGAMAS (*PHRYNOCEPHALUS MYSTACEUS*) ON THE SARYKUM DUNE (REPUBLIC OF DAGESTAN, RUSSIAN FEDERATION)

CHERLIN *DSc, Dagestan State Univeersity, 43-a M. Gadzhiyev str., Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000 Russia, cherlin51@mail.ru*
Vladimir Alexandrovich

OKSHTEIN *A.I. Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, 25 Bolshaya Cheremushkinskaya St., 117218, Moscow, Russia, okshtein@yandex.ru*
Igor Leonidovich

LABAZANOV *Dagestan State Univeersity, 43-a M. Gadzhiyev str., Makhachkala, Republic of Dagestan, 367000 Russia, ibralabz.0@bk.ru*
Ibragim Makhmudovich

Key words:

toad-headed agama
dynamics of
environmental factors
internal thermal needs
external thermal
conditions

Summary: The article describes the patterns of diurnal and seasonal dynamics of temperature dynamics on the surface and in the soil at different depths in the entire zone used by toad-headed agamas (*Phrynocephalus mystaceus*) in their vital activity on the Sarykum dune in Dagestan (from 2 cm above the surface of the sand to about 80 cm in its depth). In addition, the article shows that these different air and soil layers provide agamas with a wide range of thermal conditions that allow them to regulate body temperature and organize their necessary daily and seasonal dynamics, regulate and promote their optimal seasonal physiological cycles. Finally, the article shows how individual temperature parameters of the external environment are used by lizards in different ways for their vital activity. All the described patterns illustrate the coordinated functional unity of the parameters of homeostasis, endogenous needs for the implementation of seasonal physiological cycles and the dynamics of environmental factors.

Reviewer: A. A. Kidov

Received on: 24 November 2025

Published on: 27 March 2026

References

- Action des facteurs externes sur les cycles de reproduction. Les strategies de reproduction. 2 part, Bull. Soc. Zool. France. Vol. 106, No 4. P. 398–502.
- Angelini F., Botte V., D'Alterio E. Autumn photothermal regimes and reproductive functions in the female lizard *Podarcis s. sicula* Raf., *Monitore Zoologico Italiano*, Firenze, (N.S.). 1982. Vol. 16. P. 133–148.
- Angelini F., Brizzi R., Barone C. The annual spermatogenetic cycle of *Podarcis sicula campestris* De Betta (Reptilia, Lacertidae). I. The spermatogenetic cycle in nature, *Monitore Zoologico Italiano*, Firenze, (N.S.). 1979. Vol. 13. P. 279–301.
- Bradshaw S. D., Gans C., Saint-Girons H. Behavioral thermoregulation in a Pygopodid lizard, *Lialis burtonis*, *Copeia*. 1980. No 4. P. 738–743.
- Callard J. P., Chan S. W. C., Potts M. The control of the reptilian gonsad, *Amer. Zool.* 1972. Vol. 12, No 2. P. 273–287.
- Cherlin V. A. Cellarius A. Yu. The dependence of behaviour of the saw-scaled viper, *Echis multisquamatus* Cherlin, 1981 on temperature conditions in Southern Turkmenia, *Fauna i ekologiya amfibiy i reptilyi palearkticheskoy Azii*. L.: Nauka, 1981. P. 96–108. (Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR, t. 101.)

- Cherlin V. A. Labazanov I. M. The importance of wind in the ecology of toad-headed agamas (*Phrynocephalus mystaceus*) on the Sarykum dune (Republic of Dagestan, Russian Federation), Principy ekologii. 2025 (v pechati).
- Cherlin V. A. Muzychenko I. V. The use of burrows in the thermoregulation of reptiles, Prikladnaya etologiya: Materialy III Vsesoyuznoy konferencii po povedeniyu zhivotnyh. T. 3. M.: Nauka, 1983b. P. 172–174.
- Cherlin V. A. Muzychenko I. V. Thermal biology and ecology of *Eremias grammica*, *Phrynocephalus mystaceus* and *Ph. interscapularis* in Karakum in summer, Zoologicheskii zhurnal. 1983a. T. 62, No. 6. P. 897–908.
- Cherlin V. A. Okshteyn I. L. Aligadzhiev E. Thermobiological characters of toad-headed agamas (*Phrynocephalus mystaceus*) (Reptilia, Agamidae) on the Sarykum dune (Dagestan, Russia) obtained using temperature loggers, Sovremennaya gerpetologiya. 2023. T. 23, vyp. 3/4. P. 160–163.
- Cherlin V. A. Adaptations of different ectothermic animals to global climate changes, Principy ekologii. 2025. No. 3. P. 4–39.
- Cherlin V. A. Comparison of the thermal biology of plate-tailed gecko (*Teratoscincus scincus scincus*) and comb-toed gecko (*Crossobamon evermanni*), Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tehnicheckie nauki. 2013b. T. 18, vyp. 6. P. 3110–3112.
- Cherlin V. A. Comparison of the thermal biology of three species of snakes in Central Asian (*Echis multisquamatus*, *Spalerosophis diadema*, *Psammophis lineolatum*), Praci Ukraïns'kogo gerpetologichnogo tovaristva. 2013v. No. 4. P. 184–189.
- Cherlin V. A. Difficulties and possible mistakes in field researches on thermal biology of reptiles, Sovremennaya gerpetologiya: problemy i puti ih resheniya: Stat'i po materialam dokladov Pervoy mezhdunarodnoy molodezhnoy konferencii gerpetologov Rossii i sopredel'nyh stran (Sankt-Peterburg, Rossiya, 25–27 noyabrya 2013 g.), Zoologicheskii institut RAN. SPb., 2013a. P. 32–39.
- Cherlin V. A. On the thermobiology of the grey gecko (*Cyrtopodion russowi*), sand racerunner (*Eremias scripta*) and steppe agama (*Trapelus sanguinolentus*) in the Eastern Karakum, Izvestiya Akademii nauk Turkmenskoy SSR. Seriya biologicheskikh nauk. 1988. No. 5. P. 36–43.
- Cherlin V. A. Reptiles: temperature and ecology. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. 442 p.
- Cherlin V. A. The thermal biology of reptiles. General information and research methods (guidelines). SPb.: Russko-Baltiyskii informacionnyy centr «BLIC», 2010. 124 p.
- Cherlin V. A. Thermal biology and ecology of four species of Agamid lizards in Central Asia and the North Caucasus, Gornye ekosistemy i ih komponenty: Materialy VIII Vserossiyskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyaschennoy Godu nauki i tekhnologiy v Rossiyskoy Federacii. 10–25 sentyabrya 2021. Nal'chik, 2021. P. 124–125.
- Cherlin V. A. Thermobiological mechanism of spatiotemporal dissociation of activity of *Eremias intermedia* and *E. lineolata* (Reptilia, Lacertidae) in Kyzylkum desert, Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki. 2019. No. 1. P. 162–174.
- Cowles R. B., Bogert C. M. Preliminary study of the thermal requirements of desert reptiles, Bulletin of the American Museum of Natural History. 1944. No 83. P. 261–296.
- Dzhamirzoev G. S. Yarovenko Yu. A. Bukreev S. A. The results of the inventory of the fauna of terrestrial vertebrates of the Sarykumsky Barkhany site of the Dagestansky state nature reserve// Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Dagestanskiy». 2011. No. 4. P. 172–179.
- Honyakina Z. P. Some morphological and meristic features of the toad-headed agamas in Dagestan, Zoologicheskii zhurnal. 1965. T. XLIV, vyp. 8. P. 1272–1274.
- Lang J. W. Thermophilic response of the American alligator and the American crocodile to feeding, Copeia. 1979. P. 48–59.
- Licht P. Photoperiodic and thermal influences on reproductive cycles in reptiles, Endocrinology. Amsterdam; New-York, 1973. P. 185–190.
- Matz G. La reproduction des reptiles et les facteurs de son induction, Acta zool. et pathol. Antverp. No 78. Mainten. and reprod. reptile captive. 1984. Vol. 1. P. 33–68.
- Mazanaeva L. F. Toad-headed agama *Phrynocephalus mystaceus* (Pallas, 1776), Krasnaya kniga Respubliki Dagestan. Mahachkala: Tip. IP Dzhamaludinov M. A., 2020. P. 521–523.
- Okshteyn I. L. Cherlin V. A. Veto D. V. Kozhara V. V. Korneeva A. A. Lozhkina A. V. Marenkov A. D. Ryabova E. D. Tischenko M. A. Turova M. A. Fraerman A. Yu. Yacuk A. A. Twilight activity in toad-headed agamas (*Phrynocephalus mystaceus*) on the Bolshoy Sarykum sandy massif in Dagestan, Voprosy gerpetologii: Programma i tezis dokladov VIII s'ezda Gerpetologicheskogo obshchestva imeni A. M. Nikol'skogo pri RAN «Sovremennye gerpetologicheskije issledovaniya Evrazii» 3–9 oktyabrya 2021 g. M.: KMK Scientific Press, 2021. P. 199–201.
- Okshteyn I. L. Cherlin V. A. Unusual evening activity of toad-headed agamas (*Phrynocephalus mystaceus*) on the Sarykum dune (Republic of Dagestan, Russian Federation), Principy ekologii. 2021. T. 11, No. 4. P. 57–79.
- Petrovskii D., Zavjalov E. Development and validation of an implantable sensor for measuring activity and

- body temperature for long-term studies in small wild and laboratory animals, *Biological Rhythm Research*. 2023. Vol. 54, No 9. P. 523–534.
- Regal P. J. Thermophilic response following feeding in certain reptiles, *Copeia*. 1966. No 3. P. 588–590.
- Saint-Girons H. Reproductive cycles of male snakes and their relationships with climate and female reproductive cycles, *Herpetologica*. 1982. Vol. 38, No 1. P. 5–16.
- Witten G. J., Heatwole H. Preferred temperature of the agamid lizard *Amphibolurus nobbinobbi*, *Copeia*. 1978. No 2. P. 362–364.



УДК 57.087.1:519:528.854

ВВЕДЕНИЕ В ВЕРОЯТНОСТНЫЕ НЕЙРОН- НЫЕ СЕТИ ДЛЯ ЭКОЛОГОВ

КОРОСОВ
Андрей Викторович

доктор биологических наук, Петрозаводский государственный университет, 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, korosov@psu.karelia.ru

МАРФИЦЫНА
Наталья Александровна

Петрозаводский государственный университет, 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, marfitsyna.nata@mail.ru

Ключевые слова:
нейронные сети
евклидово
расстояние
гауссиана
плотность
распределения
половой
диморфизм
дешифрирование
снимков

Аннотация: На примерах из экологии рассмотрен алгоритм построения и расчетов вероятностной нейронной сети (PNN). Вначале отдельно рассмотрены компоненты и основные понятия (расстояние, ядро, нейрон), затем ключевые этапы всей технологии. Структура сети представлена более детализированно; помимо типичных четырех слоев (вход, радиальный, суммирования, выход), слой нейронов представлен в виде трех подслоев, что объясняет множество терминов, используемых для его обозначения в разных публикациях. Предметно на примерах рассмотрено понятие радиальной базисной функции активации. Обсуждается роль единственного модельного параметра, диаметра ядра. В качестве примера решены две экологические задачи – половая идентификация животных и дешифрирование разных местообитаний животных по космическому снимку. В дополнение к основному описанию представлено решение задачи с применением технологий ИИ. Рассмотрена технология оценки эффективности классификации и пути оптимизации этих решений. Продемонстрировано применение пакета rnp среды R для построения вероятностных нейронных сетей.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 27 декабря 2025 года

Подписана к печати: 27 марта 2026 года

Введение

Современные нейронные сети имеют три типичные черты: зависимость выхода от входа выражается серией формул, сложный характер этой зависимости обеспечивает нелинейная функция активации нейрона (например, логит), параметры сети настраиваются методом обратного распространения ошибки. *Вероятностные нейронные сети* (probabilistic neural networks, PNN) похожи на сетевые модели только наличием нелинейной функции активации; в них нет ни формул зависимости, ни алгоритма *backpropagation*. Конструкция PNN существенно отличается от перцептрона (perceptron learning network, PLN), подробно рассмотренного нами ранее (Коросов, 2023). Вместе с тем этот аппарат выполняет ту же функцию – классификацию многомерных объектов (Нейронная сеть...,

2025). Представленные в интернете и литературе описания этого метода, как обычно, весьма «недружественны» по отношению к биологам. Вероятно, по этой причине обсуждаемый метод нечасто ими используется. Применение PNN в экологии исчерпывается редкими, хотя и успешными, опытами, например, для идентификации возраста рыб (Robertson, Morison, 2003) или голосов птиц (Terry, McGregor, 2002), в том числе для прогнозирования пригодности речных местообитаний рыб (Munoz-Mas et al., 2018). Из близких к экологии областей PNN используется в биохимии (Назин, Готовцев, 2019), в медицине (Шеломенцева, 2022), а также в микробиологии для классификации условий роста бактерий (Basheer, Hajmeer, 2002). В экотоксикологии и мониторинге окружающей среды вероятностные нейронные сети

использовались в качестве биологических систем раннего предупреждения для обнаружения токсичных веществ в воде путем анализа видеозаписей поведения модельных организмов (Teles et al., 2015). Другой важной прикладной задачей являлся мониторинг воздуха, где PNN применялся для оперативного анализа и классификации экологического состояния атмосферы в городских условиях (Санжапов, 2025). Перечисленных фактов достаточно, чтобы сделать очередную попытку популяризации этого метода, ориентируясь на конкретные биолого-экологические задачи.

Цель работы состоит в объяснении существа моделирования посредством вероятностных сетей на примере классификации животных по полу и вычленения типов местообитаний животных на космических снимках.

Материалы

В расчетах использованы данные по морфологии обыкновенной гадюки, полученные во время экспедиционных работ (Коросов, 2010). Файл «[vipmor100.csv](#)» содержит промеры 100 разнополых особей гадюки. Для дешифрирования использованы спутниковые снимки Landsat среднего разрешения (30 м/пиксель) с сайта USGS (2023). В примере анализируется файл «[2013.tif](#)», содержащий фрагмент трехканального космического снимка окрестностей д. Гомсельга (Карелия) в июле 2013 г. с точками [poi.csv](#), принадлежащими определенным категориям биотопов.

Традиционные методы исследований

В технологии вероятностных нейронных сетей соединились идеи нескольких известных методов обработки данных, которые необходимо рассмотреть по отдельности.

Евклидово расстояние

В первую очередь вероятностные нейронные сети предназначены для классификации объектов. Эта задача состоит в том, чтобы некий объект, несущий серию показателей (x), отнести к тому или иному классу объектов, например к самцам или самкам. Аналогичные функции выполняет кластерный анализ, в котором степень близости двух объектов (или кластеров, a и b) определяется метрикой евклидова расстояния, оцененного по серии m количественных ха-

рактеристик объектов ($j = 1, 2... m$):

$D_{ab} = [\sum (x_{ja} - x_{jb})^2]^{0.5}$ (Джефферс, 1981). Еще больше сходства у PNN с процедурами кластеризации по k -средним, в рамках которой для каждого изучаемого объекта определяются расстояния D до k априорно заданных центров групп, после чего объект приписывается к той группе, к центру которой он находится ближе всего (Шитиков, Мاستицкий, 2017).

Для примера рассмотрим отличия между двумя самками гадюки с одинаковой длиной тела 50 см. Опытный экземпляр (a) с длинной хвоста $lc = 73$ мм и массой $w = 70$ г будет иметь такое отличие от случайно выбранной (b) самки ($lc = 60$ мм; $w = 85$):

$$\begin{aligned} D_{ab} &= [(lc_b - lc_a)^2 + (w_b - w_a)^2]^{1/2} = \\ &= [(60 - 73)^2 + (85 - 70)^2]^{1/2} = \\ &= [-17^2 + 15^2]^{1/2} = [289 + 225]^{1/2} = 22.7. \end{aligned}$$

Плотность вероятности

В PNN используется понятие ядра (подробнее см.: Коросов, 2024). В данном контексте ядро – это гауссово распределение (плотности вероятности p), построенное вокруг некоего значения x , как его центра, с априорно заданной дисперсией s^2 по формуле:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_j)^2}{2s^2}}$$

$$\text{или } p = (1/(2\pi)^{1/2}) * \exp(-(x - x_j)^2 / 2 * s^2),$$

где x – реальное значение,

x_j – сгенерированные условные значения вокруг x , как центра распределения,

s^2 – заданная условная дисперсия (диаметр ядра).

Эта формула используется для расчета величины p_j для любого отклонения x от центра распределения x . В алгоритмах PNN для определения степени различия между объектами a и b вместо расстояния D_{ab} используется именно величина плотности вероятности p_{Dab} . Например, используя ядро с параметрами $x = 60$, $s = 2$, для значения $x_j = 73$ мм плотность вероятности составит $p = (1/(2\pi)^{1/2}) * \exp(-(73 - 60)^2 / 2 * 2^2) = 3^{-10}$, а для значения 63 мм $p = 0.1$. Особь с длиной хвоста 63 мм находится ближе к центру ядра (60 мм) и поэтому более сходна с ним ($p_{60-63} = 0.1$), чем особь с длиной хвоста 73 мм ($p_{60-73} = 3^{-10}$) (рис. 1).

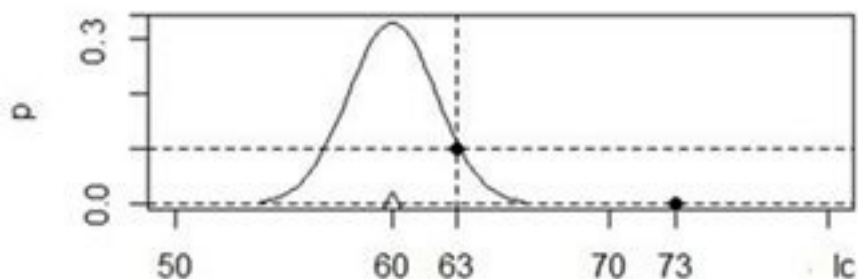


Рис. 1. Гауссиана с параметрами $\mu = 60$, $\sigma = 2$ и оценка плотности вероятности p для значений 63 и 73 мм
Fig. 1. Gaussian with parameters $\mu = 60$, $\sigma = 2$ and estimation of probability density p for values 63 and 73 mm

Нейронная сеть

Понятие искусственных нейронных сетей (подробнее см.: Коросов, 2023) используется для представления PNN в виде нескольких слоев нейронов и связей между ними. Как и в других сетях, в ней имеется входной, скрытые и выходной слои. На вход подаются значения переменных, слой скрытых нейронов перерабатывает информацию и через посредство нелинейных функций активации передает сигналы на выходной слой.

Оригинальные методы исследований

Алгоритм PNN сначала будет описан простыми словами, как серия вычислительных процедур, что необходимо для первичного понимания сущности метода. Далее с помощью специальных понятий дано его описание как нейронной сети для демонстрации путей развития технологии.

Итак, поставлена задача: требуется определить пол особи обыкновенной гадюки по

морфологическим признакам (длина хвоста $lc = 73$ мм, масса $w = 70$ г), используя выборку особей, для которых известен пол, s (для начала подобраны особи с одинаковой длиной тела $lt = 50$ см).

Бинарная классификация с обучением

Исходно в выборке исследователя есть некий набор характеристик особей разного пола – самок ($x_{\text{♀}i}$) и самцов ($x_{\text{♂}i}$). Используя евклидово расстояние для отдельного признака x , несложно рассчитать отличие тестовой особи (с признаком x) от каждой самки $(x - x_{\text{♀}i})^2$ и каждого самца $(x - x_{\text{♂}i})^2$. Если по данному признаку половой диморфизм явно выражен, то суммарное отличие неизвестной особи от самок и самцов будет разным (при равных объемах). Скорее всего, изучаемый объект будет принадлежать к той группе, общее расстояние до которой будет меньше (рис. 2, 3). Если признаков несколько (m), вычисляется обобщенное расстояние.

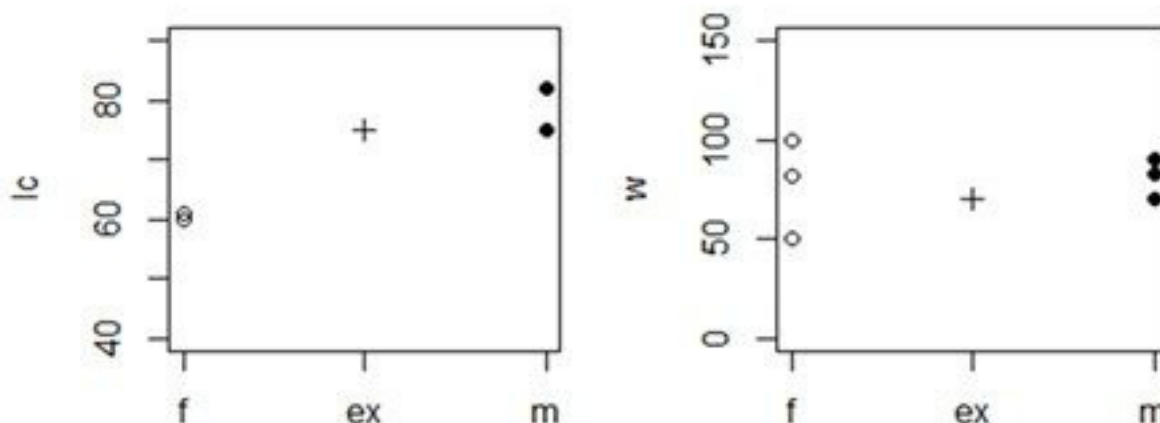


Рис. 2. Отличие опытного экземпляра гадюки (ex) с длиной хвоста ($lc = 73$ мм) и массой тела ($w = 70$ г) от трех случайных самок (f) и самцов (m) одинакового размера ($lt = 50$ см)

Fig. 2. The difference between an experimental viper (ex) with a tail length ($lc = 75$ mm) and body weight ($w = 70$ g) from three random females (f) and males (m) of the same size ($lt = 50$ sm)

```

s<-c('f','f','f','m','m','m')
x<-c(61, 60, 60, 75, 75, 82)
y<-c(82, 50,100, 90, 83, 70)
X<-73
Y<-70
sum(dis<-((X-
x[1:3])^2+(Y-y[1:3])^2)^.5)
sum(dis<-((X-
x[4:6])^2+(Y-y[4:6])^2)^.5)

```

Рис. 3. Определение евклидовых расстояний между образцами

Fig. 3. Determination of Euclidean distances between samples

В примере (см. рис. 2, 3) тестовую особь ($l_c = 73$ мм, $w = 70$ г) сравнивали с тремя самками ($l_c = 61, 60, 60$ мм, $w = 82, 50, 100$ г) и тремя самцами ($l_c = 75, 75, 82$ мм, $w = 90, 83, 70$ г). Расчеты (см. рис. 3) показали, что общее отличие тестовой особи от самок (73.5) больше, чем от самцов (42.3); значит, перед нами самец.

Представленный алгоритм, по сути, является «классификацией с обучением», поскольку выявляет принадлежность любого образца к одной из априорно заданных групп эталонных объектов. Главным приемом этих расчетов является *раздельное суммирование расстояний* от опытного образца до объектов из разных групп.

Учет плотности вероятности

Непосредственная оценка расстояний между объектами с использованием только значений признаков x оказывается неполноценной. Варианты любой выборки имеют разную частоту встречаемости, в разной степени соответствуют характерному типу данной группы объектов. Высокие частоты значений свидетельствуют об обычности этих значений, низкие – о том, что они не столь и характерны для данной выборки.

Учесть этот факт можно, если для оценки различия объектов брать не разность значений ($x - x_i$), а относительную частоту встречаемости этих отличий, или *плотностью вероятности* $p_{(x-x_i)}$. Чем больше плотность вероятности, тем испытуемый объект ближе к эталонному, и наоборот. Такая величина по смыслу аналогична «вероятности сходства объектов».

Для определения плотности вероятности обычно используют закон нормального распределения Гаусса. Для одного признака формула (гауссиана) имеет вид:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2s^2}}$$

В числителе экспоненты стоит оценка евклидова расстояния между характеристиками неизвестного объекта (x) и эталонного объекта (x_i).

В знаменателе указана дисперсия s^2 , которая называется «ширина окна» или «диаметр ядра»; она подбирается опытным путем. Согласно эмпирическому правилу Сильвермана, величину s можно рассчитать по формуле $s \approx 1.06 \cdot \sigma \cdot n^{-1/5}$, где σ – стандартное отклонение для исходного признака x , n – объем выборки (Bandwidth..., 2025; Kernel..., 2025). Например, для нормализованных данных (см. ниже) объемом $n = 100$ со стандартным отклонением $\sigma = 0.2$ получаем $s = 1.06 \cdot 0.2 \cdot 100^{-1/5} = 0.0969$. Для небольших выборок ширина окна примерно равна половине стандартного отклонения исходных признаков. В примере соотношение s / σ составляет $0.0969 / 0.2 = 0.48$; в поиске лучшего результата классификации можно повторить расчеты с разными значениями s .

Рассмотрим расчет *плотности вероятности сходства* (по длине хвоста) между опытным образцом ($x = 73$ мм), самкой ($x_1 = 60$ мм) и самцом ($x_4 = 75$ мм) (рис. 4). Реальные разности $(73 - 60)^2$ и $(73 - 75)^2$ подставляем в формулы ($s = 2$):

$$p_{x1} = (1/2\pi^{1/2}) \cdot \exp(-(73 - 60)^2/2s^2) = 0.318 \cdot \exp(-(73 - 60)^2/2 \cdot 2^2) = 0.318 \cdot 7e-10 = 2e-10,$$

$$p_{x4} = (1/2\pi^{1/2}) \cdot \exp(-(73 - 75)^2/2s^2) = 0.318 \cdot \exp(-(73 - 75)^2/2 \cdot 2^2) = 0.318 \cdot 0.606 = 0.19.$$

Плотность вероятности сходства с самкой оказалась низкой ($p_{x1} = 0.0000000002$), с самцом – существенно большей ($p_{x4} = 0.19$). Видимо, изучаемая особь – самец.

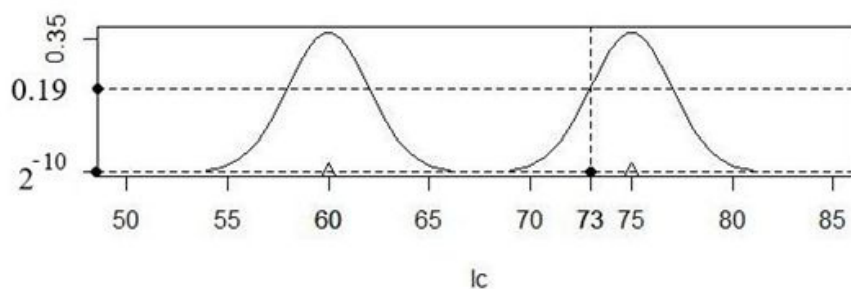


Рис. 4. Расположение исследуемого экземпляра ($lc_x = 73$ мм) относительно ядер ($s = 2$) для двух эталонных образцов $lc_x = 60$ (самка) и $lc_x = 75$ мм (самец)

Fig. 4. The location of the studied specimen ($lc_x = 73$ mm) relative to the kernels ($s = 2$) for two reference samples $lc_x = 60$ (female) and $lc_x = 75$ mm (male)

Повысить репрезентативность нашего вывода можно, если увеличить число эталонных объектов обоих типов и расширить спектр исследуемых характеристик.

Сначала ограничимся шестью особями и одним показателем, длиной хвоста lc (см. рис. 2). Тестовую особь (73 мм) сравнивали с тремя самками (61, 60, 60 мм) и тремя самцами (75, 75, 82 мм). Евклидово расстояние тестовой особи от первой самки оказалось равным $d = (73 - 61)^2 = 144$, от следующих самок – 169, 169, от самцов – 4, 4, 81. Дисперсия равна $s = sd(c(61,60,60,75,75,82))/2 = 4.3$. Значения вероятностной близости для опытной и эталонных особей составили:

для самок:

$$p_1 = (1/(2\pi)^{1/2}) * \exp(-(73 - 61)^2/(2s^2)) = 0.318 * \exp(-(144/(2 * 4.3^2))) = 0.006,$$

$$p_2 = (1/(2\pi)^{1/2}) * \exp(-(73 - 60)^2/(2s^2)) = 0.318 * \exp(-(169/(2 * 4.3^2))) = 0.003,$$

$$p_3 = 0.003,$$

для самцов:

$$p_4 = 0.285, p_5 = 0.285, p_6 = 0.036.$$

После расчета значений плотности вероятности следует их *раздельно просуммировать* для объектов из разных априорных групп, а для наглядности – нормировать относительно единицы.

Сумма вероятностей для эталонных самок (p_1-p_3) составила 0.013, для самцов (p_4-p_6) – 0.619. После приведения к единице получаем оценки вероятности изучаемой особи «быть самкой» $p_f = 0.013 / (0.013 + 0.619) = 0.02$, и «быть самцом» $p_m = 0.98$. Вывод очевиден.

Классификация по нескольким признакам

Одна из проблем исследования многомерных данных состоит в том, что разные показатели имеют разные единицы измерения

и размах изменчивости. Когда важны именно абсолютные различия между сравниваемыми объектами, то перед анализом все признаки следует привести к безразмерной форме (Царегородцев, 2003). Один из вариантов состоит в расчете нормированного отклонения $z_i = (x_i - M) / S$, т. е. центрирование каждого значения на среднюю и нормирование разности на стандартное отклонение. Изменчивость новой переменной укладывается в пределы от -3 до +3. При этом половина значений становится отрицательной, что неудобно для некоторых расчетов, но может быть нивелировано прибавлением положительного значения, например 5. Другой вариант предобработки состоит в перемещении границы изменчивости признака x в диапазон от 0 до 1 по формуле: $z_i = (x_i - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$. Это наиболее удобный формат чисел для нейросетевого моделирования (Шолле, 2018).

Следует отметить, что одни и те же реальные значения в разных выборках (с разными диапазонами варьирования) могут получить разные нормализованные значения. Уйти от этого эффекта можно, взяв в качестве максимальных и минимальных значений некие предельные величины, выше которых не могут быть никакие варианты любых выборок. Например, длина хвоста взрослых гадюк укладывается в диапазон от 50 до 90 мм.

Используя два показателя (длина хвоста, **xx** и масса, **yy**), выполнили сравнение тестовой особи ($lc = 73$ мм, $w = 70$ г) с тремя самками (f) и тремя самцами (m) (рис. 5). Исходные показатели объектов (**xx**, **yy**) преобразовали к диапазону 0–1 (**sx**, **sy**), затем нашли отличие тестовой особи 7 от эталонных особей 1:6 (**dx**, **dy**), рассчитали общую плотность распределения (**p**), их суммы раздельно по самкам и самцам (sum) и относительный вес (**pf**, **pm**, **pp**) (табл. 1).

```

se<-c('f','f','f','m','m','m')
indf<-1:3
indm<-4:6
ex<-7
x<-c(61, 60, 60, 75, 75, 82)
y<-c(82, 50, 100, 90, 83, 70)
X<-73
Y<-70
xx<-c(x,X)
yy<-c(y,Y)
(sx<-round((xx-min(xx))/(max(xx)-min(xx)),2))
(sy<-round((yy-min(yy))/(max(yy)-min(yy)),2))
(dx<-sx[7]-sx[1:6])
(dy<-sy[7]-sy[1:6])
(s<-sd(c(sx,sy)*.45))
(p<-exp(-(dx^2+dy^2)/(2*s^2)))
sum(p[indf])
sum(p[indm])
(pf<-sum(p[indf])/(sum(p[indf])+sum(p[indm])))
(pm<-sum(p[indm])/(sum(p[indf])+sum(p[indm])))

```

Рис. 5. **Скрипт** для идентификации особи неизвестного пола по серии образцов
 Fig. 5. Script for identification of an individual of unknown sex by a series of samples

Таблица 1. Расчеты вероятности «быть самкой» и «быть самцом» по двум переменным

ex	sex	xx	yy	sx	sy	dx	dy	p	sum	pp
1	f	61	82	0.05	0.64	0.54	-0.24	0.01		
2	f	60	50	0	0	0.59	0.4	0		
3	f	60	100	0	1	0.59	-0.6	0	0.0013	0.004
4	m	75	90	0.68	0.8	-0.09	-0.4	0.04		
5	m	75	83	0.68	0.66	-0.09	-0.26	0.235		
6	m	82	70	1	0.4	-0.41	0	0.04	0.3159	0.996
7	?	73	70	0.59	0.4	0	0			

Расчет плотности вероятности сходства p (для двух показателей и двух классов) выполняли по формуле (Каллан, 2001; Мэрфи, 2022):

$$p = \exp\left(\frac{-\sum(X_{ij} - x_i)^2}{2\sigma^2}\right)$$

где X_{ij} – значения показателей тестируемого образца, x_i – эталонные образцы, σ – стандартное отклонение, или в формате R (для каждого эталона):

$$p <- \exp(- (dx^2+dy^2)/(2*s^2)) .$$

Вообще говоря, в литературе приводится большое разнообразие формул для расчета гауссианы, которые отличаются от представленной в основном нормировочными коэффициентами перед экспонентой. Одна-

ко, как указывает D. F. Specht (1990), не было доказано, что какая-то из них является наилучшей, и мы в нашей модели использовали простейшую.

Расчеты в примере показали, что тестовая особь является самцом, поскольку «вероятность быть самцом» для нее составила 0.99. Обоснование эффективности подобных выводов рассмотрено ниже.

Решение задачи с помощью ИИ

В качестве дополнительной иллюстрации приведем решение задачи с помощью ИИ (Alice AI, 2025). Для Алисы AI был написан такой промпт: «Имеем семь особей разного пола, 3 самки (f), 3 самца (m) и одна особь неизвестного пола (?); у каждой особи выполнены промеры двух признаков xx и yy; нужно нормировать данные относительно

диапазона 0–1, с помощью вероятностной нейронной сети определить пол седьмой особи; выполнить решение по данным: (даны столбцы sx , xh , yu из табл. 1); показать вероятности принадлежности особи 7 к разным классам». Загрузив промпт и данные в чат с Алисой, получили следующее решение (рис. 6).

Шаг 1. Нормирование данных (MinMaxScaler, диапазон [0, 1])

Для признаков xh и yu найдём минимальное и максимальное значение, затем применим формулу нормирования:

$$x_norm = (x - x_min) / (x_max - x_min)$$

Для xh :

$$x_min = 60, x_max = 82$$

$$\text{Например, для } xh = 61: x_norm = (61 - 60) / (82 - 60) = 1 / 22 \approx 0.045$$

Для yu :

$$y_min = 50, y_max = 100$$

$$\text{Например, для } yu = 82: y_norm = (82 - 50) / (100 - 50) = 32 / 50 = 0.64$$

Нормированные данные: (воспроизводятся столбцы sx и sy из табл. 1)

(Для особи «?»: $xh_norm = (73-60)/(82-60) = 13/22 \approx 0.591$; $yu_norm =$

$$(70-50)/(100-50) = 20/50 = 0.4)$$

Шаг 2. Подготовка данных для PNN

Входные признаки (X): пары (xh_norm , yu_norm) для 6 особей с известным полом.

Целевые метки (y): $f \rightarrow 0$, $m \rightarrow 1$.

Тестовая точка (X_test): [0.591, 0.4] — особь «?».

Шаг 3. Работа вероятностной нейронной сети (PNN)

PNN использует гауссовы ядра для расчёта плотности вероятности принадлежности к классам. Формула веса для каждой обучающей точки:

$$w = \exp(-d^2/(2\sigma^2)), \text{ где:}$$

d — евклидово расстояние между тестовой и обучающей точкой в нормированном пространстве;

σ — параметр сглаживания (выберем $\sigma = 0.3$ для нормированных данных [0,1]).

Расчёт расстояний и весов для особи «?»:

До самок (f):

$$\text{до } [0.045, 0.64]: d = \sqrt{((0.591-0.045)^2 + (0.4-0.64)^2)} \approx 0.61 \rightarrow w \approx 0.15$$

$$\text{до } [0, 0]: d \approx 0.7 \rightarrow w \approx 0.1$$

$$\text{до } [0, 1]: d \approx 0.6 \rightarrow w \approx 0.13$$

$$\text{Сумма весов для «f»} = 0.38$$

До самцов (m):

$$\text{до } [0.682, 0.8]: d \approx 0.4 \rightarrow w \approx 0.45$$

$$\text{до } [0.682, 0.66]: d \approx 0.26 \rightarrow w \approx 0.65$$

$$\text{до } [1, 0.4]: d \approx 0.41 \rightarrow w \approx 0.43$$

$$\text{Сумма весов для «m»} = 1.53$$

Шаг 4. Нормализация в вероятности

$$\text{Общая сумма весов: } 0.38 + 1.53 = 1.91$$

$$P(f) = 0.38 / 1.91 \approx 0.20 \text{ (20\%)}$$

$$P(m) = 1.53 / 1.91 \approx 0.80 \text{ (80\%)}$$

Итог: вероятности для особи «?»

Принадлежность к классу «f» (самка): 20%

Принадлежность к классу «m» (самец): 80%

Вывод: с высокой вероятностью (80%) особь с признаками $xh = 73$, $yu = 70$ относится к классу «m» (самцы).

Рис. 6. Расчет вероятностной нейросети с помощью ИИ Алиса AI
Fig. 6. Calculation of a probabilistic neural network using Alice AI

Отличие результатов от наших расчетов состоит в том, что использовались разные оценки параметров сглаживания: у нас $s = 0.16$, у ИИ $s = 0.3$.

Итак, представленный нами скрипт *полноценно* реализует технологию *вероятностной нейронной сети* и выполняет правильную классификацию. Однако возникает вопрос: где же здесь собственно *нейронная сеть*?

Интерпретация алгоритма классификации в терминах нейронной сети

Выполненные расчеты обычно *представляют* как реализацию нейронной сети, состоящей из четырех слоев: входного, слоя скрытых нейронов, суммирующего и выходного (рис. 7) (Каллан, 2001; Hagan et al., 2002; Доленко, 2015).

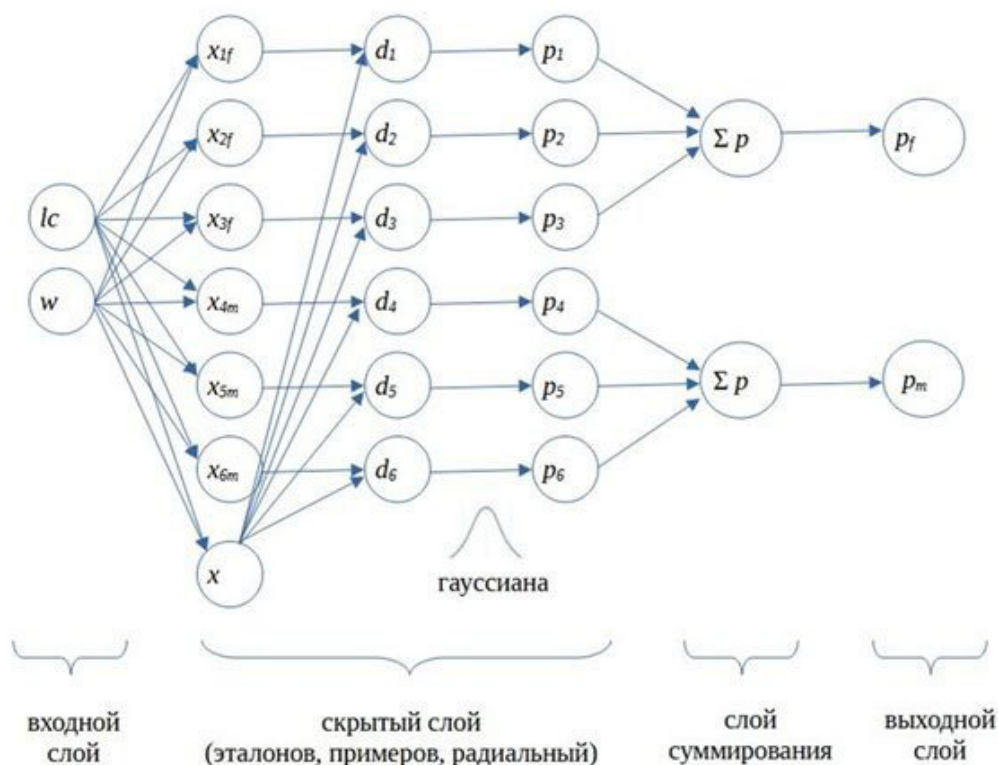


Рис. 7. Схема вероятностной нейронной сети (2 переменных, 2 класса, 6 эталонов)

Fig. 7. Diagram of a probabilistic neural network (2 variables, 2 classes, 6 standards)

Входной слой традиционно образуют значения изучаемых переменных, в примере их два – длина хвоста lc и масса тела w ; число элементов во входном слое равно числу изученных переменных, $N = 2$.

Второй, скрытый, слой имеет сложную структуру, из-за чего в литературе его обозначают множеством разных терминов. Это слой радиальный, радиальный базисный, слой примеров, обучающих примеров, образов, образцов, шаблонов, эталонов. Чтобы разобраться в названиях, вслед за некоторыми авторами (Hagan et al., 2002) этот слой следует представить состоящим из нескольких подслоев. Первый подслой состоит из эталонных объектов, относящихся к разным классам (в нашем случае есть два класса, $k = 2$, это гадюки с известным полом, всего три самки f и три самца m).

Этот слой также включает тестовый объект (особь с неизвестным полом). Таким образом, число элементов первого подслоя равно числу эталонов одного класса плюс число эталонов другого класса плюс один, $n_A + n_B + 1 = n + 1$. Второй подслой состоит из оценок расстояний (d_i) тестового объекта до каждого эталонного образца; число элементов этого подслоя равно числу эталонов (у нас – 6). Третий подслой образован значениями вероятности близости (p_i) тестового объекта с каждым эталоном, рассчитанными с помощью гауссианы (или «радиальной базисной функции», см. ниже); здесь тоже 6 элементов. Гауссиана, по сути, играет роль функции активации, она резко и нелинейно преобразует дистанции между объектами – в реакцию нейрона. Эта цепочка расчетов: «объекты – расчет дистанции – расчет веро-

ятности» – и представляет собой «пример» вероятностной оценки дистанции тестового объекта до образцов каждого из изучаемых классов, иначе говоря, это и есть нейрон. Каждый нейрон порождает одно значение. Число нейронов равно числу эталонных образцов, n .

Третий слой состоит из k элементов (равное числу классов), каждый из них суммирует сигналы, исходящие только от тех примеров, которые соответствуют одному из априорных классов. В примере каждый из двух элементов (два пола) третьего слоя суммирует сигналы от трех нейронов.

Четвертый слой формирует результат классификации, оценки вероятности принадлежности тестового объекта к каждому из изучаемых классов. Иногда третий и четвертый слои объединяют.

Радиальная базисная функция

В контексте нашей задачи речь идет о функции p , порождаемой искусственным нейроном в ответ на входные значения x : $p \sim x$. В нейронных сетях их основой, или базисом, является нелинейное реагирование (p) на сигналы (x), поступающие в модель. В некоторых сетях реализованы *линейные* (относительно x) способы: искусственный нейрон, получая на вход возрастающие значения переменных x до определенного критического значения $x_{кр}$, сохраняет нулевой выход. Однако по достижении $x_{кр}$ нейрон скачкообразно реагирует на входящие значения, выдавая максимум p (обычно 1) и сохраняет этот уровень при возрастающих значениях x . Таковы гиперболический тангенс, ReLU и сигмоида (или логит) $p \sim 1/(1 + \exp(-X))$ (Богданова, 2025). Другие сети используют не линейную, а *радиальную* базисную функцию: реакцию нейрона с двух сторон ограничивают как бы две сигмоиды, точнее – одна гауссиана: $p \sim \exp(-(X - x)^2 / 2s^2)$. Нейрон проявляет реакцию на ограниченном отрезке значений входного сигнала. Конкретная величина x играет роль центра распределе-

ния, и анализируется отклонение объекта X от центра. Как известно из свойств Гауссова нормального распределения, при удалении от центра x за границу влево $x - 2 * s$ или вправо $x + 2 * s$ функция p практически обнуляется. Таким образом анализируются отклонения X от x только в некоторой окрестности, величина $2 * s$ играет роль *радиуса*, который ограничивает область проявления активности нейрона. Помимо гауссианы используются и другие радиальные базисные функции, например полиномы и комбинации тригонометрических функций (Ростовцев, 2014).

Учет нескольких классов

От вероятностной нейронной сети следует ожидать отнесение неизвестного объекта к одной из нескольких категорий ($k \geq 2$) с использованием большого числа эталонных образцов ($n \sim 1000$), описанных большим числом признаков ($m > 1$). В предыдущих примерах два последних условия заложены в программе, тогда как первое условие требует изменения структуры сети. Изменение касается слоя суммирования, когда требуется явно указывать, сигналы от каких нейронов должны суммироваться отдельно в третьем слое. Данная проблема автоматически решается с использованием матрицы связности (Веселов, 2023), или, точнее, матрицы инцидентности \mathbf{w} (Звягин и др., 2005) размером $n * k$. Она содержит веса 0 и 1 для всех связей между n нейронами второго слоя и k элементами третьего слоя суммирования.

Так, в нашем примере (см. табл. 1) вектор выходов нейронов второго слоя ($\mathbf{p} = 0.0013, 0, 0, 0.040, 0.235, 0.040$) должны были суммироваться так: первые три выхода (1, 2, 3) – в один элемент, $\Sigma p_a = 0.0013 + 0 + 0 = 0.0013$; три следующих выхода (4, 5, 6) – в другой элемент, $\Sigma p_b = 0.040 + 0.235 + 0.040 = 0.3159$. Эти соотношения можно выразить матрицей инцидентности \mathbf{w} , учитывающей нужные связи между слоями (табл. 2):

Таблица 2. Матрица инцидентности \mathbf{w} для 6 нейронов

	1	2	3	4	5	6
a	1	1	1	0	0	0
b	0	0	0	1	1	1

В модели переход от второго слоя к третьему запишется как произведение матрицы

инцидентности \mathbf{w} на вектор вероятностей \mathbf{p} (рис. 8):

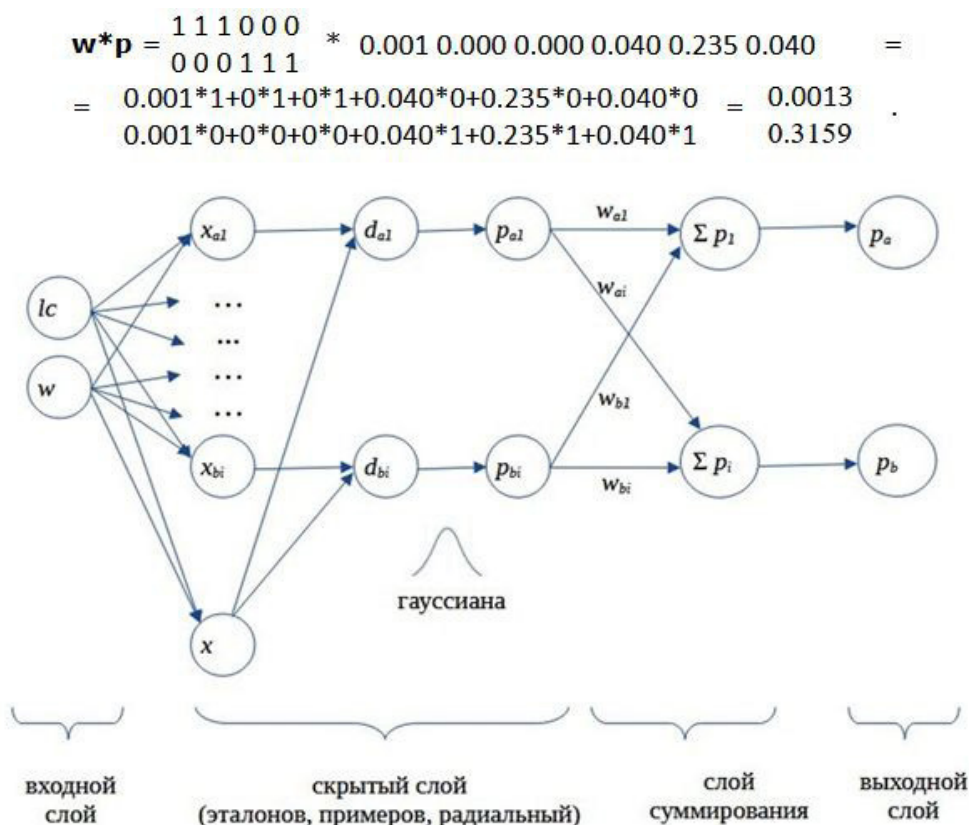


Рис. 8. Схема вероятностной нейронной сети с неограниченным числом классов, объектов, переменных, включающая матрицу инцидентности \mathbf{w}

Fig. 8. Diagram of a probabilistic neural network with an unlimited number of classes, objects, variables including the incidence matrix \mathbf{w}

Если число эталонов из разных классов различается, то результат следует разделить на эти объемы. В нашем случае $0.0013 / 3 = 0.0004$ и $0.3159 / 3 = 0.1053$. Для наглядности, переведя эти значения в вероятности (нормируя на единицу), получаем

соотношение 0.003 к 0.997, т. е. очевидно, что это самец.

Процедуру нормирования на число элементов лучше сразу применить к матрице инцидентности. В нашем случае она пример вид (табл. 3):

Таблица 3. Нормированная матрица инцидентности \mathbf{w} для 6 нейронов

a	0.33	0.33	0.33	0	0	0
b	0	0	0	0.33	0.33	0.33

Универсальный скрипт PNN

Учитывая и используя все описанные выше приемы, детально рассмотрим алгоритм универсальной модели вероятностной нейронной сети, предназначенной для идентификации неизвестных объектов относительно многих эталонных образцов ($n > 100$) из нескольких классов ($k \geq 2$), описанных несколькими признаками ($m > 1$) (рис. 8, 9). Мы не будем организовывать отдельные обучающий и проверочный массивы, поскольку рассмотренный ниже пакет PNN включает

функцию для ресамплинговой оценки эффективности модели.

В первом блоке нашей программы (рис. 9) выполняется чтение данных по морфологии гадюк из файла [vipmor100.csv](#) в массив **data**. Животные имеют разную длину хвоста (lc) и тела (lt) и в файле были расположены строго в случайном порядке. Пол идентифицируется буквой (f и m) и числом (1 и 2). Между полами имеется существенная трансгрессия как по длине тела, так и по длине хвоста (рис. 10).

```

rm(list = ls(all.names = TRUE))
#----- 1 -----
(data<-read.csv("vipmor100.csv"))
sx<-sample(1:nrow(data),50, replace=TRUE)
dat<-data[sx,c(2,3,4)]
m<-2
nm<-c(2:3)
n<-nrow(dat)-1
t<-dat$ns[1:n]
kl<-unique(sort(t))
k<-max(t)
#----- 2 -----
w<-array(0,dim=c(k,n))
for(i in 1:k) w[i,which(t==i)]<-1
w<-w/apply(w,1,sum)
xn<-x<-dat[,nm]
xma<-apply(x,2,max)
xmi<-apply(x,2,min)
xmami<-xma-xmi
for (i in 1:m) xn[i]<-(x[,i]-xmi[i])/xmami[i]
xx<-as.matrix(xn)
x<-xx[1:n,]
X<-xn<-xx[n+1,]
for (l in 1:(n-1)) X<-rbind(X,xn)
#----- 3 -----
(s<-sd(x)*0.45)
 #(s<-1.06*sd(x)*n^(-1/5))
p<-((exp(-apply((X-x)^2,1,sum) / (2*s^2) ))
#----- 4 -----
(wp<-round((w%*%p),2))
pro<-which(wp==max(wp))
c(kl[pro],data[n+1,2])

```

Рис. 9. [Скрипт](#) вероятностной нейронной сети для идентификации принадлежности одного объекта к одному из k классов относительно n эталонов по m признакам

Fig. 9. Probabilistic neural network script for identifying the belonging of one object to one of k classes relative to n standards based on m features

В рабочий массив включены 50 особей: 49 – эталоны (**n<-nrow(dat)-1**), 50-й играет роль объекта с неизвестным статусом. Задается, сколько используется переменных m и какие именно **nm<-c(2,3)**. Читаются идентификаторы класса (1 – самка, 2 – самец) эталонных объектов **t<-data\$ns[1:n]**, задается вектор для индексов классов **kl<-unique(sort(t))** и определяется количество классов **k<-max(t)**.

Во втором блоке выполняется подготовка данных для моделирования. Сначала формируется матрица инцидентности w размерностью $k*n$ **dim=c(k,n)**, составленная из нулей. Потом в ее разные ряды заносятся

единицы, которые указывают на положение элементов, относящихся к разным классам: **for(i in 1:k) w[i,which(t==i)]<-1**. Единицы указывают, выходы каких нейронов будут суммироваться отдельно. Затем все значения массива w делятся на число единиц в каждом ряду (**w/apply(w,1,sum)**), тем самым вводится поправка на число обучающих эталонов, входящих в разные классы.

Далее значения характеристик всех объектов (включая тестовый) приводятся к диапазону от 0 до 1 по рассмотренным выше формулам. Очень важно нормализованным значениям придать матричный тип данных

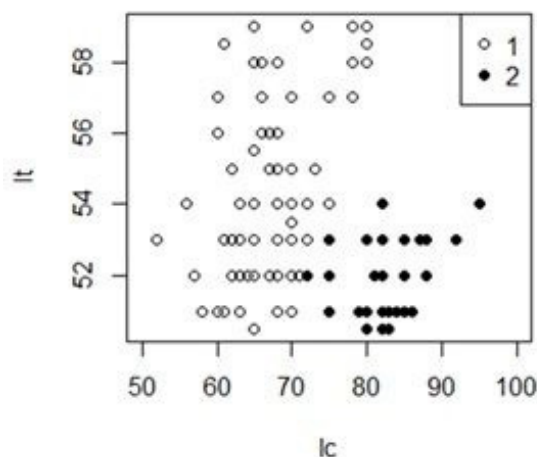


Рис. 10. Соотношение длины тела (lt) и хвоста (lc) у самок (1) и самцов (2) гадюки
 Fig. 10. The ratio of body length (lt) and tail length (lc) in females (1) and males (2) vipers

xx<-as.matrix(xn). Рассчитанные нормализованные значения эталонов записываются в массив **x**, значения тестируемого объекта – в массив **X**. Этот массив содержит дубли характеристик тестируемого объекта и имеет такой же размер, что и массив **x**, чтобы последующее определение разности **X-x** прошло без искажений.

В третьем блоке скрипта рассчитываются выходы n нейронов. Для этого отыскивается эмпирическая величина дисперсии **s**. Далее для каждого нейрона рассчитывается разность **X-x** между характеристиками неизвестного образца и каждым эталоном, затем – функция активации (гауссиана):

p<-(exp(-apply((X-x)^2,1,sum)/(2*s^2))).

В четвертом блоке выполняется раздельное суммирование выходов нейронов **wp<-w*%p**, соответствующих разным классам с учетом поправки на количество эталонов из разных классов (n_{\square} и n_{\square}). При желании можно рассчитать вероятности принадлежности объекта **X** к каждому из классов, проведя нормирование **wp** на единицу. Далее выбирается максимальное значение вероятности **pro<-which(wp==max(wp))** и выводится результат моделирования в виде номера класса **kl**, к которому был отнесен тестируемый объект; для сравнения выводится реальный номер класса. Самке соответствует класс 1, самцу – 2.

Можно видеть, что первые два блока только подготавливают массив данных, а собственно модель PNN записана в третьем и четвертом блоках.

Моделирование с помощью пакета PNN

Построить и использовать вероятностную

нейронную сеть можно с помощью пакета PNN среды R по алгоритму D. F. Specht (1990) (<https://cran.r-project.org/web/packages/pnn/index.html>). Этот пакет считается устаревшим и в современной репозитории CRAN отсутствует. Однако его можно загрузить из других источников Интернета, например <https://github.com/chasset/pnn/releases> (Package pnn, 2013).

Для установки пакета скачиваем архив **pnn-1.0.1.tar.gz** в локальную папку. Запускаем R, выполняем команду Главного меню «Пакеты / Установить пакет(ы) из локальных файлов», находим и кликаем на архив **pnn-1.0.1.tar.gz**, Открыть.

Рассмотрим скрип, выполняющий настройку и проверку сети с помощью пакета PNN (рис. 11). Воспользуемся данными из предыдущего **скрипта** (см. рис. 9): **t** – числовые индексы пола, **x** – нормализованные значения двух промеров 49 разнополых гадюк. В векторе **dat[n+1,]** представлены данные тестируемой особи. Принят ранее рассчитанный параметр сглаживания **s** (из-за исходной рандомизации величина **s** может отличаться от приведенной на рис. 11).

Построение сети (**nn**) выполняет функция **learn**. Оптимизацию сети (**new**) с использованием дисперсии **s** как параметра сглаживания – функция **smooth**. Прогноз класса для неизвестного объекта выполняет функция **guess**. Эффективность модели оценивает функция **perf**; она извлекает из исходной совокупности серию уменьшенных выборок данных, выполняет по ним прогноз и рассчитывает общую долю правильных прогнозов (**E**).

```
library(pnn)
mm<-data.frame(t,x)
nn<-learn(mm)
(ss<-s)
[1] 0.1377399
new (rez<-guess(new, X))$category
[1] "1"
$probabilities
      1      2
0.97421636 0.02578364
data[n+1,]
  ns s lc lt
25 1 f 72 59
perf(new)$success_rate
[1] 0.9583333
```

Рис. 11. [Скрипт](#) для настройки и проверки сети с помощью пакета PNN
Fig. 11. A script for configuring and verifying the network using the PNN package

Оценка эффективности классификации

Эффективность модели оценивает функция **perf**. Как сказано в руководстве по PNN: «Этот метод... пытаюсь угадать текущее наблюдение с помощью уменьшенного обучающего набора (без текущего наблюдения)» (<https://rdrr.io/cran/pnn/man/perf.html>). Это описание соответствует алгоритму ресамплинга методом «складного ножа» (Шитиков, Розенберг, 2013), который несложно запрограммировать самостоятельно. Выполненные нами 30 перерасчетов по [скрипту](#) на рис. 9 (для случайных выборок объемом 50 экз.) показали варьирование показателей точности в диапазоне от 0.96 до 1.0, т. е. примерно такое же, как дает функция **perf**.

Дешифрирование космических снимков

В качестве второго примера использования вероятностной нейронной сети в экологии рассмотрим задачу дешифрирования спутниковой информации. Изучаемый район имеет площадь около 10 кв. км. На территории постоянно ведутся рубки, формируя сложную мозаику разнообразных биотопов. Поставлена задача выявить остатки спелых хвойных и смешанных лесов. В среде QGIS космический снимок для 2013 г. был обрезан по границам района работ ("[2013.tif](#)"). Полевые работы и анализ снимков высокого разрешения позволил на отдельном слое [poi.csv](#) отметить 299 точек для трех элементов ландшафта: 1 – озера, 2 – безлесые пространства, вырубки и вторичные леса, 3 – спелые хвойные и смешанные леса (рис. 12).

Далее расчеты выполнялись в среде R с помощью библиотеки **terra** для работы с ГИС-данными. [Скрипт](#) расчетов имеет шесть

блоков (рис. 13). В первом блоке читаем снимок (**rast**) и приводим (**stretch**) каждый из трех каналов растровых данных к диапазону от 0 до 1. Загружаем в массив **da** нормализованные яркости для всего снимка.

Во втором блоке загружаем координаты точек и читаем (**extract**) яркости одиночных пикселей под ними. Далее формируем рабочий массив (**mm**, тип – **matrix**) с идентификаторами точек (**t**) и значениями яркости пикселей под ними (**x**).

В третьем блоке строим вероятностную нейронную сеть (**nn**), назначаем параметр сглаживания **s** по эмпирической формуле, оптимизируем сеть (**new**), оцениваем эффективность ($E = 0.92$).

Четвертый блок предназначен для расчета принадлежности каждого пикселя снимка к одному из трех назначенных классов местообитаний. Ориентируясь на значение яркостей пикселей исходного снимка **da**, формируется массив расчетных классов **newda**. Используя эти значения, создается одноканальный грид (**gon1**), который сглаживается медианным фильтром (**focal**) и тем самым формируется результирующее геоизображение (**gon2**) (рис. 14: А).

Процедура создания геоизображения представляет собой ресурсоемкую задачу, требующую много времени. В рамках данного подхода для классификации каждого нового пикселя осуществляется расчет его близости (с использованием гауссовой функции активации) ко всем эталонным объектам из обучающей выборки. В случае снимка, содержащего несколько сотен тысяч пикселей, общее время вычислений достаточно велико.

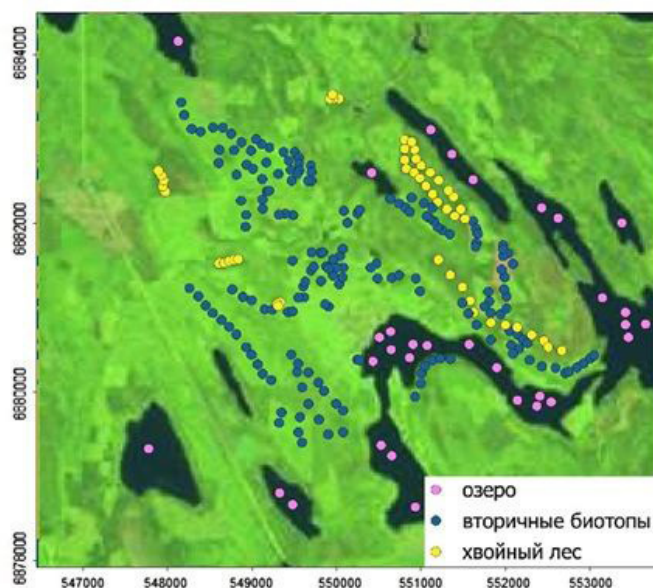


Рис. 12. Точки эталонных участков в районе работ на фоне снимка 2013 г. (30 м/пиксель)
Fig. 12. Points of reference sites in the work area against the background of a 2013 image (30 m/pixel)

```
library(terra)
r<-rast( "2013.tif")
rs<-stretch(r, minv=0, maxv=1)
head(da<-values(rs))
(n<-nrow(da))
#----- 2 -----
poi<-read.csv('poi.csv')
head(bri<-extract(rs,poi[,1:2]))
b1<-unlist(bri[,2])
b2<-unlist(bri[,3])
b3<-unlist(bri[,4])
x<-cbind(b1,b2,b3)
(t<-(poi[,3]))
(mm<-(data.frame(t,x)))
#----- 3 -----
library(pnn)
nn<-learn(mm)
(s<-1.06*sd(x)*n^(-1/5))
new<-smooth(nn, sigma=s)
perf(new)$success_rate
#----- 4 -----
newda<-rep(0,n)
for(i in 1:n) newda[i]<-as.integer(guess(new,
da[i,])$category)
gon1<-rs[[1]]
values(gon1)<-newda
gon2
plot(gon2)
```

Рис. 13. [Скрипт](#) расчета PNN для дешифрирования спелых лесов
Fig. 13. PNN calculation script for decryption of ripe forests

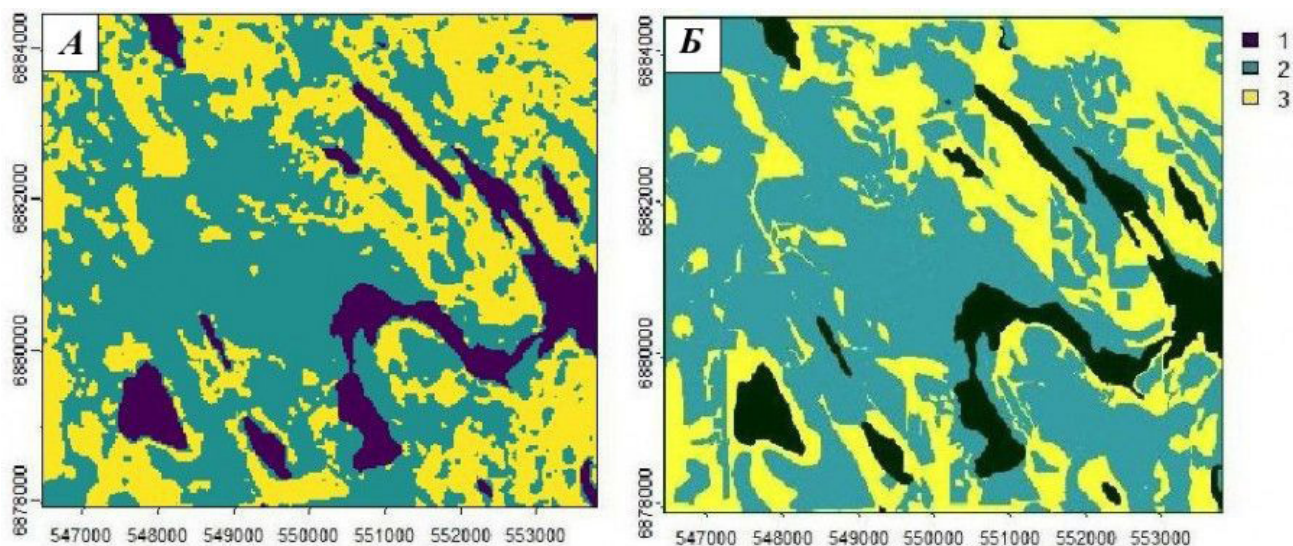


Рис. 14. Грид результатов дешифрирования трех элементов ландшафта в районе работ (1 – озеро, 2 – вторичные, луга, болота, 3 – спелые леса) для 2013 г. (А) и картограмма вырубок за последние 70 лет до 2023 г. (Б)

Fig. 14. A grid of the results of interpretation of three landscape elements in the work area (1 – lake, 2 – secondary, meadows, swamps, 3 – mature forests) for 2013 (A) and a cartogram of clearings over the past 70 years up to 2023 (B)

С целью верификации результатов моделирования сопоставили полученный грид с имеющимся векторным слоем ГИС, который построен и обновляется нами (Гусева и др., 2014; Коросов и др., 2022) для отображения всех открытых пространств (болота, луга) и новых вырубок, проведенных в районе работ в послевоенное время вплоть до 2023 г. Бросаются в глаза лишь небольшие отличия на севере и востоке района работ – там за последние годы появились новые вырубки. В остальном грид довольно точно отразил ситуацию.

Обсуждение

В список положительных качеств PNN обычно включают слабую зависимость от выбросов в обучающих данных, отсутствие необходимости настройки в помощью алгоритма обратного распространения ошибки, отсутствие проблемы переобучения и пр. В негативный список входят потребности в большой памяти и невысокая скорость обучения, а также сложности с выбором «диаметра ядра», значения s . По сути, это единственный параметр вероятностной нейронной сети (Боровиков, 2008), который при решении задач сглаживания определяет, насколько узким или широким будет основное распределение (диаметр ядра) функции активации (Silverman, 1986). Рассмотрим эту проблему на примере.

Вероятностная нейронная сеть использует нормальное распределение (гауссиану)

как радиальную базисную функцию (RBF) для активации нейрона. При этом отличия $(X-x)$ между неизвестным объектом X и эталонами x преобразуются в величину плотности вероятности $p_{(X-x)}$ таким образом, что за границами от $x-2s$ до $x+2s$ все значения $p_{(X-x)}$ превращаются в ноль. И только в пределах $x\pm 2s$ величина $p_{(X-x)}$ пропорциональна расстояниям $(X-x)$. Величина s , определяющая радиус «захвата» сходных объектов, будет определенным образом влиять на результаты классификации.

На практике это означает следующее. Если величина s будет маленькой, то очень мало объектов неизвестного статуса X сможет попасть в окрестности $x\pm 2s$ данного эталонного объекта. Например, даже небольшое отклонение от центра на 0.035 не попадет в окрестности распределения с низкой дисперсией (радиусом) $\pm 2s = \pm 2 \cdot 0.01 = \pm 0.02$ (рис. 15: 1, 4). Значит, объектов X , сходных с эталоном x , будет очень мало. На карте (рис. 16: 1) хорошо видно, что маленькая дисперсия ($s = 0.01$) позволяет выделить те пиксели, которые плотно окружают эталонные точки, это «самые» спелые леса, имеющие небольшую площадь.

Если величину дисперсии взять большой (рис. 15: 3, 6), то очень много объектов X будут оценены как близкие к эталону x , и кластер сходных объектов будет обширным. Эта ситуация отображена на рис. 16: 3, когда для расчета гауссианы была взята величина

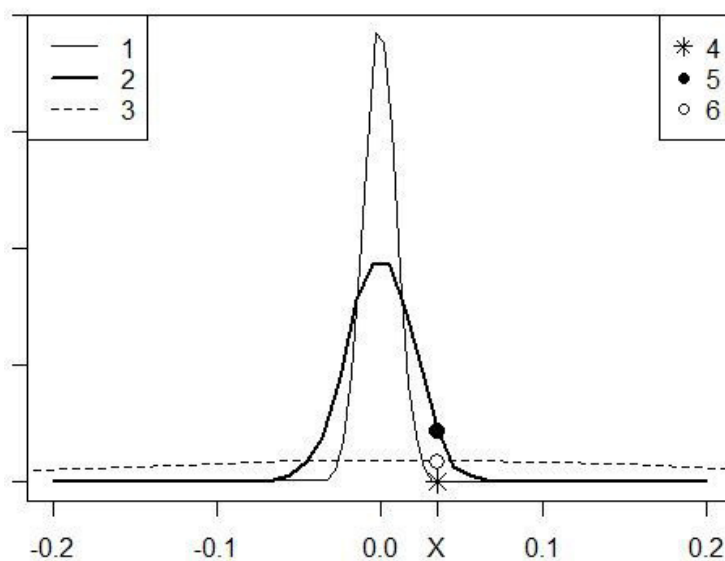


Рис. 15. Гауссианы (нормальные распределения), построенные для эталонов x с разными дисперсиями: $s = 0.01$ (1), $s = 0.02$ (2), $s = 0.2$ (3); оценки значений p по гауссианам с дисперсиями $s = 0.01$ (3), $s = 0.02$ (4), $s = 0.2$ (5)

Fig. 15. Gaussians (normal distributions) constructed for standards x with different variances: $s = 0.01$ (1), $s = 0.02$ (2), $s = 0.2$ (3); estimates of p values from Gaussians with variances $s = 0.01$ (3), $s = 0.02$ (4), $s = 0.2$ (5)

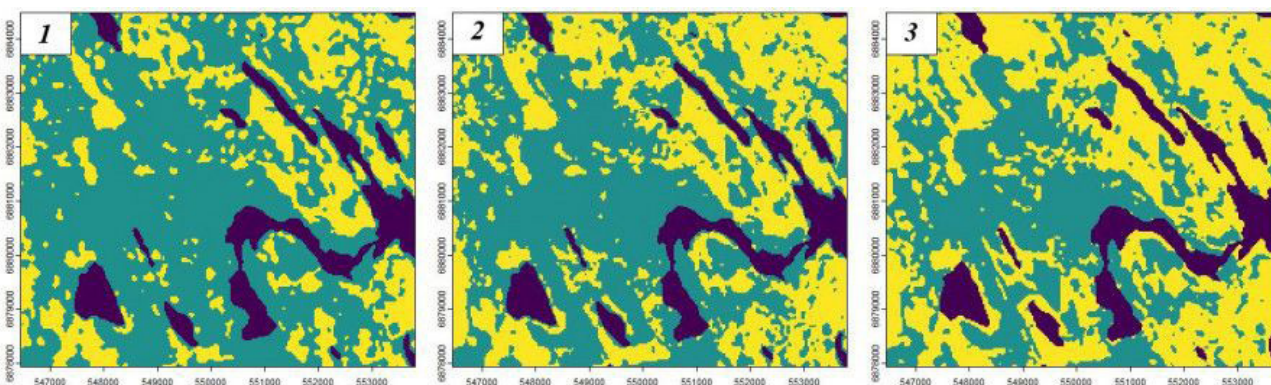


Рис. 16. Варианты дешифрирования космических снимков с разными параметрами RBF: $s = 0.01$, $E = 0.92$ (1); $s = 0.02$, $E = 0.92$ (2); $s = 0.2$, $E = 0.88$ (3); обозначения как на рис. 14

Fig. 16. Options for interpreting space images with different RBF parameters: $s = 0.01$, $E = 0.92$ (1); $s = 0.02$, $E = 0.92$ (2); $s = 0.2$, $E = 0.88$ (3); notation as in Fig. 14

$s = 0.2$. В этом случае в состав «спелых лесов» попали и средневозрастные вырубки.

Промежуточные значения дисперсии (оцененные по рекомендованной формуле) дают промежуточный вариант классификации, которая в данном случае неплохо согласуется с действительностью ($E = 0.92$) и подтверждается данными, полученными независимым способом. Однако в общем случае простое «усреднение» далеко не лучший метод анализа природных ситуаций (Коросов, 2012).

Возникает вопрос: на какой же величине дисперсии стоит остановиться? Какую дисперсию следует считать лучшей для нашего примера?

В литературе предлагается довольно обширный список приемов *подбора* лучшей величины s методом проб и ошибок. В их числе эмпирические (ориентированные на различие групп, т. е. на величину дисперсии признаков, что нами и было использовано), перекрестной проверки, адаптивного сглаживания, оптимизации (выполняющие множественные расчеты с разными значениями параметра s). Критерием для выбора лучшей величины s случит эффективности прогноза E .

В примере эффективности прогноза для дисперсии $s = 0.02$ достаточно велика (0.92), что позволяет принять этот результат тематического дешифрирования. Другое дело,

что в группы «спелые леса» и «прочие биотопы» включено слишком много разнородных типов леса. Иными словами, научное содержание выполненной классификации пока несущественно, здесь нам важно было показать общий принцип этого рода анализа данных.

Для уточнения лесной классификации необходимо привлечь новые характеристики объектов исследования. Это могут быть, например, зимние космические снимки, на которых хвойные леса смотрятся контрастно. Добавить можно и полевые описания, которые вполне можно анализировать совместно с яркостными характеристиками (Коросов, Марфицына, 2025). В любом случае для осмысленной интерпретации полученной картограммы необходимы веские основания, соответствующие уровню устойчивого прогноза не ниже $E = 0.9-0.95$.

Библиография

- Богданова А. Функции активации – что это такое и почему без них нейросеть не работает // DTF. 2025. URL: <https://dtf.ru/id2687299/4076435-funktsii-aktivatsii-v-nevrosnetyakh> (дата обращения: 24.11.2025).
- Боровиков В. П. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных. М.: Горячая линия - Телеком, 2008. 392 с. URL: <https://z-library.la/book/2425255/574e37/Нейронные-сети-statistica-neural-networks-Методология-и-технологии-современного-анализа-данных.html?dsourсe=recommend> (дата обращения: 24.11.2025).
- Веселов О. В. Нечеткая логика и нейронные сети в системах управления и диагностике. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2023. 288 с. URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/10985> (дата обращения: 11.10.2025).
- Гусева Т. Л., Коросов А. В., Беспятова Л. А., Анканова В. С. Многолетняя динамика биотопического размещения обыкновенной буроzubки (*Sorex araneus*, Linnaeus 1758) в мозаичных ландшафтах Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 8 (145). Т. 2. С. 13–20. URL: <https://sciup.org/uchzap-petsru/2014-8-145-2> (дата обращения: 24.11.2025).
- Джефферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии. М.: Мир, 1981. 256 с. URL: https://vk.com/wall-184903207_6650?ysclid=mj7pa6901y103281711 (дата обращения: 15.10.2025).
- Доленко С. А. Нейронные сети на основе РБФ. Вероятностные сети и сети с общей регрессией. Сети и самоорганизующиеся карты Кохонена // Машинное обучение. Искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы. Teach-in. 2015. URL: <https://teach-in.ru/lecture/2023-03-10-Dolenko> (дата обращения: 15.10.2025).
- Звягин М. Ю., Беспалов М. С., Александров А. В. Прикладные алгоритмы на графах. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. 44 с. URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/462> (дата обращения: 15.10.2025).
- Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. 288 с. URL: https://vk.com/wall-6509366_1080 (дата обращения: 15.10.2025).
- Коросов А. В. Экология обыкновенной гадюки (*Vipera berus* L.) на Севере (факты и модели). Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 264 с.
- Коросов А. В. О противоречии между статистическими параметрами динамики популяций // Принципы экологии. 2012. № 2. С. 53–58. DOI: 10.15393/j1.art.2012.1141
- Коросов А. В. Нейронные сети для экологии: введение // Принципы экологии. 2023. № 3. С. 76–96. DOI: 10.15393/j1.art.2023.14002
- Коросов А. В. Смысл и применимость ядерных методов в экологических исследованиях // Принципы экологии. 2024. № 4. С. 59–90. DOI: 10.15393/j1.art.2024.15662
- Коросов А. В., Бугмырин С. В., Бурдова Т. Л., Киреева М. Л., Лапина С. А. Информационная система для изучения позвоночных: опыт создания и использования // Труды КарНЦ РАН. No 8. Сер. Экологические исследования. 2022. С. 123–133. DOI: 10.17076/eco1614

Заключение или выводы

Технология расчета вероятностной нейронной сети довольно проста, поскольку основана на серии относительно простых алгоритмов (кластерный анализ, ядерное сглаживание, персептрон).

Ключевой особенностью является зависимость результатов классификации только от одного параметра функции активации, диаметра ядра.

Пакет rnp среды R позволяет очень быстро рассчитывать вероятностные нейронные сети с оценкой их эффективности.

В экологии алгоритмы PNN могут быть полезны для задач классификации (например, животных по полу, возрасту, виду и пр.) и для дешифрирования их местообитаний с использованием спутниковой и полевой информации.

- Коросов А. В., Марфицына Н. А. Дешифрирование местообитаний животных с помощью методов глубокого обучения библиотеки KERAS. ИнтерКарто. ИнтерГИС . М.: Географический факультет МГУ, 2025. Т. 31, ч. 2. С. 54–65. DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-54-65
- Мэрфи К. П. Вероятностное машинное обучение: введение . М.: ДМК Пресс, 2022. 940 с. URL: https://vk.com/wall-1172233_62640 (дата обращения: 24.11.2025).
- Назин П. С., Готовцев П. М. Использование вероятностных нейронных сетей для предсказания локализации белков в клеточных компартментах // Математическая биология и биоинформатика. 2019. Т. 14, № 1. С. 220–232. DOI: 10.17537/2019.14.220
- Нейронная сеть: раскрытие возможностей искусственного интеллекта // Easiio. 2025. URL: <https://ru.easiio.com/probabilistic-neural-network/> (дата обращения: 24.11.2025).
- Ростовцев В. С. Искусственные нейронные сети . Киров: Изд-во ВятГУ, 2014. 208 с. URL: http://iweb.vyatsu.ru/document/material/41/_Учебник%20ИНС_2014_Э4743.pdf (дата обращения: 24.11.2025).
- Санжапов Б. Х. Применение вероятностной нейронной сети для экспресс-анализа экологического состояния атмосферы городской придорожной территории // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: Научнотехнический журнал. 2025. № 1 (51). С. 127–131. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-51-1-127-131
- Царегородцев В. Г. Оптимизация предобработки данных: константа Липшица обучающей выборки и свойства обученных нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2003. №7. С. 3–8. URL: http://neuropro.ru/mypapers/neurcompmag03_1.pdf (дата обращения: 24.11.2025).
- Шеломенцева И. Г. Классификация микроскопических изображений мокроты с использованием вероятностных байесовских нейронных сетей // Экономика. Информатика. 2022. Т. 49, № 3. С. 575–581. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-3-575-581
- Шитиков В. К., Мاستицкий С. Э. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R . Тольятти; Лондон, 2017. 351 с. URL: <https://github.com/ranalytics/data-mining> (дата обращения: 24.11.2025).
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R . Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с. URL: <https://en.pdfdrive.to/book/r-78> (дата обращения: 24.11.2025).
- Шолле Ф. Глубокое обучение на R . СПб.: Питер, 2018. 400 с.
- Alice AI. Алиса AI для решения реальных задач . 2025. URL: https://alice.yandex.ru/?utm_campaign=ntp_new_chat_btn&utm_source=desktop_browser (дата обращения: 20.12.2025).
- Bandwidth Selectors for Kernel Density Estimation // R Documentation. 2025. URL: <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/bandwidth.html> (дата обращения: 24.11.2025).
- Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M.: Neural Network Design. Beijing: PWS Publishing Company, 2002. 1012 p. URL: <https://github.com/thanhsmind/machine-learning-books/blob/master/Neural%20Network%20Design%202nd%20edition%202014.pdf> (дата обращения: 24.11.2025).
- Hajmeer M., Basheer I. A probabilistic neural network approach for modeling and classification of bacterial growth/no-growth data // Journal of Microbiological Methods. 2002. Vol. 51, Issue 2. P. 217–226. DOI: 10.1016/S0167-7012(02)00080-5
- Kernel density estimation // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_density_estimation#Bandwidth_selection (дата обращения: 24.11.2025).
- Munoz-Mas R., Fukuda S., Portoles J., Martinez-Capel F. Revisiting probabilistic neural networks: a comparative study with support vector machines and the microhabitat suitability for the Eastern Iberian chub (*Squalius valentinus*) // Ecological Informatics. 2018. Vol. 43. P. 24–37. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.10.008
- Package pnn. Probabilistic neural networks // R Documentation. 2013. P. 1–9. URL: <https://r2013-lyon.sciencesconf.org/file/pnn.pdf> (дата обращения: 05.10.2025).
- Robertson S. G., Morison A. K. Age Estimation of Fish Using a Probabilistic Neural Network // Ecological Informatics. Understanding Ecology by Biologically-Inspired Computation. Springer, 2003. P. 369–382. DOI: 10.1007/978-3-662-05150-4_19 (дата обращения: 24.11.2025).
- Silverman B. W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis // Biometrical Journal. 1986. Vol. 30, Issue 7. 22 p. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_density_estimation#cite_note-SI1998-22 (дата обращения: 24.11.2025).
- Specht D. F. Probabilistic Neural Networks // Neural Networks. 1990. Vol. 3. P. 109–118. DOI: 10.1016/0893-6080(90)90049-Q. URL: https://wiki.eecs.yorku.ca/course_archive/2010-11/W/4403/_media/specht1990pnn.pdf (дата обращения: 24.11.2025).
- Terry A. M. R., McGregor P. K. Census and monitoring based on individually identifiable vocalizations: the role of neural networks // Animal Conservation. 2002. Vol. 5. P. 103–111. DOI: 10.1017/S1367943002002147
- Teles L. O., Fernandes M., Amorim J., Vasconcelos V. Video-tracking of zebrafish (*Danio rerio*) as a biological

early warning system using two distinct artificial neural networks: Probabilistic neural network (PNN) and self-organizing map (SOM) // Aquatic Toxicology. 2015. Vol. 165. P. 241–248. DOI: 10.1016/j.aquatox.2015.06.008
USGS science for a changing world // EarthExplorer. 2023. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.11.2025).

INTRODUCTION TO PROBABILISTIC NEURAL NETWORKS FOR ECOLOGISTS

KOROSOV
Andrey Victorovich

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

MARFITSYNA
Natalya Alexandrovna

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

Key words:

neural networks
euclidean distance
gaussian
distribution density
sexual dimorphism
image interpretation

Summary: The article examines the algorithm for constructing and calculating a probabilistic neural network (PNN) using examples from ecology. First, the components and key concepts (distance, kernel, neuron) are considered separately, followed by the key stages of the entire technology. The network structure is presented in more detail: in addition to the typical four layers (input, radial, summation, output), the neuron layer is represented by three sub-layers. This explains the variety of terms used to denote it in various publications. The concept of a radial basic activation function is examined in detail using examples. The role of a single model parameter, the kernel diameter, is discussed. As an example, two ecological problems are solved: the sexual identification of animals and the decoding of different animal habitats from a satellite image. In addition to the main description, a solution to the problem using AI technologies is presented. A technology for assessing the effectiveness of classification and ways to optimize these solutions are considered. The application of the PNN package in the R environment for constructing probabilistic neural networks is demonstrated.

Received on: 27 December 2025

Published on: 27 March 2026

References

- AI. Alice AI for solving real problems. 2025. URL: https://alice.yandex.ru/?utm_campaign=ntp_new_chat_btn&utm_source=desktop_browser (data obrascheniya: 20.12.2025).
- Bandwidth Selectors for Kernel Density Estimation, R Documentation. 2025. URL: <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/bandwidth.html> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Bogdanova A. Activation functions – what are they and why the neural network doesn't work without them, DTF. 2025. URL: <https://dtf.ru/id2687299/4076435-funktsii-aktivatsii-v-nevrosnetyakh> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Borovikov V. P. Neural networks. STATISTICA Neural Networks: Methodology and technologies of modern data analysis. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2008. 392 p. URL: <https://z-library.la/book/2425255/574e37/Neyronnye-seti-statistica-neural-networks-Metodologiya-i-tehnologii-sovremennogo-analiza-dannyh.html?dsourc=recommend> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Caregorodcev V. G. Optimization of data preprocessing: Lipschitz constant of training samples and properties of trained neural networks, Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye. 2003. No.7. P. 3–8. URL: http://neuropro.ru/mypapers/neurcompmag03_1.pdf (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Dolenko S. A. BF. Neural networks based on RBF. Probabilistic networks and networks with general regression. Kohonen networks and self-organizing maps, Mashinnoe obuchenie. Iskusstvennye neyronnye seti i geneticheskie algoritmy. Teach-in. 2015. URL: <https://teach-in.ru/lecture/2023-03-10-Dolenko> (data obrascheniya: 15.10.2025).
- Guseva T. L. Korosov A. V. Bespyatova L. A. Anikanova V. S. Long-term dynamics of the biotopic distribution of the common shrew (*Sorex araneus*, Linnaeus 1758) in mosaic landscapes of Karelia, Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. No. 8 (145). T. 2. P. 13–20. URL: <https://sciup.org/uchzap-petrsu/2014-8-145-2> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M.: Neural Network Design. Beijing: PWS Publishing Company, 2002. 1012 p. URL: <https://github.com/thanhsmind/machine-learning-books/blob/master/Neural%20Network%20Design%202nd%20edition%202014.pdf> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Hajmeer M., Basheer I. A probabilistic neural network approach for modeling and classification of bacterial growth/no-growth data, Journal of Microbiological Methods. 2002. Vol. 51, Issue 2. P. 217–226. DOI: 10.1016/S0167-7012(02)00080-5
- Introduction to system analysis: application in ecology. M.: Mir, 1981. 256 p. URL: <https://vk.com/wall->

- 184903207_6650?ysclid=mj7pa6901y103281711 (data obrascheniya: 15.10.2025).
- Kallan R. Basic concepts of neural networks. M.: Izd. dom «Vil'yams», 2001. 288 p. URL: https://vk.com/wall-6509366_1080 (data obrascheniya: 15.10.2025).
- Kernel density estimation, Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_density_estimation#Bandwidth_selection (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Korosov A. V. Bugmyrin S. V. Burdova T. L. Kireeva M. L. Lapina S. A. An information system for studying vertebrates: the experience of creation and use, Trudy KarNC RAN. No 8. Ser. Ekologicheskie issledovaniya. 2022. C. 123–133. DOI: 10.17076/eco1614
- Korosov A. V. Marficyna N. A. Decryption of animal habitats using deep learning methods of the KERAS library. The InterCarto. InterGIS. M.: Geograficheskiy fakul'tet MGU, 2025. T. 31, ch. 2. P. 54–65. DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-54-65
- Korosov A. V. Ecology of the common viper (*Vipera berus* L.) in the North (facts and models). Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2010. 264 p.
- Korosov A. V. Neural networks for ecology: an introduction, Principy ekologii. 2023. No. 3. P. 76–96. DOI: 10.15393/j1.art.2023.14002
- Korosov A. V. On the contradiction between statistical parameters of population dynamics, Principy ekologii. 2012. No. 2. P. 53–58. DOI: 10.15393/j1.art.2012.1141
- Korosov A. V. The meaning and applicability of nuclear methods in environmental research, Principy ekologii. 2024. No. 4. P. 59–90. DOI: 10.15393/j1.art.2024.15662
- Merfi K. P. Probabilistic machine learning: an introduction. M.: DMK Press, 2022. 940 p. URL: https://vk.com/wall-1172233_62640 (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Munoz-Mas R., Fukuda S., Portoles J., Martinez-Capel F. Revisiting probabilistic neural networks: a comparative study with support vector machines and the microhabitat suitability for the Eastern Iberian chub (*Squalius valentinus*), Ecological Informatics. 2018. Vol. 43. P. 24–37. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.10.008
- Nazin P. S. Gotovcev P. M. Using probabilistic neural networks to predict protein localization in cellular compartments, Matematicheskaya biologiya i bioinformatika. 2019. T. 14, No. 1. P. 220–232. DOI: 10.17537/2019.14.220
- Neural network: unlocking the possibilities of artificial intelligence, Easiio. 2025. URL: <https://ru.easiio.com/probabilistic-neural-network/> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Package pnn. Probabilistic neural networks, R Documentation. 2013. P. 1–9. URL: <https://r2013-lyon.sciencesconf.org/file/pnn.pdf> (data obrascheniya: 05.10.2025).
- Robertson S. G., Morison A. K. Age Estimation of Fish Using a Probabilistic Neural Network, Ecological Informatics. Understanding Ecology by Biologically-Inspired Computation. Springer, 2003. P. 369–382. DOI: 10.1007/978-3-662-05150-4_19 (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Rostovcev V. S. Artificial neural networks. Kirov: Izd-vo VyatGU, 2014. 208 p. URL: http://iweb.vyatsu.ru/document/material/41/_Uchebnik%20INS_2014_E4743.pdf (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Sanzhapov B. H. Application of a probabilistic neural network for express analysis of the ecological state of the atmosphere of an urban roadside area, Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya: Nauchnotekhnicheskii zhurnal. 2025. No. 1 (51). P. 127–131. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-51-1-127-131
- Shelomenceva I. G. Classification of microscopic sputum images using probabilistic Bayesian neural networks, Ekonomika. Informatika. 2022. T. 49, No. 3. P. 575–581. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-3-575-581
- Shitikov V. K. Mastickiy S. E. Classification, regression, and other Data Mining algorithms using R. Tol'yatti; London, 2017. 351 p. URL: <https://github.com/ranalytics/data-mining> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R. Tol'yatti: Cassandra, 2013. 314 p. URL: <https://en.pdfdrive.to/book/r-78> (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Sholle F. Deep learning on R. SPb.: Piter, 2018. 400 p.
- Silverman B. W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis, Biometrical Journal. 1986. Vol. 30, Issue 7. 22 p. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Kernel_density_estimation#cite_note-SI1998-22 (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Specht D. F. Probabilistic Neural Networks, Neural Networks. 1990. Vol. 3. P. 109–118. DOI: 10.1016/0893-6080(90)90049-Q. URL: https://wiki.eecs.yorku.ca/course_archive/2010-11/W/4403/_media/specht1990pnn.pdf (data obrascheniya: 24.11.2025).
- Teles L. O., Fernandes M., Amorim J., Vasconcelos V. Video-tracking of zebrafish (*Danio rerio*) as a biological early warning system using two distinct artificial neural networks: Probabilistic neural network (PNN) and self-organizing map (SOM), Aquatic Toxicology. 2015. Vol. 165. P. 241–248. DOI: 10.1016/j.aquatox.2015.06.008
- Terry A. M. R., McGregor P. K. Census and monitoring based on individually identifiable vocalizations:

- the role of neural networks, *Animal Conservation*. 2002. Vol. 5. P. 103–111. DOI: 10.1017/S1367943002002147
- USGS science for a changing world, *EarthExplorer*. 2023. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (data obrascheniya: 20.11.2025).
- Veselov O. V. Fuzzy logic and neural networks in control and diagnostic systems. Vladimir: Izd-vo Vladim. gop. un-ta, 2023. 288 p. URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/10985> (data obrascheniya: 11.10.2025).
- Zvyagin M. Yu. Bespalov M. S. Aleksandrov A. V. Applied algorithms on graphs. Vladimir: Izd-vo Vladim. gop. un-ta, 2005. 44 p. URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/462> (data obrascheniya: 15.10.2025).



УДК 929

Э. В. ИВАНТЕР В КИВАЧЕ: НАЧАЛО ПУТИ

КУТЕНКОВ
Анатолий Петрович

кандидат биологических наук, ФГБУ Заповедник Кивач, 186200,
Кондопожский р-н, п. Водопад Кивач, stapesy@mail.ru

Ключевые слова:
Э. В. Ивантер
заповедник «Кивач»

Аннотация: Описан важный период жизни и работы известного зоолога и эколога Эрнеста Викторовича Ивантера (1935–2025) в заповеднике «Кивач». В списке библиографии представлены файлы статей первого сборника Трудов заповедника «Кивач», в котором Э. В. Ивантер с соавторами выполнил полный обзор фауны наземных позвоночных. Кивач – знаменитый водопад на реке Суна в Карелии; Кивач – это также название поселка и местности близ водопада («был в Киваче», «поехать в Кивач»); «Кивач» – это Государственный природный заповедник площадью 10.9 тыс. га. Водопад Кивач и поселок Кивач находятся на территории заповедника.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 31 января 2025 года

Подписана к печати: 27 марта 2026 года

Об Эрнесте Викторовиче Ивантере как о выдающемся деятеле науки, о многочисленных трудах этого ученого-энциклопедиста немало написано и при жизни, и сейчас. Я же хочу обратиться к первым годам его самостоятельной деятельности, которые прошли в заповеднике «Кивач» в Карелии.

Сначала был легендарный КЮБЗ – научно-исследовательский Кружок юных биологов Московского зоопарка, воспитавший плеяду будущих маститых ученых многих областей биологической науки. Уровень преподавания и качество полевой практики там немногим уступали профессиональной вузовской подготовке. По воспоминаниям Сергея Павловича Расницына (д. б. н., профессия – медицинская зоология), Э. Ивантер, прилежный кюбзовец, был в составе довольно многочисленных экспедиций кружковцев в Воронежский (в возрасте 15 лет) и Приокско-Тerrasный (в 17 лет) заповедники, а летом 1957 г. семнадцать человек работали в «Киваче», и среди них – Эрик Ивантер. Сам Эрнест Викторович тоже не раз рассказывал, как встречал тогда в Киваче кюбзовцев: москвичи приехали к нему, когда он проходил здесь преддипломную практику. И эту дату – 1957 г. – следует считать стартовой в его долгой и блистательной биографии ученого.

В следующем, 1958 г. после окончания Московской сельскохозяйственной акаде-

мии им. Тимирязева он приступил к работе в заповеднике официально. Он поселился в доме на краю поселка Кивач (рис. 1). Позже туда вселилась и Татьяна Всеволодовна, ставшая его супругой.

Деятельность государственного заповедника «Кивач», организованного в 1931 г., помимо функций охраны территории, долгое время имела сугубо практическую направленность: от работ по лесовосстановлению и естественному возобновлению леса до стационарных исследований декоративных и плодово-ягодных деревьев и кустарников в питомниках. К рассматриваемому времени существовал лишь рукописный отчет по фауне наземных позвоночных «Кивача» (Гибет, Никифоров, 1952) с результатами четырех кратких экспедиций в заповедник за три года.

Старший лаборант Э. В. Ивантер, 22-летний молодой ученый (специальность – «зоотехния»), стал первым штатным зоологом заповедника. Судя по первым же публикациям, основанным на здешнем материале, он в совершенстве (и это КЮБЗ!) владел методикой полевых исследований экологии позвоночных животных. В течение первых двух лет он организовал полномасштабные исследования по трем направлениям.

Во-первых, это исследования экологии тетеревиных и водоплавающих птиц, включая



Рис. 1. Э. В. Ивантер (ок. 1960 г.; автор фото неизвестен) и его бывший дом в Киваче (1975 г., фото: Н. Бургиллов)

Fig. 1. E. V. Ivanter (circa 1960; photographer unknown) and his former house in Kivach (1975; photo: Nikolai Burgilov)

сбор данных по их численности в заповеднике. Во-вторых, сбор и обработка информации по экологии всех видов охотничье-промысловых млекопитающих (ондатра, заяц-беляк, хищные, копытные), включая проведение зимнего маршрутного учета. Эти работы требовали обследования всей территории заповедника (в то время около 10.3 тыс. га), неоднократного прохождения маршрутов во все сезоны года. Экологию отдельных видов фауны «Кивача» (тетерев, рябчик, кряква, барсук и др.) Э. В. Ивантер изучает детально, чтобы вскоре опубликовать объемные статьи. В-третьих, он организовал стационары по учету численности мелких млекопитающих. К 1960 г. у них, с присоединившейся вскоре Татьяной Всеволодовой, были оборудованы девять ловчих канавок и многочисленные линии ловушек. Стационары расположили на большой площади (примерно 3 на 6 км) с тем, чтобы охватить как можно большее количество биотопов в весьма пестром растительном покрове заповедной территории.

Открытые и настроенные орудия лова необходимо было обходить и проверять ежедневно, собирая улов. Учеты продолжались до шести месяцев в году. Каждого отловленного зверька следовало определить, установить его возраст, сделать многочисленные промеры и взвешивания, оценить состояние генеративной системы и участие в размножении, линьку, зафиксировать

желудки для последующего анализа их содержимого... Засиживались порой до ночи. Через их руки прошли тысячи экземпляров мелких грызунов и насекомоядных.

Одним из результатов той плодотворной деятельности был опубликованный «Фаунистический обзор наземных позвоночных заповедника «Кивач»» (Зимин, Ивантер, 1969) – первый итог инвентаризации млекопитающих, птиц, пресмыкающихся и земноводных «Кивача», включающий краткие эколого-биологические очерки. Внушительное место в обзоре было занято краткими сведениями о мелких млекопитающих – плод пятилетних трудов Э. В. и Т. В. Ивантеров.

Если можно так выразиться, «интенсивность выявления» Ивантерами видов *Micromammalia* «Кивача», их «поисковое везение» поражают. Мы продолжили учеты мелких млекопитающих в заповеднике с осени 1974 г. Из 15 подтвержденных для территории «Кивача» видов мелких насекомоядных и грызунов, указанных Ивантером в упомянутом выше обзоре, почти половину мы затем зафиксировали только на третий (равнозубая бурозубка, впервые описанная для Карелии именно Ивантерами), восьмой (лесная мышовка и лесной лемминг), девятый (полевка-экономка) годы и т. д. Первую красную полевку мы поймали только спустя 35 лет, а красно-серая так и не попала. Уточнение биотопических предпочтений коснулось лишь двух второстепенных по

обилию видов бурозубок. Мы, правда, обнаружили многочисленное и разнообразное население *Micromammalia* в болотных лесах, занимающих изрядную часть территории заповедника (так называемые кóрбы), о которых Э. В. Ивантер почти не упоминает (Кутенков, 2006). Впрочем, эти кóрбы, унылые, захламленные валежником леса с топким торфяным грунтом, Эрнест Викторович откровенно недолюбливал и «мышей» там ловить не собирался.

Попутно (это обстоятельство – слово самого Э. В. Ивантера – необходимо подчеркнуть) был собран и позднее опубликован материал по объектам, к исследованию которых он с тех пор не возвращался. В статье «О рыбах заповедника «Кивач»» (Ивантер, 1969) указаны водоемы, населенные конкретными видами, размещение рыб по биотопам, а для массовых видов – сведения по питанию и даже зараженности эндопаразитами. В аннотированном списке Ивантера – ручьевая минога и 21 вид рыб. Происходившие с тех пор изменения в ихтиофауне «Кивача» фиксируются в основном в пересекающей его территорию реке Суне. С той поры исчезли хариус, ряпушка и корюшка. Внезапно появились и вновь пропали голец усатый и голавль. В население реки добавились карась, пескарь, густера, судак и подкаменщик, последние три вида стали обычными (Щербаков, 1988; Попова, Сухов, 2013). Добавления связаны не с тем, что Эрнест Викторович в свое время чего-то недоглядел, но с реакцией ихтиофауны на пертурбации, которым подвергали зарегулированную Суну многолетний лесосплав и его прекращение, ударные попуски воды и – годами – ее недостаток. Еще он в течение двух сезонов исследует травяную лягушку и позже публикует подробную статью по ее экологии: распределение по биотопам, суточная активность, фенология, плодовитость, размножение и развитие, питание, возрастной состав популяции (см. републикацию статьи в этом выпуске ПЭ). Такие вот «попутные» наблюдения!

Уже в 1960 г. он официально переходит в академическую, а затем и в университетскую среду. Однако «поле» в Киваче у него оставалось еще, видимо, года два. Объем исследований, проведенных им за это время, часто в одиночку, впечатляет. Как он не раз вспоминал впоследствии, с такой интенсивностью работать «в поле» ему больше не доводилось никогда. «Основная часть использованных материалов собрана в 1957–

1962 гг. в заповеднике «Кивач»» – подобные фразы еще несколько лет будут встречаться во введении к научным статьям Э. В. и Т. В. Ивантеров. И именно в «Киваче» была заложена основа будущих фундаментальных трудов Эрнеста Викторовича по популяционной экологии *Micromammalia*.

С первыми годами его жизни в «Киваче» совпало время строительства Музея природы заповедника (1958–1959 гг.). Он принимал участие в оформлении экспозиции (например, центральный экспонат диорамы – громадный лось – это чучело утонувшего зверя, найденного с его участием), проводил в музее экскурсии и читал лекции по охране природы (известно о пятнадцати проведенных им таких мероприятиях за 1959–1960 гг. (Федотова, 2026)) Значительно позже я был свидетелем того, как в заповедник приехала группа участников представительной конференции во главе с Э. В. Ивантером. В Музее природы он взял указку и сам повел экскурсию. У стенда с календарем природы он произнес изумительную фразу: «Тут я вам не скажу ничего нового: в Киваче, как и всюду, четыре времени года».

Интерес к Кивачу, внимание к нам и нашим исследованиям он сохранял до своей кончины. Бессменный член Ученого (впоследствии Научно-технического) совета заповедника с тех пор, как они вошли в практику (1973 г.), Эрнест Викторович на заседаниях всегда выступал ярко и по делу многословно по любым обсуждаемым аспектам деятельности «Кивача». Как декан биологического факультета ПетрГУ он рекомендовал нам студентов на практику, принимал участие в судьбе детей кивачских жителей при поступлении в университет. Мог направить на обучение человека, потерявшего здесь работу, после чего взять его на факультет.

Когда это было возможно, Эрнест Викторович обязательно приезжал в Кивач с бывшими соратниками по КЮБЗу, крупными учеными (часто это оказывались одни и те же люди), со специалистами из Польши, Финляндии, США (рис. 2). Иногда они ночевали у нас в доме, и тогда мы вдвоем допоздна засиживались за разговорами. Гуляя в Киваче, он много шутил, вспоминал эпизоды «той» жизни. Мне казалось, что вся здешняя обстановка умиротворяла его. Бывало даже, что он оставался вздремнуть, пока я показывал гостям заповедник. Кто-то сказал, что человек лучше всего чувствует себя там, где он состоялся...



Рис. 2. Один из визитов в Кивач, август 1989 г. Слева направо: Т. В. Ивантер, Э. Эркинаро (финский зоолог и эколог) с супругой, А. П. Кутенков, Э. В. Ивантер

Fig. 2. One of the visits to Kivach, August 1989. From left to right: T. V. Ivanter, E. Erkinaro (Finnish zoologist and ecologist) with his wife, A. P. Kutenkov, E. V. Ivanter

Более полувека назад, после окончания Саратовского университета, меня взяли на работу в научный отдел «Кивача». Перед отъездом в Карелию зав. кафедрой зоологии позвоночных профессор Нина Ивановна Ларина напутствовала: «Там в Петрозаводске работает Ивантер, и Вам очень важно познакомиться с ним!» Наша встреча состоялась в сентябре 1974 г., и я сразу и навсегда попал под обаяние этого очень общительного, доступного и всегда бодрого человека. Так сложилось, что, несмотря на определенную общность научных интересов и близкое соседство, мы никогда не работали в

поле вместе, он никогда не руководил мной официально, и у нас за все годы не вышло ни одной публикации в соавторстве. Но мы виделись довольно часто, и при этих встречах я всегда получал от него массу полезной информации. Размышляя над очередным научным материалом, я почти рефлекторно сопоставлял в уме свои выводы с тем, что мог бы сказать по этому поводу Эрнест Викторович, а его «Популяционную экологию...» (Ивантер, 1975) с автографом не один десяток лет держу под рукой. Было ощущение, что он постоянно рядом со мной. Теперь его нет...

Библиография

- Гибет Л. А., Никифоров Л. П. Наземные позвоночные животные заповедника «Кивач» // Отчет за 1951 г. Петрозаводск, 1952. 184 с. Архив КарНЦ РАН.
- Зимин В. Б., Ивантер Э. В. Фаунистический обзор наземных позвоночных заповедника «Кивач» // Труды заповедника «Кивач». Вып. 1. Петрозаводск, 1969. С. 22–64. URL: https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/bb5/Trudy-vypusk-1_web.pdf (дата обращения 31.01.2026).
- Ивантер Э. В. О рыбах заповедника «Кивач» // Труды заповедника «Кивач». Вып. 1. Петрозаводск, 1969. С. 146–148. URL: https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/bb5/Trudy-vypusk-1_web.pdf (дата обращения 31.01.2026).
- Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1975. 246 с.
- Кутенков А. П. Тридцать лет работы стационаров по учету мелких млекопитающих в заповеднике «Кивач»: основные итоги и обсуждение результатов // Труды ГП заповедника «Кивач». Вып. 3. Петрозаводск, 2006. С. 80–106. URL: <https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/9c2/Vypusk-3.pdf> (дата обращения 31.01.2026).
- Попова Э. К., Сухов А. В. Изменения видового состава ихтиофауны водоемов заповедника «Кивач» под влиянием антропогенных факторов // Труды Государственного природного заповедника «Кивач». Вып. 6. Петрозаводск, 2013. С. 120–132. URL: <https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/a01/Trudy-vypusk-6.pdf> (дата обращения 31.01.2026).
- Федотова В. В. Книги отзывов посетителей заповедника «Кивач» как отражение своего времени. URL: <https://zapkivach.ru/info/advice/istoriya/knigi-otzyvov-posetiteley-zapovednika-kivach-kak-otrazhenie-svoego-vremeni/> (дата обращения 31.01.2026).
- Щербаков А. Н. Круглоротые и рыбы // Флора и фауна заповедников СССР. Фауна заповедника «Кивач». Круглоротые, рыбы, земноводные, пресмыкающиеся, птицы, млекопитающие. М., 1988. С. 5–9.

E. V. IVANTER IN KIVACH: THE BEGINNING OF THE PATH

**KUTENKOV
Anatoly Petrovich**

PhD, Kivatch Nature Reserve, Kivach Waterfall settlement, Kondopoga district, 186200, stapesy@mail.ru

Key words:

E. V. Ivanter,
«Kivach» Nature Reserve

Summary: An important period of the life and work of the famous zoologist and ecologist Ernest Viktorovich Ivanter in the Kivach Nature Reserve is described. The bibliography list contains article files from the first collection of Proceedings of the Kivach Nature Reserve, in which E. V. Ivanter and his co-authors performed a complete review of the fauna of terrestrial vertebrates. Kivach is a famous waterfall on the Suna River in Karelia. Kivach is also the name of a village located in the vicinity of the waterfall («I was in Kivach», «go to Kivach»). Kivach is a State Nature Reserve with an area of 10.9 thousand hectares. Kivach Waterfall and Kivach village are located on the territory of the reserve.

Received on: 31 January 2025

Published on: 27 March 2026

References

- Fedotova V. V. Books of reviews of visitors to the Kivach Nature Reserve as a reflection of their time. URL: <https://zapkivach.ru/info/advice/istoriya/knigi-otzyvov-posetiteley-zapovednika-kivach-kak-otrazhenie-svoego-vremeni/> (data obrascheniya 31.01.2026).
- Gibet L. A. Nikiforov L. P. Terrestrial vertebrates of the Kivach Reserve, Otchet za 1951 g. Petrozavodsk, 1952. 184 p. Arhiv KarNC RAN.
- Ivanter E. V. About the fishes of the Kivach Reserve, Trudy zapovednika «Kivach». Vyp. 1. Petrozavodsk, 1969. P. 146–148. URL: https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/bb5/Trudy-vypusk-1_web.pdf (data obrascheniya 31.01.2026).
- Ivanter E. V. Population ecology of small mammals of the taiga Northwest of the USSR. L.: Nauka, 1975. 246 p.
- Kutenkov A. P. Thirty years of work of a stationary point for the registration of small mammals in the Kivach Nature Reserve: main results and discussion of the resul, Trudy GP zapovednika «Kivach». Vyp. 3. Petrozavodsk, 2006. P. 80–106. URL: <https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/9c2/Vypusk-3.pdf> (data obrascheniya 31.01.2026).
- Popova E. K. Suhov A. V. Changes in the species composition of ichthyofauna of reservoirs of the Kivach Reserve under the influence of anthropogenic factors., Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Kivach». Vyp. 6. Petrozavodsk, 2013. P. 120–132. URL: <https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/a01/Trudy-vypusk-6.pdf> (data obrascheniya 31.01.2026).
- Scherbakov A. N. Round-mouthed and fish, Flora i fauna zapovednikov SSSR. Fauna zapovednika «Kivach». Kruglorotye, ryby, zemnovodnye, presmykayuschiesya, pticy, mlekopitayuschie. M., 1988. P. 5–9.
- Zimin V. B. Ivanter E. V. Faunal overview of terrestrial vertebrates of the Kivach Nature Reserve, Trudy zapovednika «Kivach». Vyp. 1. Petrozavodsk, 1969. P. 22–64. URL: https://zapkivach.ru/upload/medialibrary/bb5/Trudy-vypusk-1_web.pdf (data obrascheniya 31.01.2026).