научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

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

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

http://ecopri/ru

№ 2 (56). ИЮНЬ, 2025

Главный редактор
А. В. Коросов

Редакционный совет
В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
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. Gugołek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

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

ISSN 2304-6465

Адрес редакции
185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453
E-mail: ecopri@psu.karelia.ru
http://ecopri/ru

12+

© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

Содержание № 2. 2025

От редакции

	Без лишних слов	3

Аналитический обзор

Черлин В. А.	***Феномен психотермии и его значение в биологии позвоночных животных***	4 – 19

Оригинальные исследования

Баженова О. П., Костерова В. В., Бычкова В. П.	***Сравнительная оценка репрезентативности природоохранных функций ООПТ города Омска***	20 – 32
Баканев С. В.	***Шримсы-медвежата Баренцева моря и сопредельных вод в условиях изменения климата***	33 – 46
Ковалева О. В.	***Оценка микробиологических показателей сточных вод полей фильтрации молокоперерабатывающего предприятия***	47 – 57
Мангутова А. К., Синдирева А. В., Косолапов Р. М.	***Биометрические показатели и содержание селена в растениях свеклы и моркови при различных методах биофортификации йодом и селеном***	58 – 70
Платонова Е. Ю., Голубев Д. А., Земская Н. В., Михайлова Д. В., Пакшина Н. Р., Тимушева Н. С., Шапошников М. В., Москалев А. А.	***Влияние экстрактов листьев и ягод аронии Мичурина (×Sorbaronia mitschurinii) на продолжительность жизни Drosophila melanogaster***	71 – 83
Синдирева А. В., Заостровская В. В., Вешкурцева С. С.	***Оценка морфологических особенностей и антиоксидантной активности редиса посевного (Raphanus sativus) в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами***	84 – 98
Соколова Т. Л., Мурадова Л. В.	***Оценка экологического состояния некоторых малых рек Государственного природного заповедника «Кологривский лес» по зообентосным сообществам***	99 – 117

Письма в редакцию

Колбин В. А.	***Заповедники и сохранение биологического разнообразия***	118 – 122

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

Выпуск № 2

От редакции

БЕЗ ЛИШНИХ СЛОВ

Уважаемые читатели, авторы и рецензенты!

Очередной выпуск сформирован. Ждем новые материалы по экологии.

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

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 568.16:568.19:568.2:569:575.8:598.1:612.55

ФЕНОМЕН ПСИЛОТЕРМИИ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ В БИОЛОГИИ ПОЗВОНОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ

ЧЕРЛИН
Владимир Александрович

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

Ключевые слова:
термобиологический статус позвоночных животных
хамилотермия
псилотермия

Аннотация: Анализ конкретных данных по температурам тела, принципам организации термобиологических статусов в разных группах позвоночных животных дал возможность выявить и описать базовое свойство позвоночных, ставшее организующей силой их биологии, начиная с рептилий. Это псилотермия – терморегуляционная реакция, направляющая животных повышать температуру тела (обычно выше 28–30°); также это тип термобиологического статуса, при котором животные постоянно или часть времени в сутках поднимают и удерживают температуру тела выше 28–30° посредством тепла, поступающего или извне организма («относительная» эктотермия, брадиметаболическая псилотермия, «потенциальная теплокровность» современных рептилий), или изнутри – эндогенным термогенезом (мезометаболическая и тахиметаболическая псилотермия, т. е. разные степени проявления эндотермии у многих вымерших групп рептилий – архозавроморфов, архозавров, динозавров, развитых териодонтов, а также у птиц и млекопитающих). Альтернативой псилотермии и исходным состоянием является хамилотермия – тип термобиологического статуса, при котором у животных не проявляется реакция псилотермии, в результате чего они имеют температуру тела, мало отличающуюся от температур внешней среды, чаще всего ниже 28–30°; таковы рыбы и амфибии. Описанный нами механизм псилотермии является важнейшим, базовым, фундаментальным свойством высших позвоночных животных.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 02 марта 2025 года
Подписана к печати:13 мая 2025 года

Введение

Ученые в разные времена делили животных на группы по отношению к температуре.

Холоднокровные – теплокровные, т. е. животные, которые «на ощупь» холодные или теплые. Первым, отметившим это обстоятельство, был, конечно, Аристотель (IV век до н. э.; но на русском языке результаты его биологических исследований были опубликованы только в первой половине XX в. – Аристотель, 1937). А уже в середине XIX в. замечательный немецкий анатом, физиолог и биолог Карл Бергман опубликовал работу, в которой отметил способность одних животных поддерживать постоянную высокую температуру тела, которая выше температур окружающей среды, а другие животные на это не способны (Bergmann, 1848). В этой работе он впервые применил термины «теплокровные» и «холоднокровные». Эти термины также использовал австрийский медик и анатом Франц Сетбер (Soetbeer, 1898). Затем, уже в начале XX в., финский медик и физиолог Роберт Тигерстедт, изучая теплообразование у разных животных, также применял термины «теплокровные» и «холоднокровные» (Tigerstedt, 1910). Такой же тер-

минологией пользовался и замечательный, но забытый советский биолог Александр Владимирович Рюмин в своем подробном исследовании термобиологии позвоночных животных разных групп (Рюмин, 1939, 1940). В дальнейшем эти термины использовались в научной литературе очень широко (Glossary..., 2003 и др.).

Пойкилотермные – гомойотермные, т. е. животные с переменной или относительно постоянной температурой тела. Впервые эту пару терминов использовал Карл Бергман (Bergmann, 1848), а за ним и другие исследователи (Soetbeer, 1898; Tigerstedt, 1910; Bligh, Johnson, 1973 и др.). Эти термины и поныне широко используются (Glossary..., 2003 и др.).

Эктотермные – эндотермные, т. е. животные, которые получают тепло извне или производят его сами внутри организма за счет различных экзотермических реакций (Cowles, 1962). Термины применяются и сейчас (Glossary..., 2003 и др.).

Брадиметаболические – тахиметаболические, т. е. животные с низким или высоким уровнем метаболизма (Слоним, 1984).

Все эти термины по сути описывают разделение животных на две большие группы по отношению к температуре. Частично они могут быть применены соответственно к каждой из этих групп: с одной стороны – холоднокровные – пойкилотермные – эктотермные – брадиметаболические, с другой стороны – теплокровные – гомойотермные – эндотермные – тахиметаболические. Но каждая пара терминов описывает эти две группы лишь частично. Внутри каждой из этих двух больших групп (холоднокровные… и теплокровные…) характеристики указанных выше пар дополняют друг друга, создавая более полное представление о группах в целом.

Первые опубликованные сообщения о температуре тела холоднокровных (пойкилотермных…) животных относятся к концу XVII в., когда датский врач и натуралист Олигер Якобеус (Хольгер Якоби) писал, что у лягушек и ящериц температуры тела и окружающей воды практически не различаются (Jacobaeus, 1686). Затем, во второй четверти XVIII в., результаты своих исследований на эту же тему опубликовали французский естествоиспытатель, натуралист, энтомолог, физик и математик, впервые предложивший универсальный термометр и общую температурную шкалу, Рене Реомюр (Réaumur, 1736), изучавший насекомых, и шотландский врач Георг Мартин, изучавший возможности измерения температуры, в частности, на лягушках (Martine, 1740) и др.

В свете последних исследований становится очевидным, что в попытках систематизировать знания по этой проблеме исследователи до сих пор не учитывают важнейшие свойства животных, без осмысления которых описание и изучение этой сложнейшей проблемы становится неполным. Каждая из указанных выше пар понятий имеет в основе то или иное свойство: холодное или теплое тело, изменчивая или постоянная температура тела, поступление теплоты из внешних или внутренних источников, низкие или высокие уровни метаболизма, т. е. разные интенсивности термогенеза. Однако анализ эволюции термоэнергетики у позвоночных животных показал, что у них есть более глубинные различия – свойства «хамилотермии» и «псилотермии», описания которых приводятся ниже (впервые эти термины были применены нами – Черлин, 2021). А все пары терминов, указанные выше, являются в той или иной степени сопутствующими свойствами или их следствиями.

Аналитический обзор

Термоэнергетика

По современным представлениям, температура является одним из важнейших факторов, влияющих практически на все процессы в организме животных. При этом температура неразрывно связана с еще одним очень важным фактором – метаболизмом (Vernon, 1897; Tigerstedt, 1910 и др.). Процессы энергетического обмена являются ключевыми в понимании того, в каком направлении, как и почему животные с тем или иным анатомическим и физиологическим комплексом признаков формируют адаптивные взаимоотношения с внешней средой. При этом все обменные процессы самым непосредственным, жестким и прямым образом связаны с температурой. По сути, нам придется учитывать, рассматривать и изучать единый функциональный блок – «температура – метаболизм». Именно он и может быть назван термоэнергетикой. Может быть, более благозвучно было бы название «термометаболизм», но по крайней мере в англоязычной литературе оно уже преоккупировано – им обозначаются физиологические, метаболические процессы, связанные с термогенезом (например, «thermometabolism» в работе Legendre, Davesne, 2020 и др.). Поэтому наиболее приемлемый, на наш взгляд, ва-

риант обозначения безусловно целостного физиологического комплекса, связывающего температурные и энергетические процессы и реакции, – это «термоэнергетика» (thermoenergetics).

Таким образом, можно обоснованно говорить о том, что реально существует определенный комплекс научных проблем, который в целом касается отношений биологии позвоночных животных с температурным фактором. Огромный массив научных данных, касающийся всех уровней организации живых систем (от биофизики и биохимии до физиологии и экологии), говорит об объективности этого комплекса (Van 'T Hoff, 1884; Vernon, 1897; Arrhenius, 1889; Tigerstedt, 1910; Рюмин, 1939, 1940; Вильсон, 1952; Слоним, 1971; Шмидт-Нильсен, 1982; Рубин, 1987; Березов, Коровкин, 1998; Биохимия, 2004; Черлин, 2014 и др.).

Псилотермия и хамилотермия

Именно на уровне развития рептилий впервые четко проявилось важнейшее свойство, которое характерно только для высших позвоночных животных, – псилотермия.

Псилотермия (psilothermia) (греч. ψηλός – высокий, θέρμη – тепло). 1. Терморегуляционная реакция, направляющая животных на периодическое или постоянное повышение температуры тела (чаще всего более 28–30° и до примерно 45° в зависимости от видов). 2. Тип термобиологического статуса, при котором животные постоянно или часть времени в сутках поднимают и удерживают температуру тела (обычно выше 28–30°). Температура тела оказывается хотя бы на несколько градусов выше основного фона температур окружающей среды. Причем животные могут поднимать и удерживать температуру тела на высоком уровне разными способами: а) в основном за счет перераспределения в тепловом балансе тела идущих извне тепловых потоков благодаря поведенческим реакциям (эктотермия, экзотермия), или же б) в основном за счет изменения интенсивности термометаболизма (т. е. внутреннего сократительного или несократительного термогенеза) и теплоотдачи (эндотермия) (Черлин, 2014).

Важно здесь то, что и эктотермные рептилии, и эндотермные млекопитающие и птицы поднимают температуру своего тела выше 30° (то есть и те, и другие – псилотермы), только реализуют это разными способами. При этом сам феномен псилотермии явился естественным следствием и развитием принципа стабилизации высокой температуры тела в эволюции позвоночных животных (Рюмин, 1940; Черлин, 1990).

Хамилотермия (hamilothermia) (греч. χαμηλός – низкий, θέρμη – тепло) – тип термобиологического статуса, при котором у животных нет терморегуляционной псилотермической реакции, т. е. которые имеют температуру тела, мало отличающуюся от температур внешней среды, чаще всего ниже 28–30°, и у них не проявляются реакции, направленные на ее регулярное повышение (Черлин, 2024). Правда, при изучении хамилотермных животных есть по крайней мере одно важное методическое осложнение. Когда ученые изучают температуры тела, при которых рыбы, амфибии и рептилии активны, или их предпочитаемые температуры тела, то методики этих исследований для каждой из этих групп сильно отличаются друг от друга. Нет и единого понимания того, являются ли понятия «температура активности», «предпочитаемая температура» и другие термобиологические характеристики у этих групп аналогичными. Создается впечатление, что, скажем, предпочитаемые температуры тела для рыб, амфибий и рептилий, хоть могут быть названы одинаково, но на самом деле представляют собой совершенно разные характеристики, существенно отличающиеся по биологическому смыслу, по внутренним механизмам проявления и по методам определения. Проблема требует специального подробного изучения.

Хамилотермия рыб. Стремление повышать температуру тела и выбирать достаточно высокий диапазон температур тела у некоторых (далеко не у всех) групп рыб выражен, но достаточно слабо (Голованов, 2013 и др.).

Хамилотермия амфибий. Большинство амфибий по отношению к температуре мало отличаются от рыб.

Тем не менее по имеющимся данным можно сделать кое-какие выводы. Так, при изучении активности мраморной лягушки, *Nannophrys marmorata* в Шри-Ланке в разные сезоны (рис. 1) очевидно, что во влажный и прохладный сезон лягушки проводят бóльшую часть времени в убежищах, где температура их тела остается в диапазоне 22–23° (рис. 2). В сухой и теплый сезон в середине дня, когда температура воздуха поднимается порой до 40°, лягушки, даже имея возможность, не стремились нагреваться и температура их тела и в это время не поднималась выше практически тех же 24–25° (Senanayake et al., 2019).

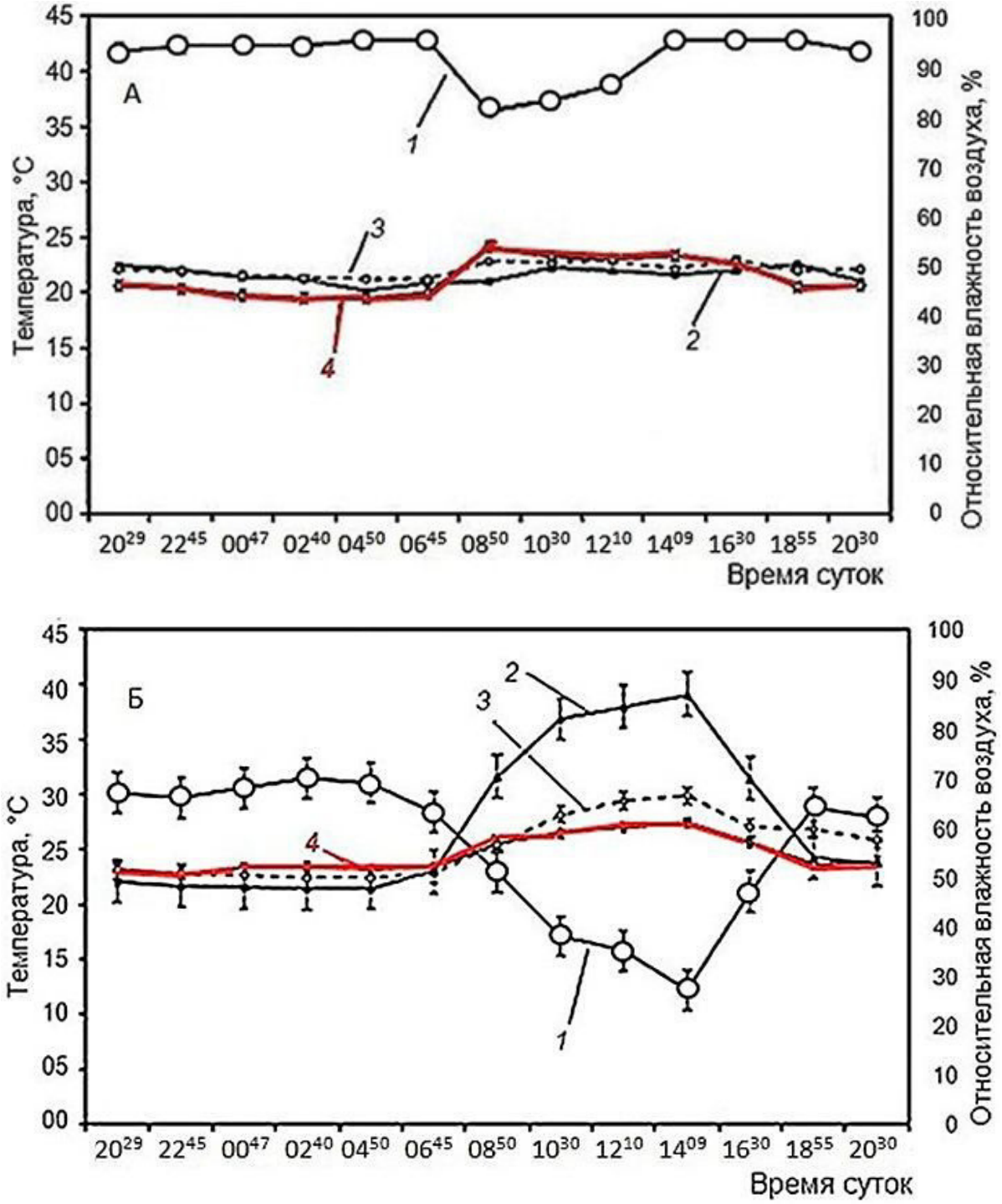


Рис. 1. Иллюстрация хамилотермического статуса. Активность мраморной лягушки в связи с условиями внешней среды в Шри-Ланка. А – влажный сезон, Б – сухой сезон (Senanayake et al., 2019). 1 – относительная влажность воздуха, 2 – температура воздуха, 3 – температура убежища, 4 – температура тела (красная линия)

Fig. 1. Illustration of the hamilothermal status. The activity of the marbled streamlined frog due to environmental conditions in Sri Lanka (Senanayake et al., 2019). A – wet season, Б – dry season. 1 – relative humidity, 2 – air temperature, 3 – shelter temperature, 4 – body temperature (red line)

Рис. 2. Мраморная лягушка в щели среди камней в Шри-Ланке (Senanayake et al., 2019)
Fig. 2. The marbled streamlined frog in a crevice among the stones in Sri Lanka (Senanayake et al., 2019)

Сильно повышать температуру тела для подавляющего большинства амфибий вообще и лягушек в частности смертельно опасно, поскольку при этом стремительно возрастают потери воды из организма. Эффективно сопротивляться этому могут только некоторые пустынные жабы, у которых кожа приобретает достаточно большую плотность и может становиться сухой, что препятствует потере воды их организмом. Периодически температура их тела может подниматься даже до 39° (Pearson, Brandford, 1976).

Психотермия рептилий характерна тем, что данная терморегуляционная реакция заставляет этих животных постоянно или часть времени в сутках поднимать и удерживать температуру тела в пределах 28–45° (чаще всего в диапазонах ~28–35, 35–39, 36–42, 38–45° в зависимости от вида животного). Температура тела оказывается хотя бы на несколько градусов выше основного фона температур окружающей среды. Поднимать и удерживать температуру тела на высоком уровне психотермы могут в основном эктотермным путем (в отдельных, редких случаях используются элементы эндогенного пути).

Проиллюстрировать психотермию рептилий можно на примере среднеазиатской эфы, *Echis multisquamatus*, ушастой круглоголовки, *Phrynocephalus mystaceus* и обыкновенной гадюки, *Vipera berus*.

На рис. 3, 4 и 5 показано, что в любые сезоны года при активности рептилий, в ситуациях, когда условия внешней среды позволяют, эти животные благодаря внешним источникам тепла и поведенческим регуляторным реакциям поднимают и удерживают температуру своего тела в более или менее определенном диапазоне.

Экологический смысл преимущества подъема температуры тела, т. е. наличия психотермической реакции, связан, в частности, с тем, что при высокой температуре подавляющее большинство химических реакций, а значит, и физиологических процессов, и процессов в нервной системе происходят быстрее. Особенно это важно для огромных по размерам и массе динозавров, гигантозавров (бронтозавров, диплодоков, брахиозавров и др.) длиной до 30–35 м и весом до 50–80 т, огромных спинозавров, тиранозавров и т. п. При низких температурах тела (даже около 25°) их движения, реакции на внешние раздражители (даже на опасности), требующие порой быстрых, стремительных, оперативных ответов, были бы медленны-

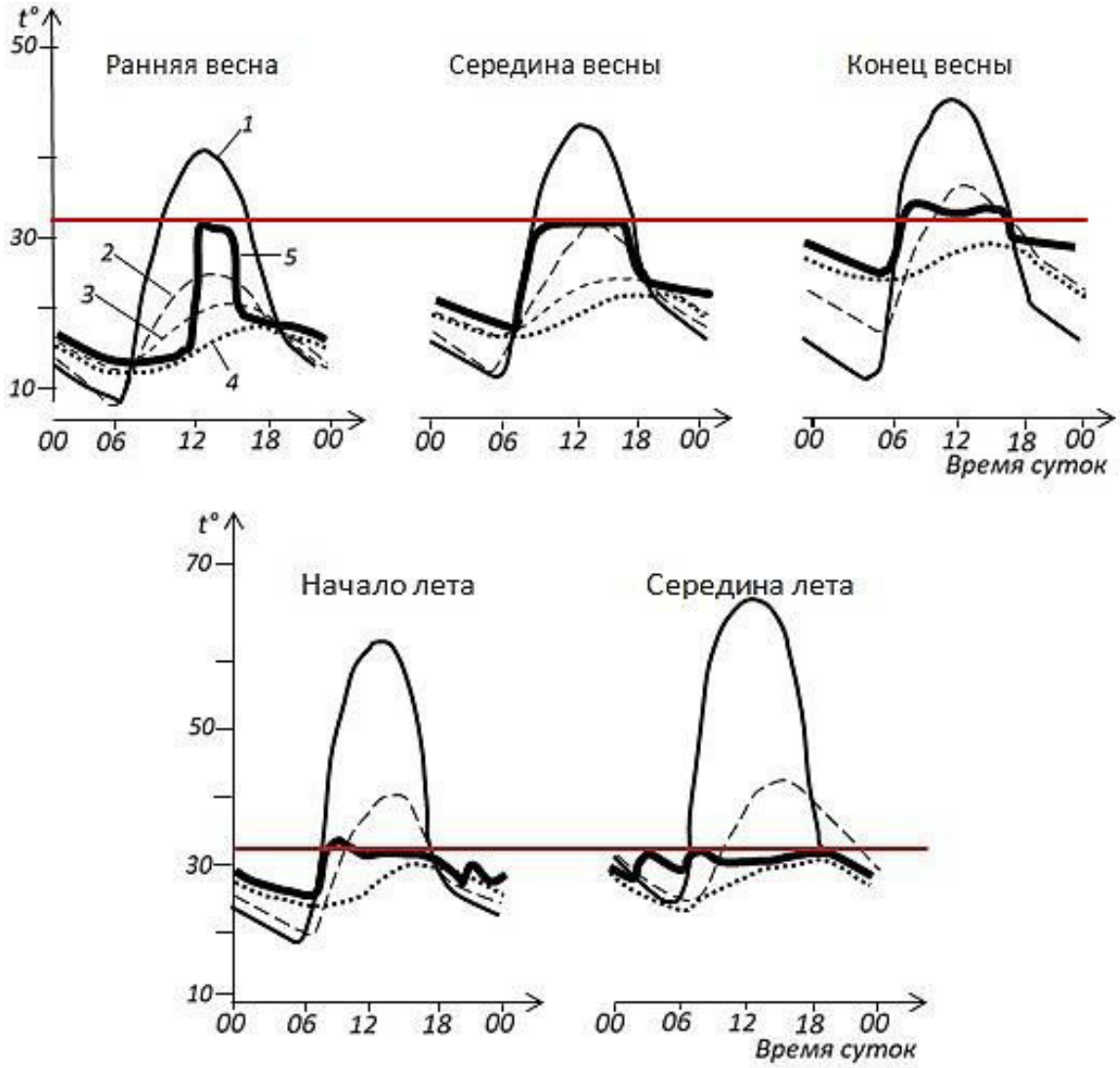


Рис. 3. Иллюстрация псилотермического статуса. Активность среднеазиатской эфы в связи с условиями внешней среды (по: Черлин, Целлариус, 1981). 1 – температура поверхности почвы, 2 – температура воздуха на высоте 2 см, 3 – температура почвы на глубине 20 см, 4 – температура почвы на глубине 30 см, 5 – температура тела. Красная линия показывает уровень температуры примерно 32°

Fig. 3. Illustration of psilothermal status. The activity of the Saw-scaled viper due to environmental conditions (by Cherlin, Tsellarius, 1981). 1 – soil surface temperature, 2 – air temperature at a height of 2 cm, 3 – soil temperature at a depth of 20 cm, 4 – soil temperature at a depth of 30 cm, 5 – body temperature. The red line shows a temperature level of about 32°

ми, плавными. Такие животные не способны были бы ни добывать большое количество необходимых для них кормов, ни их переваривать и усваивать, ни оперативно избегать хищников и других внешних опасностей. В реальной природной обстановке они были бы не способны выжить. Так что иметь высокую температуру тела, и к тому же желательно независимо от климатических условий внешней среды, для таких животных – не абстрактное, отвлеченное, желательное условие, а насущная необходимость. На это же обстоятельство указывал и Валерий Михайлович Гаврилов (Гаврилов, 2012).

Но первым на это важное обстоятельство обратил внимание Александр Владимирович Рюмин (Рюмин, 1940), затем Иван Дмитриевич Стрельников (Стрельников, 1948), а уже потом мы (Черлин, 1990 и др.).

Изучая термобиологию пресмыкающихся и представив вариант организации у них механизма регуляции температуры тела в нервной системе, мы, помимо прочих, описали тип терморегуляционной реакции рептилий, названный нами «реакцией максимизации температуры тела». «Проявление этого механизма выражается в стремлении к повышению, «максимизации» температу-

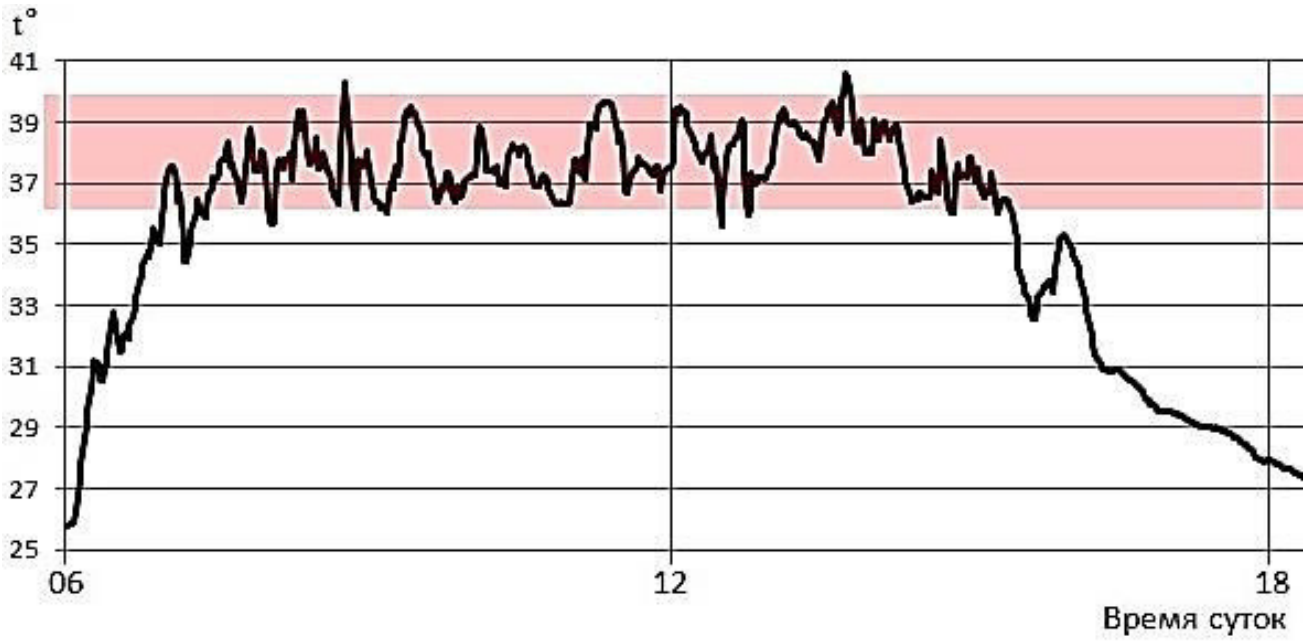


Рис. 4. Иллюстрация псилотермического статуса. Суточный ход температуры тела ушастой круглоголовки на бархане Сарыкум (Дагестан, РФ) 31 мая 2024 г., полученный с помощью внедренного парентерально миниатюрного логгера температуры, регистрировавшего и запоминавшего температуру тела раз в минуту. t° – температура. Розовой полосой отмечен преимущественный диапазон температуры тела (~36–40°), который ящерица направленно удерживает у себя в дневное время, ведя очень подвижный образ жизни в мозаичных по температуре условиях внешней среды (при температуре поверхности песка на разных участках ~ от 30 до 60°)

Fig. 4. Illustration of psilothermal status. The daily course of body temperature in the toad-headed agama, *Phrynocephalus mystaceus*, on the Sarykum dune (Dagestan, Russia) on May 31, 2024, obtained using a parenterally embedded miniature temperature logger that recorded and stored body temperature once a minute. t° is the temperature. The pink stripe marks the predominant range of body temperature (~36–40 °), which the lizard directionally retains during the daytime, leading a very mobile lifestyle in mosaic-like ambient conditions (with sand surface temperatures in different areas ranging from 30 to 60°)

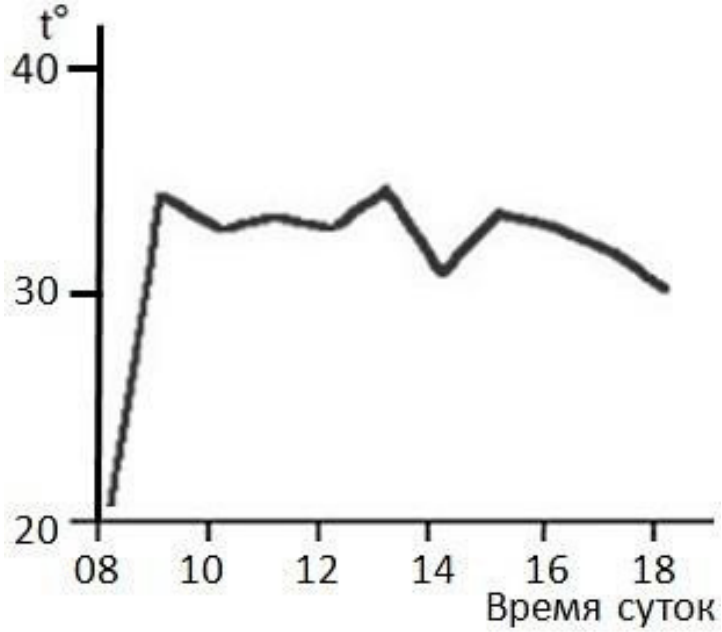


Рис. 5. Суточный ход температуры тела обыкновенной гадюки в мае в Карелии, полученный с помощью телеметрии (по: Коросов, 2008), иллюстрирует ее терморегуляционное поведение и псилотермический статус

Fig. 5. The daily course of body temperature of the common adder in May in Karelia obtained by using of telemetry (according to Korosov, 2008) illustrates its thermoregulatory behavior and psilothermic status

ры вплоть до верхней границы. В полевых и лабораторных исследованиях этот регулятор проявляется в том, что рептилии, имея низкую температуру тела, в подавляющем большинстве случаев пытаются различными, преимущественно поведенческими приемами ее повысить до допустимой верхней границы. Такая ситуация регулярно наблюдается у всех видов рептилий. Она четко проиллюстрирована, в частности, описанием стратегии терморегуляции у обыкновенных гадюк в Карелии (Коросов, 2008), выражающейся в стремлении к повышению температуры тела до определенного, достаточно высокого уровня. Можно предположить, что, исходя из структуры, описанной моделью А. В. Коросова, штатное значение физиологической константы фиксирует высокий, практически недостижимый для животного уровень температуры тела, к которому она должна стремиться. При увеличении величины отклонения температуры тела от штатного значения константы, поведенческие реакции обратной связи повышают температуру тела (в идеале – до штатного значения)» (Черлин, 2014, с. 148–149).

Таким образом, еще на два года раньше нас Андрей Викторович Коросов, предложив модель терморегуляции обыкновенной гадюки (Коросов, 2008), показал, что рептилии (по крайней мере – этот вид змей) стремятся к повышению температуры тела до уровня примерно 28–30° или даже выше. «Максимальная добровольная температура (Тм), физиологическая константа терморегуляции, играет роль целевого параметра, к которому система стремится, но достичь почти никогда не может… Обычно же достигается менее высокая температура – 28–30 °С. Но это и есть нужная «оптимальная» (с физиологической точки зрения) температура для гадюки (То), при которой должным образом идут процес,сы обмена, роста, пищеварения и пр… Здесь Тм является псевдоцелью, стремление к которой обеспечивает истинную цель, физиологически оптимальную температуру тела» (Коросов, 2008, с. 65). Здесь также идет речь о некоем механизме, заставляющем змей повышать температуру тела (стремление к псевдоцели – высокой, недостижимой температуре тела).

Таким образом, сейчас уже существуют осторожные подходы к тому, чтобы понять, каким образом может быть организовано и поддержано состояние псилотермии у позвоночных животных. Но это лишь предположения. Проблема требует дальнейших серьезных исследований, поскольку она имеет очень важное значение для понимания сути и функциональной направленности развития отношения животных с тепловым фактором, теплокровности птиц и млекопитающих, механизмов организации и, при необходимости, путей воздействия на терморегуляционную сферу у человека и т. п. И здесь важно понять три основные вещи:

1) являются ли описанные выше аспекты именно теми, которые определяют механизмы проявления и закрепления стратегического направления развития термобиологического статуса – псилотермии;

2) базируется ли поддержание псилотермии для разных уровней организации на одних и тех же материальных основаниях, на одних и тех же биохимических и организационных механизмах, а если на разных – то на каких;

3) почему именно уровень температуры тела 28–30° является настолько важным, что становится неким «водоразделом» в отношениях позвоночных животных с температурой, разделяющим хамилотермов и псилотермов, анамний и амниот, каково физиологическое значение этого температурного уровня.

К сожалению, удовлетворительных, исчерпывающих, научно обоснованных ответов на эти вопросы мы в литературе пока не находим. Их еще предстоит дать будущим поколениям ученых. А пока мы можем только констатировать эмпирически выявленные факты, что уже не мало. В частности, становится понятно, что серьезное внимание в исследованиях по биологии позвоночных животных следует в значительной степени уделять не только механизмам термогенеза и способам поступления тепла в организм животных, но и механизмам, вызывающим физиологическую потребность в повышении и поддержании высокой температуры тела. Способы поступления тепла в организм – лишь способы реализации этой стратегически важной физиологической потребности.

Одной из биологических основ псилотермии является, видимо, определенный уровень клеточного митохондриального дыхания, который примерно в два раза повысился по сравнению с исходным, амфибийным, хамилотермическим состоянием (Черлин, 2017). Он улучшил энергетическую обеспеченность активности, заложил основу для будущего комплекса поведенческих терморегуляторных реакций, а также для биохимических механизмов тахиметаболизма.

Другой биологической основой псилотермии является механизм регуляции температуры тела, который стал обеспечивать ее направленность на повышение по крайней мере до 28–30° или выше. Что так повлияло на стабилизацию установочного регулирующего параметра на этом уровне – вопрос пока открытый. Но он тоже требует решения.

Псилотермия теплокровных животных очевидна: температура их тела поддерживается благодаря прежде всего несократительному и сократительному (в частности – дрожательному) термогенезу (эндотермия) на почти постоянном уровне, который практически всегда и у всех теплокровных животных выше 30°.

Псилотермы могут поднимать и удерживать температуру тела на высоком уровне разными способами: 1) в основном за счет поступающего извне тепла и его перераспределения в теле благодаря поведенческим и физиологическим реакциям (относительная аналогия в общепринятых терминах – холоднокровность, эктотермия, пойкилотермия, брадиметаболизм), или же 2) в основном за счет внутреннего сократительного или несократительного термогенеза (относительная аналогия в общепринятых терминах – теплокровность, эндотермия, гомойотермия, тахиметаболизм). Псилотермическими являются все позвоночные животные, которые достигли уровня развития рептилий: среди диапсид – первые же базовые архозавроморфы, развитые архозавры, включая птицетазовых и ящеротазовых динозавров, а также птерозавры, морские ящеры и настоящие птицы; среди синапсид – базовые синапсиды (пеликозавры, териодонты), развитые млекопитающие (Черлин, 2024).

Здесь, наверно, стоит проанализировать определения двух других, уже употребляемых и привычных, терминов, с которыми новые термины не следует путать.

Холоднокровное животное – «тепловое состояние животного, при котором температура ядра тела остается близкой к температуре окружающей среды при воздействии низкой температуры окружающей среды…» (Glossary…, 2003, p. 79).

Теплокровное животное – «тепловое состояние животного, которое поддерживает температуру ядра своего тела значительно выше, чем температура окружающей среды при воздействии низкой температуры окружающей среды…» (Glossary…, 2003, p. 103).

Но в определениях холоднокровности имеется одно спорное обстоятельство. Температура тела холоднокровных животных действительно очень сильно зависит от температур окружающей среды. Однако это проявляется лишь в определенном варианте экспериментальных условий, когда у животных нет возможности температуру тела регулировать, т. е. менять. И тут проблема упирается в понятие «терморегуляция».

Традиционно в Советском Союзе, и до сих пор в Российской Федерации многие ученые (особенно физиологи) делятся на две группы по отношению к понятию «терморегуляция». В результате своих представлений о терморегуляции одни из них отказывают рептилиям в наличии терморегуляции, другие – нет.

Отрицающие терморегуляцию у рептилий ученые вкладывают в это понятие следующий смысл: «Терморегуляция – совокупность физиологических процессов, обеспечивающих постоянство температуры тела у теплокровных животных (птиц и млекопитающих) и человека. Осуществляется путем изменения интенсивности теплопродукции (при окислительных процессах в организме) и путем изменения теплоотдачи через кожу (испарение пота и др.)» (Большой…, 2000). Другими словами, терморегуляция в таком понимании заведомо связывается исключительно с биохимическими и физиологическими эффекторными системами и подходит только эндотермным, теплокровным животным. Но это произвольная трактовка, не отражающая всей сложности самого явления терморегуляции в природе у разных групп животных.

Другие ученые вкладывают в этот термин более широкий смысл. Например: «Терморегуляция… физиологическая функция, обеспечивающая поддержание оптимальной для данного вида температуры глубоких областей тела в условиях меняющейся температуры окружающей среды. Способность к терморегуляции в значительной мере определяет границы расселения и выживания животных в различных климатических условиях и является одним из важных механизмов их гомеостаза» (Биологический…, 1986, с. 627). В таком варианте терморегуляция вполне может быть приписана и рептилиям.

Четкое определение терморегуляции было дано Комиссией по термальной физиологии при Международном обществе физиологических наук (Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences): «Регулирование температуры[1]: поддержание температуры

или температур тела в ограниченном диапазоне в условиях переменных внутренних и/или внешних тепловых нагрузок. Регулирование температуры тела осуществляется в некоторой степени вегетативными или поведенческими средствами» (Glossary…, 2003, p. 97). В круг действия этого определения в полной мере входят и реакции рептилий, направленные на контроль за температурой своего тела в основном поведенческими способами.

Замечательный русский / советский ученый Иван Дмитриевич Стрельников уделял большое внимание изучению терморегуляции насекомых и рептилий. Еще в начале тридцатых годов прошлого века он не признавал у них возможностей регуляции температуры тела: «Пойкилотермные животные не обладают способами регулирования температуры тела и поддержания ее в узких пределах нескольких градусов, как у гомойотермных» (Стрельников, 1934, с. 361). И хотя это была довлеющая на то время концепция среди биологов, тем не менее его собственные исследования часто ставили это положение под сомнение: «Среди разнообразных и непрерывно меняющихся экологических условий Stenodes caspius и другие обитатели пустыни лавируют таким образом, что сохраняют некоторое постоянство наиболее для благоприятных условий. Прохладно в воздухе – жуки вылезают из песка, питаются, спариваются; жарко или холодно – зарываются в песок, где находят для себя ту же температуру, что была для них в воздухе» (Стрельников, 1934, с. 354). Причем, обратите внимание: две последних цитаты взяты из одной статьи!

Но Иван Дмитриевич Стрельников был действительно замечательный, думающий ученый, и его полевые исследования и эксперименты в конечном итоге заставили его изменить свою точку зрения. «…Рептилии в период активной жизни днем имеют температуру тела в среднем около 35–36º (30–40º), т. е. такую температуру тела, как млекопитающие. Рептилии активно поддерживают температуру своего тела движением или, чаще и больше всего, греясь лучами солнца; зарываясь в песок, прячась в тень, они избегают перегревания» (Стрельников, 1944, с. 256).

Кроме чисто поведенческих реакций И. Д. Стрельников показал и другие приемы терморегуляции у рептилий и даже у амфибий. «Одним из главных приспособлений пустынных животных является их окраска. Преобладающей окраской жителей пустыни являются светлые окраски, отражающие значительную часть падающих лучей. Во время моего пребывания в Репетеке, мне удалось отметить, что ушастая круглоголовка Phr. mystaceus рано утром при более низких температурах имеет темную окраску. По мере поднятия температуры, в особенности около полудня, Phr. mystaceus становятся очень светлыми, и имеют соломенно-желтоватые светлые тона в окраске. Темный пигмент, рассеянный по телу у ящериц в холодном воздухе, концентрируется в пятнах, рассеянных по светло-желтоватому фону» (Стрельников, 1934, с. 357–358). Эти закономерности он проиллюстрировал своими опытами и на ряде видов земноводных – жабах и лягушках (Стрельников, 1944). Таким образом, безусловное наличие терморегуляции у амфибий и в особенности у рептилий было практически доказано.

Однако значительная часть физиологов отрицала возможность терморегуляции у пойкилотермных (эктотермных) животных (Бахметьев, 1899; Стрельников, 1934; Коштоянц, 1950 и др.). Основной их довод сводился к следующему: существует вполне научно доказанное утверждение, что температура тела пойкилотермных животных (в частности амфибий и рептилий) напрямую зависит от температуры окружающей среды. Если такое животное поместить в экспериментальные условия с температурой воздуха, например, 25°, то температура его тела также будет 25° (± примерно 1°); при температуре воздуха 30° температура тела животного также будет примерно 30° и т. п. Исходя из этого авторы делают заключение о том, что у этих животных терморегуляции нет.

Дефект этого подхода очевиден: в таком эксперименте во внешней среде температура однородная и нет никакого ее разнообразия. Значит, животное помещается в такие условия, в которых терморегуляция, т. е. возможность изменить температуру тела, заведомо может быть только физиологической (за счет изменения внутренней теплопродукции). Поведенческая терморегуляция в таких условиях принципиально невозможна. Но причиной этого является не неспособность животного к терморегуляции, а отсутствие возможности такой регуляции из-за однородности среды, т. е. некорректность поставленного опыта.

Наши исследования термобиологии рептилий однозначно подтверждают наличие терморегуляции, например, у ящериц. Так, в

пустынях Средней Азии живут сугубо ночные ящерицы – сцинковые гекконы, *Teratoscincus scincus*. Они появляются на поверхности почвы только после захода солнца (Богданов, 1965) и встречаются там при температурах внешней среды и тела примерно от 16 до 33° (рис. 6) (Черлин, 2013).

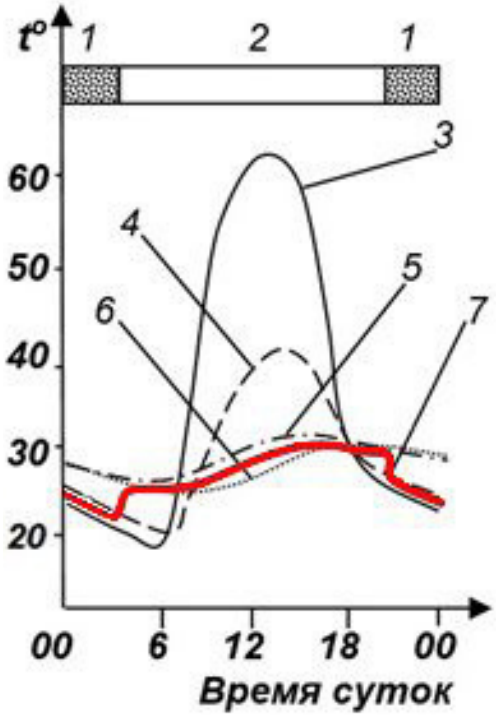


Рис. 6. Связь температуры тела сугубо ночного сцинкового геккона с температурными условиями среды в летний период (по: Черлин, 2013). *t°* – температура; формы активности: 1 – активность на поверхности в темное время суток, 2 – сон / отдых (дневной); температуры: 3 – поверхности почвы; 4 – воздуха на высоте 3 см, 5 – почвы на глубине 20 см, 6 – почвы на глубине 30 см, 7 – (красная линия) тела гекконов

Fig. 6. Relationship of body temperature of a purely nocturnal Turkestan plate-tailed gecko with ambient temperature conditions in summer (according to Cherlin. 2013). t° – temperature; forms of activity: 1 – activity on the soil surface at night, 2 – sleep / rest (daytime); temperatures: 3 – soil surface; 4 – air at a height of 3 cm, 5 – soil at a depth of 20 cm, 6 – soil at a depth of 30 cm, 7 – (redline) body temperature of geckos

Все дневное, светлое время суток сцинковые гекконы проводят в норах. Если посмотреть на динамику различных климатических параметров на поверхности и в глубине почвы, то становятся очевидными важные закономерности. Суточная динамика температуры тела сцинковых гекконов неслучайна. Несмотря на то, что температура тела гекконов сильно зависит от температурных условий внешней среды (как в описанных выше экспериментах физиологов), она кроме того подчиняется и своим внутренним закономерностям. Даже в различных климатических условиях, в разные сезоны года динамика температуры тела гекконов имеет вполне определенный характер и ее суточные графики изо дня в день повторяются. При этом суточный ход температуры тела сцинковых гекконов не повторяет суточную динамику ни одного из температурных параметров ни одной точки внешней среды. Значит, динамика температуры тела ящериц направленно задается определенными внутренними требованиями и фактически формируется их определенными поведенческими реакциями в разнообразных условиях внешней среды. Другими словами, у них проявляется хорошо развитая терморегуляция. Такая же ситуация ясно видна и на примерах со среднеазиатской эфой и ушастой круглоголовкой (см. рис. 3 и 4).

Таким образом, если терморегуляцию понимать как свойство, присущее только теплокровным животным, то современные рептилии, естественно, оказываются типично холоднокровными животными. Если же термин «терморегуляция» понимать корректно, то термобиологический статус со-

временных рептилий оказывается в определенной степени «промежуточным» между холоднокровными и теплокровными. И при этом становится очевидно, что терморегуляционные реакции рептилий настроены так, что они являются эффекторными механизмами, реализующими феномен псилотермии.

В результате, если понятия «холоднокровность» и «хамилотермия» по отношению к рыбам и амфибиям оказываются практически идентичными, то понятия «теплокровность» и «псилотермия» различаются. Теплокровные животные – те, которые поддерживают высокую температуру тела преимущественно за счет высокого уровня термометаболизма, причем несократительного, а псилотермы проявляют направленность своих поведенческих и физиологических реакций (в т. ч. и термометаболизма) на периодическое или постоянное повышение и стабилизацию высокой температуры тела выше 28–30° любыми доступными путями (экзогенным или эндогенным поступлением тепла, физиологической и/или поведенческой терморегуляцией). Рептилии вместе с типичными теплокровными животными являются псилотермами. Реакция псилотермии объединяет их биологию на глубоком, базовом уровне.

Следовательно, рептилий как класс позвоночных животных во всем своем огромном разнообразии вымерших и современных форм можно рассматривать как животных со сложным и неоднозначным термобиологическим статусом. Внутри общности, которую мы называем рептилиями, имеются всевозможные варианты реализации псилотермии, которые приводили к появлению групп с физиологией от типичных эктотермов до классических эндотермов с различной степенью термометаболизма, правда, видимо, с недостаточно еще развитой системой регуляции теплопродукции (Черлин, 2024). У современных же рептилий имеется определенная «двоякость» термобиологического статуса. С одной стороны, они получают тепло преимущественно извне организма, т. е. должны считаться типично эктотермными животными. С другой стороны, у них четко проявляется свойство псилотермии, которое определенно направляет их к периодическому повышению и поддержанию достаточно высоких температур тела (в зависимости от видов от 28–30 до 44–45°). Другими словами, современные рептилии – эктотермные псилотермы. Именно в связи с этим А. В. Рюмин удачно назвал их «потенциально теплокровными» животными (Рюмин, 1939).

Рассматривая распределение псилотермии и хамилотермии среди позвоночных животных, можно заключить, что все анамнии – хамилотермы, а все амниоты – псилотермы. Смысл этой связки еще предстоит изучить и понять.

Таким образом, мы описали наличие биологического феномена псилотермии. Это свойство устанавливает определенную систему взаимоотношений животных с внешней средой, их экологию, принципы организации и функционирования систем внутренних органов, морфофизиологию потомков и т. п.

Морфофизиологическая организация позвоночных как группы животных, систем их внутренних органов несет в себе их важные базовые характеристики, которые отражаются на разных сторонах биологии всех групп, начиная по крайней мере с рептилий. Но самих этих характеристик мы до сих пор не знаем. Причем, как мы уже отметили, биологические особенности псилотермии входят в биологическую базу амниот в целом, млекопитающих, и человека в частности. А мы до сих пор не знаем, что представляет собой псилотермия, какой она охватывает круг биологических характеристик животных, в чем состоит ее биологический механизм, каких еще внутренних систем она касается, что она значит в биологии разных групп, и человека в частности.

[1] Термины «терморегуляция» и «регулирование температуры» («Thermoregulation» и «Temperature regulation») – синонимы, что специально подчеркнуто в словаре (Glossary…, 2003, p. 101).

Заключение

Анализ конкретных данных по температурам тела, принципам организации и развития термобиологических статусов в разных группах позвоночных животных (вымерших и современных) дал возможность выявить и описать базовое свойство позвоночных животных, появившееся впервые у рептилий. Это псилотермия – терморегуляционная реакция, направляющая животных на то, чтобы постоянно или периодически поднимать и удерживать температуру тела (чаще всего выше 28–30°) посредством тепла, поступающего или извне организма (эктотермная псилотермия некоторых вымерших и всех современных рептилий), или изнутри (эндотермная псилотермия большинства вы-

мерших архозавроморфов, архозавров, ихтиоптеригий и некоторых других диапсид, продвинутых синапсид, птиц и млекопитающих). Исходным состоянием является хамилотермия – тип термобиологического статуса, при котором у животных нет реакции псилотермии, они имеют температуру тела, мало отличающуюся от температур внешней среды, чаще всего ниже 28–30° (рыбы и амфибии). Псилотермия способствовала повышению температуры тела, усилению основного обмена, улучшению качества активности и экологической конкурентоспособности позвоночных животных.

Описанный нами механизм псилотермии является важнейшим, базовым, фундаментальным свойством всех групп позвоночных животных начиная с рептилий. Именно его развитие привело к появлению и совершенствованию комплексов свойств эктотермных (холоднокровных) и эндотермных (теплокровных) животных.

Действие этого механизма проявляется у млекопитающих, а следовательно, и у человека. Поскольку этот механизм базовый, значит, должен иметь огромное значение в функционировании физиологических систем организма. Для человека это должно иметь большое значение, поскольку этот механизм принципиально важен как с точки зрения физиологической, так и с позиций терапевтической медицины. Но о нем, о его устройстве и функционировании в нервной системе, значении в организации и работе систем терморегуляции и других физиологических систем и функций организма в норме и патологии, в процессе адаптаций пока вообще ничего не известно. На наш взгляд, изучение этого механизма должно сыграть серьезную роль в развитии наших представлений о деятельности организма человека, о возможности на нее воздействовать, менять уровень адаптабельности и исправлять патологические состояния.

Библиография

Аристотель. О частях животных Пер. с греч. М.: Биомедгиз, 1937. 219 с.

Бахметьев П. И. Собственная температура пчел и вообще насекомых СПб.: Тип. В. Демакова, 1899. 11 с.

Березов Т. Т., Коровкин Б. Ф. Биологическая химия М.: Медицина, 1998. 704 с.

Биологический энциклопедический словарь М.: Советская энциклопедия, 1986. 831 с.

Биохимия / Ред. Е. С. Северин. М.: Изд. дом "ГЭОТАР-МЕД", 2004. 784 с.

Богданов О. П. Экология пресмыкающихся Средней Азии Ташкент: Наука, 1965. 259 с.

Большой энциклопедический словарь 2000 URL: https://bcoreanda.com/ShowTreck.aspx?ID=459 (дата обращения: 12.03.2025).

Вильсон П. В. Дыхательные ферменты М.: Иностранная литература, 1952. 416 с.

Гаврилов В. М. Экологические, функциональные и термодинамические предпосылки и следствия возникновения гомойотермии на примере исследования энергетики птиц // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73, № 2. С. 88–113.

Голованов В. К. Температурные критерии жизнедеятельности пресноводных рыб М.: Полиграф-Плюс, 2013. 300 с.

Коросов А. В. Простая модель баскинга обыкновенной гадюки (*Vipera berus* L.) // Современная герпетология. 2008. Т. 8, вып. 2. С. 118–136.

Коштоянц Х. С. Основы сравнительной физиологии Т. 1. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 524 с.

Рубин А. Б. Биофизика клеточных процессов Кн. 2. М.: Высшая школа, 1987. 303 с.

Рюмин А. В. Значение температуры в онтогенезе и филогенезе животных // Успехи современной биологии. 1940. Т. 12, № 3. С. 504–515.

Рюмин А. В. Температурная чувствительность позвоночных животных и биологический путь происхождения теплокровных форм // Сборник студенческих научных работ МГУ. 1939. Вып. 6. С. 55–84.

Слоним А. Д. Физиология терморегуляции Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1984. 378 с.

Слоним А. Д. Экологическая физиология животных М.: Высшая школа, 1971. 448 с.

Стрельников И. Д. Значение солнечной радиации в экологии высокогорных рептилий // Зоологический журнал. 1944. Т. 23, № 5. С. 250–256.

Стрельников И. Д. Значение солнечной радиации и взаимодействия физико-географических факторов в экологии животных различных ландшафтов (К вопросу о значении физической географии в экологии животных) // Проблемы физической географии. 1948. № 13. С. 145–155.

Стрельников И. Д. Свет как фактор в экологии животных. Статья первая. Действие солнечной радиации на температуру тела некоторых пойкилотермных животных (к экологии животных пустыни Кара-Кумы) // Известия Научного института имени П. Ф. Лесгафта. 1934. Т. 17–18. С. 313–372.

Черлин В. А. Значение изменений интенсивности сопряженного и несопряженного дыхания митохондрий в эволюции позвоночных животных // Успехи современной биологии. 2017. Т. 137, № 5. С. 479–497.

Черлин В. А. Рептилии: температура и экология. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. 442 с.

Черлин В. А. Связь между эктотермией и эндотермией в эволюции позвоночных животных // Журнал общей биологии. 2024. Т. 85, № 3. С. 244–266.

Черлин В. А. Стабилизация высокой температуры тела в эволюции позвоночных животных // Успехи современной биологии. 1990. Т. 109, № 3. С. 440–452.

Черлин В. А. Сравнение термобиологии сцинкового (Teratoscincus scincus scincus) и гребнепалого (Crossobamon eversmanni) гекконов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18, вып. 6. С. 3110–3112.

Черлин В. А. Эволюция термобиологических статусов у позвоночных животных. Статья 2. Развитие отношений с температурой у позвоночных животных // Журнал общей биологии. 2021. Т. 82, № 6. С. 459–477.

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).

Шмидт-Нильсен К. Физиология животных Т. 1. М.: Мир, 1982. 414 с.

Arrhenius S. A. Über die Dissociationswärme und den Einfluß der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte // Z. Phys. Chem. 1889. Vol. 4, issue 1. S. 96–116.

Bergmann C. Uber die Verhältnisse der Wärmeökonomie der Tiere zu ihrer Größe. Göttingen, 1848. 117 S.

Bligh J., Johnson K. G. Glossary of terms for thermal physiology // J. Appl. Physiol. 1973. Vol. 35, No 6. P. 941–961.

Cowles R. B. Semantics in biothermal studies // Science. 1962. No 135. P. 670.

Glossary of terms for thermal physiology. Third Edition revised by The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (IUPS Thermal Commission) // Journal of Thermal Biology. 2003. No 28. P. 75–106.

Jacobaeus O. De ranis et lacertis observations. Hafniae: Johannis M. Lieben., 1686. 174 p.

Legendre L. J., Davesne D. The evolution of mechanisms involved in vertebrate endothermy // Phil. Trans. R. Soc. B. 2020. Vol. 375 (1793). P. e20190136.

Martine G. Essays medical and philosophical. Milla: London, 1740. 392 p.

Pearson O., Brandford D. F. Thermoregulation of lizards and toad at high altitudes in Peru // Copeia. 1976. № 1. P. 155–170.

Réaumur R. Mémoirs pour servir à l'Histoire des Insectes. Tome 2. Paris: d'Imprimerie Royal., 1736. 514 p.

Senanayake U. I., Siriwardana S., Weerakoon D. K., Wijesinghe M. R. Combating Extreme Tropical Seasonality: Use of Rock Crevices by the Critically Endangered Frog Nannophrys marmorata in Sri Lanka // Herpetological Conservation and Biology. 2019. Vol. 14, No 1. P. 261–268.

Soetbeer F. Uber die Körperwärme der poikilothermen Wirbeltiere // Arch. f. exp. Pathol. Bd. 1898. Vol. 40. P. 53–80.

Tigerstedt R. Die Production von Wärme und der Wärmehaushalt (S. 1–104) / Handbuch der vergleichenden Physiologie herausg. von Winterstein., 1910. 1060 S.

Van 'T Hoff J. H. Études de dynamique chimique. Amsterdam: F. Muller & Co., 1884. 236 p.

Vernon H. M. The relation of the respiratory exchange of cold-blooded animals to temperature // J. Phisiol. 1897. Vol. 21 P. 443–496.

Благодарности

Благодарю кандидата биологических наук Валентину Николаевну Куранову, доцента Томского государственного университета, доктора биологических наук Бориса Дмитриевича Куранова, ведущего научного сотрудника Томского государственного университета, доктора биологических наук Георгия Аркадьевича Ладу, профессора Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина, а также Игоря Юрьевича Барсукова и Игоря Леонидовича Окштейна за ценные замечания и советы.

THE PHENOMENON OF PSILOTHERMY IN THE BIOLOGY OF VERTEBRATES

CHERLIN Vladimir Alexandrovich

DSci, Dagestan state univeersity, 43, Gadzhiev St. Makhachkala Republic of Dagestan 367000, cherlin51@mail.ru

Keywords:
thermobiological status of vertebrates
hamilothermy
psilothermy

Summary: The analysis of specific data on body temperatures and the principles of organization of thermobiological statuses in different groups of vertebrates made it possible to identify and describe the basic property of vertebrates that has become the organizing force of their biology, starting with reptiles. This is psilothermia, a thermoregulatory reaction that directs animals to raise their body temperature (usually above 28–30 °C). It is also a type of thermobiological status in which animals constantly or part of the time during the day raise and keep their body temperature above 28–30°. They do it through heat coming either from outside the body («relative» ectothermy, bradymetabolic psilothermy, "potential homeothermy» of modern reptiles), or from inside by endogenous thermogenesis (mesometabolic and tachymetabolic psilothermy). That is, they are different degrees of manifestation of endothermy in many extinct groups of reptiles – archosauromorphs, archosaurs, dinosaurs, advanced theriodonts, as well as in birds and mammals). An alternative to psilothermy and the initial condition is hamilothermy, a type of thermobiological status in which animals do not show a psilothermic reaction, resulting in a body temperature that differs little from ambient temperatures, most often below 28–30°. These are fish and amphibians. The mechanism of psilothermy described by us is the most important, basic, fundamental property of higher vertebrates.

Received on: 02 March 2025 **Published on:**13 May 2025

References

Arrhenius S. A. Über die Dissociationswärme und den Einfluß der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte, Z. Phys. Chem. 1889. Vol. 4, issue 1. S. 96–116.
Bergmann C. Uber die Verhältnisse der Wärmeökonomie der Tiere zu ihrer Größe. Göttingen, 1848. 117 S.
Bligh J., Johnson K. G. Glossary of terms for thermal physiology, J. Appl. Physiol. 1973. Vol. 35, No 6. R. 941–961.
Cowles R. B. Semantics in biothermal studies, Science. 1962. No 135. P. 670.
Glossary of terms for thermal physiology. Third Edition revised by The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (IUPS Thermal Commission), Journal of Thermal Biology. 2003. No 28. R. 75–106.
Jacobaeus O. De ranis et lacertis observations. Hafniae: Johannis M. Lieben., 1686. 174 p.
Legendre L. J., Davesne D. The evolution of mechanisms involved in vertebrate endothermy, Phil. Trans. R. Soc. B. 2020. Vol. 375 (1793). P. e20190136.
Martine G. Essays medical and philosophical. Milla: London, 1740. 392 p.
Pearson O., Brandford D. F. Thermoregulation of lizards and toad at high altitudes in Peru, Copeia. 1976. No. 1. P. 155–170.
Réaumur R. Mémoirs pour servir à l'Histoire des Insectes. Tome 2. Paris: d'Imprimerie Royal., 1736. 514 p.
Senanayake U. I., Siriwardana S., Weerakoon D. K., Wijesinghe M. R. Combating Extreme Tropical Seasonality: Use of Rock Crevices by the Critically Endangered Frog Nannophrys marmorata in Sri Lanka, Herpetological Conservation and Biology. 2019. Vol. 14, No 1. P. 261–268.
Soetbeer F. Uber die Körperwärme der poikilothermen Wirbeltiere, Arch. f. exp. Pathol. Bd. 1898. Vol. 40. R. 53–80.
Tigerstedt R. Die Production von Wärme und der Wärmehaushalt (S. 1–104), Handbuch der vergleichenden Physiologie herausg. von Winterstein., 1910. 1060 S.
Van 'T Hoff J. H. Études de dynamique chimique. Amsterdam: F. Muller & Co., 1884. 236 p.
About animal partsPer. s grech. M.: Biomedgiz, 1937. 219 p.
Bahmet'ev P. I. The natural temperature of bees and insects in generalSPb.: Tip. V. Demakova, 1899. 11 p.
Berezov T. T. Korovkin B. F. Biological ChemistryM.: Medicina, 1998. 704 p.
Biochemistry, Red. E. P. Severin. M.: Izd. dom «GEOTAR-MED», 2004. 784 p.
Biological Encyclopedic DictionaryM.: Sovetskaya enciklopediya, 1986. 831 p.

Bogdanov O. P. Ecology of the reptiles of Central AsiaTashkent: Nauka, 1965. 259 p.
Cherlin V. A. Cellarius A. Yu. Dependence of the behavior of the phoorsa, Echis multisquamatus, Cherlin 1981, on temperature conditions in Southern Turkmenistan, Fauna i ekologiya amfibiy i reptiliy palearkticheskoy Azii. L.: Nauka, 1981. P. 96–108 (Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR, t. 101).
Cherlin V. A. Comparison of the plate-tailed (Teratoscincus scincus scincus) and the fringe-toed (Crossobamon eversmanni) geckos, Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tehnicheskie nauki. 2013. T. 18, vyp. 6. P. 3110–3112.
Cherlin V. A. Evolution of thermobiological statuses in vertebrates. Article 2. Development of relations with temperature in vertebrates, Zhurnal obschey biologii. 2021. T. 82, No. 6. P. 459–477.
Cherlin V. A. Reptiles: temperature and ecologySaarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. 442 p.
Cherlin V. A. Stabilization of high body temperature in the evolution of vertebrates, Uspehi sovremennoy biologii. 1990. T. 109, No. 3. P. 440–452.
Cherlin V. A. The relationship between ectothermy and endothermy in the evolution of vertebrates, Zhurnal obschey biologii. 2024. T. 85, No. 3. P. 244–266.
Cherlin V. A. The significance of changes in the intensity of conjugated and non-conjugated mitochondrial respiration in the evolution of vertebrates, Uspehi sovremennoy biologii. 2017. T. 137, No. 5. P. 479–497.
Gavrilov V. M. Ecological, functional, and thermodynamic prerequisites and consequences of homoiothermy on the example of avian energy research, Zhurnal obschey biologii. 2012. T. 73, No. 2. P. 88–113.
Golovanov V. K. Temperature criteria for the vital activity of freshwater fishM.: Poligraf-Plyus, 2013. 300 p.
Korosov A. V. A simple basking model of the common viper (Vipera berus L.), Sovremennaya gerpetologiya. 2008. T. 8, vyp. 2. P. 118–136.
Koshtoyanc H. S. Fundamentals of comparative physiologyT. 1. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1950. 524 p.
Nil'sen K. Physiology of animalsT. 1. M.: Mir, 1982. 414 p.
Rubin A. B. Biophysics of cellular processesKn. 2. M.: Vysshaya shkola, 1987. 303 p.
Ryumin A. V. Temperature sensitivity of vertebrates and the biological path of origin of warm-blooded forms, Sbornik studencheskih nauchnyh rabot MGU. 1939. Vyp. 6. P. 55–84.
Ryumin A. V. The importance of temperature in the ontogenesis and phylogeny of animals, Uspehi sovremennoy biologii. 1940. T. 12, No. 3. P. 504–515.
Slonim A. D. Ecological physiology of animalsM.: Vysshaya shkola, 1971. 448 p.
Slonim A. D. Physiology of thermoregulationL.: Nauka. Leningr. otd-nie, 1984. 378 p.
Strel'nikov I. D. Light as a factor in animal ecology. The first article. The effect of solar radiation on the body temperature of some poikilothermic animals (to the ecology of the animals of the Kara-Kuma desert), Izvestiya Nauchnogo instituta imeni P. F. Lesgafta. 1934. T. 17–18. P. 313–372.
Strel'nikov I. D. The importance of solar radiation and the interaction of physical and geographical factors in the ecology of animals of various landscapes (To the question of the importance of physical geography in animal ecology), Problemy fizicheskoy geografii. 1948. No. 13. P. 145–155.
Strel'nikov I. D. The importance of solar radiation in the ecology of alpine reptiles, Zoologicheskiy zhurnal. 1944. T. 23, No. 5. P. 250–256.
The Great Encyclopedic Dictionary2000 URL: https://bcoreanda.com/ShowTreck.aspx?ID=459 (data obrascheniya: 12.03.2025).
Vernon H. M. The relation of the respiratory exchange of cold-blooded animals to temperature, J. Phisiol. 1897. Vol. 21 P. 443–496.
Vil'son P. V. Respiratory enzymesM.: Inostrannaya literatura, 1952. 416 p.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 502.13:712.23-044.3(571.13)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ ПРИРОДООХРАННЫХ ФУНКЦИЙ ООПТ ГОРОДА ОМСКА

БАЖЕНОВА Ольга Прокопьевна — *ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 644008, Сибирский федеральный округ, Омская область, г. Омск, Институтская площадь, 1, op.bazhenova@omgau.org*

КОСТЕРОВА Валентина Васильевна — *ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 644008, Сибирский федеральный округ, Омская область, г. Омск, Институтская площадь, 1, vv.kosterova@omgau.org*

БЫЧКОВА Валерия Павловна — *ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 644008, Сибирский федеральный округ, Омская область, г. Омск, Институтская площадь, 1, vp.bychkova2303@omgau.org*

Ключевые слова:
устойчивое развитие
особо охраняемые природные территории
природоохранные функции
памятник природы «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе»
природный парк «Птичья гавань»
Омск

Аннотация: Приведена сравнительная характеристика репрезентативности природоохранных функций особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального значения, расположенных на территории г. Омска: памятника природы «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе» и природного парка «Птичья гавань». Определены баллы репрезентативности ООПТ по методике М. С. Стишова (2012), проведен сравнительный анализ полученных данных. Установлено, что репрезентативность природоохранных функций ООПТ «Птичья гавань» выше, чем ООПТ «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе» в силу более развитых резерватной и эколого-стабилизирующей функций. Выявлен потенциал развития экологического туризма в городе Омске на территории указанных ООПТ.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: А. В. Марковский

Получена: 11 апреля 2025 года **Подписана к печати**: 21 июня 2025 года

Введение

Особо охраняемые природные территории (ООПТ) играют ключевую роль в сохранении биоразнообразия, защите уникальных экосистем, редких видов растений и животных, а также развитии научно-познавательного интереса к природе и формировании экологической культуры населения. Создание и развитие сети ООПТ необходимы для обеспечения устойчивого развития региона и сохранения объема природного капитала и экосистемных услуг для будущих поколений (Розенберг, 2016, 2017; Тихонова, 2019; Костерова, Баженова, 2023).

Экосистемные услуги природных объектов России на сегодняшний день изучены не в полной мере. В основном это данные из научных статей и отчетов отдельных исследований (Фоменко, 2021; Цибульникова, Горина, 2019; Чернова, 2022), а общей базы данных по стране не существует.

По данным ООН, с начала XXI в. половина

населения планеты проживает в больших и малых городах, и доля городских жителей в ближайшие годы будет увеличиваться (К середине века..., 2025). Поэтому ООПТ, расположенные в городах или вблизи от них, имеют особое значение для повышения качества жизни населения и формирования высокого уровня экологической культуры.

Во-первых, организованный отдых на природе оказывает положительное влияние на здоровье человека. В современных условиях городская среда часто является загазованной, наполненной шумовыми вибрациями и большим потоком транспорта, загруженной огромным объемом информации. Посещение ООПТ людьми всех возрастов благоприятно влияет на их физическое и эмоциональное состояние.

Во-вторых, городские ООПТ «(вос)соединяют» горожан с местностью, которая их окружает, такие территории часто становятся неотъемлемой частью облика города и его визитной карточкой.

В-третьих, ООПТ, расположенные в черте города, обеспечивают выполнение важных экосистемных услуг: обеспечение чистоты воды, снижение уровня загрязнения воздуха, уменьшение эффекта «городского теплового острова», поддержание устойчивости к изменению климата (Экология большого города, 2024).

Помимо экологической составляющей деятельности городских ООПТ, необходимо отметить и их экономический вклад в зеленую инфраструктуру города и поддержку местной экономики через развитие экотуризма (Экология большого города, 2024).

В контексте реализации Конвенции о биологическом разнообразии (1992) роль городских ООПТ в выполнении целевых задач в области биоразнообразия является весьма важной. Эти территории способствуют реализации одной из 17 глобальных целей ООН: «15. Защита, восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное управление лесами, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процесса деградации земель и прекращение процесса утраты биологического разнообразия» (Неверов, Деревяго, 2005).

Реализуемый в настоящее время в рамках национального проекта «Экология» Федеральный проект «Сохранение биологического разнообразия и развитие экологического туризма» направлен на радикальное изменение воздействия на окружающую среду, переход к модели рационального природопользования и улучшение качества жизни 20 миллионов россиян, живущих в неблагоприятных экологических условиях. Проект стремительно развивается и растет, затрагивая все новые аспекты и реализуя природоохранные функции в качественно новом диапазоне, что тесно связано с деятельностью ООПТ (Экология. Национальный проект, 2025).

На территории г. Омска расположены ООПТ регионального значения, играющие значимую роль не только в охране природы, но и в формировании у населения научно-познавательного интереса к ее изучению: памятник природы «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе» и природный парк «Птичья гавань». Эти ООПТ являются уникальными природными объектами, чья природоохранная деятельность в последние годы активно развивается в направлении экотуризма и просвещения населения.

Цель работы – оценить репрезентативность природоохранных функций ООПТ регионального значения г. Омска.

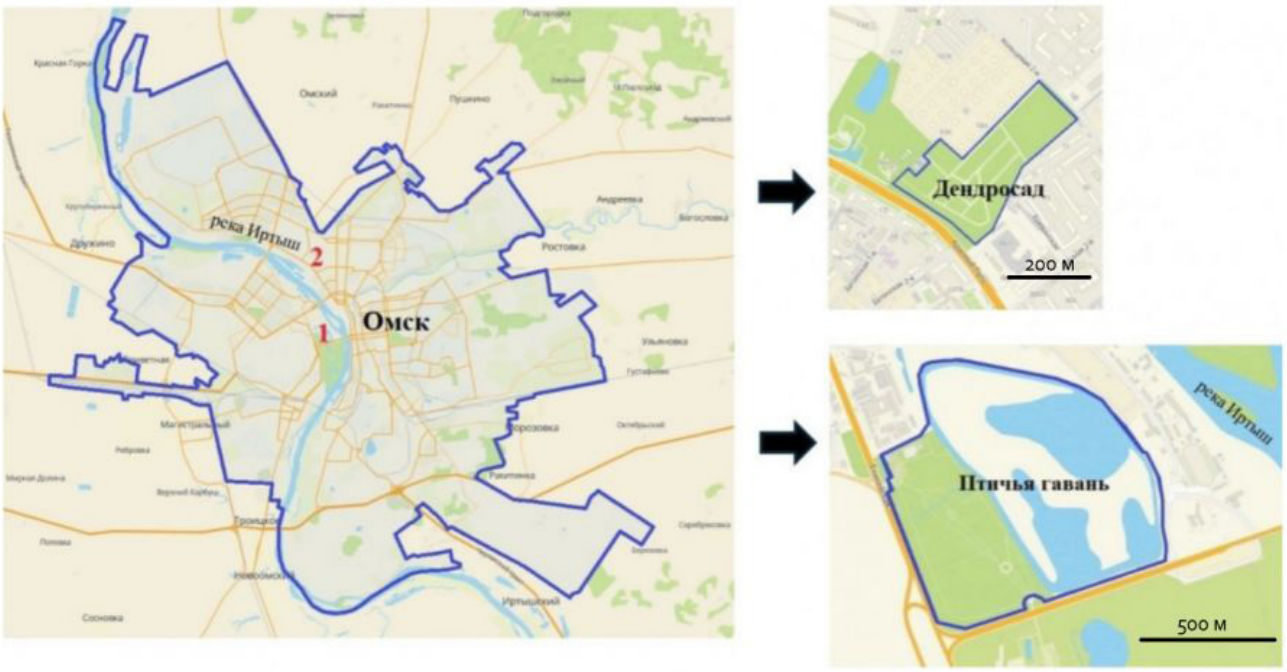
Материалы

Объектом исследований являлась природоохранная деятельность ООПТ регионального значения, расположенных на территории г. Омска: памятник природы «Дендрологический сад имени Г. И. Гензе» (далее – Дендросад) и природный парк «Птичья гавань» (далее – Птичья гавань).

Дендросад расположен в центре г. Омска на правом берегу р. Иртыш и представляет собой уникальный природный объект, способствующий оздоровлению окружающей среды миллионного города. Дендросад имеет огромное историческое и научное значение, он предназначен в том числе для исследования, интродукции и акклиматизации новых видов растений. Сад был заложен в 1948 г. как питомник и экспериментальная база для совхоза «Декоративные культуры». В 2011 г. его территории присвоен статус ООПТ (О памятнике природы..., 2011). Свое название Дендросад получил в 2014 г. в честь ученого-селекционера Герберта Ивановича Гензе, который с 1965 по 1993 г. внес значительный вклад в создание его дендрологической коллекции. Дендросад известен далеко за пределами России, поскольку входит в состав Ассоциации ботанических садов мира (Гоношилов, 2008; Зарипов, 2016).

Южная граница Дендросада проходит вблизи оживленной автодороги ул. Красный

путь, западная граничит с природным рекреационным комплексом «Старозагородный», образованным в 2022 г. (О создании природного..., 2011). С востока и севера сад окружен жилыми домами. Площадь сада составляет 9.4 га, географические координаты – 55°0’39.851» N и 73°20’35.012» E (рисунок).



Карта-схема расположения ООПТ «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе» и «Птичья гавань» на территории г. Омска: 1 – Птичья гавань; 2 – Дендросад

Map-layout of the protected areas "Regional Dendrological Garden named after G. I. Genze" and "Bird Harbor" on the territory of Omsk. Symbols: 1 – Bird Harbor; 2 – Dendrological Garden

Птичья гавань – природный парк, расположенный в центре г. Омска на левом берегу р. Иртыш. Свое название территория получила из-за редкого для городских ООПТ явления: прохождения путей миграции огромного количества самых разных видов птиц. Так, во время осенних и весенних перелетов птиц на его территории останавливается до 3 тысяч особей (Портал Правительства..., 2025).

Парк занимает территорию между аэропортом Омск-Центральный и Ленинградским мостом. С юга, запада и востока его окружают земляные насыпи, являющиеся частью автодорог, на севере находится земляная дамба, являющаяся изолятором между парком и небольшой рекой Замарайка. Площадь парка составляет 112.8 га, географические координаты – 54°58’25.4” N и 73°21’05.74” E (см. рисунок) (Дементьева, 2010; Баженова, Игошкина, 2014).

Методы

Характеристика природоохранных функций и оценка их репрезентативности проведена по методике М. С. Стишова (2012), предусматривающей выделение следующих функций ООПТ: эталонной, рефугиумной, резерватной, «монументальной» и эколого-стабилизирующей. Шкала оценки репрезентативности для отдельных компонентов функций варьируется от 0 до 3 баллов (Стишов, 2012).

Результаты

Дендросад и Птичья гавань выполняют все виды природоохранных функций, присущих ООПТ: эталонную, рефугиумную, резерватную, «монументальную» и эколого-стабилизирующую. Функции имеют различную степень репрезентативности (табл. 1).

Рассмотрим подробнее результаты оценки репрезентативности природоохранных функций Дендросада и Птичьей гавани.

Эталонная функция

Сущность данной функции заключается в сохранении на ООПТ ненарушенных и малонарушенных природных комплексов, характерных для соответствующего природного региона, с присущими им внутренним разнообразием и видовыми композициями. Здесь оценивается видовое и ландшафтное разнообразие, а также наличие чуждых для территории видов, сообществ и экосистем (Стишов, 2012).

Таблица 1. Содержание и репрезентативность природоохранных функций ООПТ «Птичья Гавань» и «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе» (г. Омск)

Природоохранные функции ООПТ	Компоненты природоохранных функций	Оцениваемые составляющие природоохранных функций	Балл репрезентативности (r)	
			Птичья гавань	Дендросад
Эталонная	1. Природное разнообразие	а) видовое богатство	2	3
		б) ландшафтное разнообразие	1	0
	2. Чуждые и синантропные элементы	а) чуждые и синантропные виды	2	3
		б) чуждые сообщества и экосистемы	2	3
	3. Эталонные экосистемы		3	1
	4. Антропогенно нарушенные и трансформированные экосистемы		2	1
Рефугиумная	1. Редкие, исчезающие и эндемичные таксоны		1	1
	2. Редкие, исчезающие и эндемичные сообщества и экосистемы		0	0
Резерватная	1. Охотничье-промысловые виды животных	а) копытные	0	0
		б) крупные хищники	0	0
		в) мелкие и средние хищники	1	1
		г) грызуны и зайцеобразные	1	1
		д) водоплавающие и околоводные птицы	3	1
		е) куриные	0	0
		ж) промысловые виды рыб	0	0
	2. Крупные скопления животных	а) лежбища морских млекопитающих	0	0
		б) скопления копытных во время отела	0	0
		в) колонии морских птиц	0	0
		г) внутриконтинентальные колонии водоплавающих и околоводных птиц	1	0
		д) линные скопления гусеобразных	1	0
		е) миграционные и зимовочные скопления крупных видов птиц	1	0
		ж) крупные нерестилища промысловых видов рыб	0	0
	3. Растения, имеющие утилитарную ценность	а) лекарственные растения	0	1
		б) ценные пищевые растения	0	1
		в) декоративные растения, подвергающиеся активному сбору	0	2
		г) дикие родичи культурных растений	0	1
«Монументальная»	1. Природные объекты, имеющие выдающееся природоохранное или научно-познавательное значение		0	3
	2. Ландшафты, имеющие выдающееся познавательное или эстетическое значение		1	0
Эколого-стабилизирующая	а) смягчение последствий изменения климата и состава атмосферы		0	1
	б) предотвращение эрозии и деградации почв		2	0
	в) защита берегов и предотвращение наводнений		0	0
	г) обеспечение запасов воды и ее качества		2	1
	д) воспроизводство ключевых и хозяйственно ценных видов		2	1

Дендросад. Коллекция растений Дендросада имеет богатый фонд, насчитывающий в настоящее время 141 вид деревьев и кустарников. К ним относятся как редкие для региона древесные породы: *Phellodendron amurense,* Rupr.; *Quercus* L.; *Thuja* L.; Picea pungens aurea; *Juglans mandshurica* Maxim; так и обычные – *Pinus sibirica* Du Tour; *Picea pungens* Engelm.; *Populus nigra* var. *italica* Münchh.; Betula L.; Salix L. и *Fraxinus* L.

Представлены в Дендросаде и различные виды кустарников: *Juniperus* L.; *Jasminum* L.; *Prunusdulcis* (Mill.) D.A.Webb; *Berberis* L.; *Cotoneaster* Medik.; C*orylusmaxima* Mill.; Syringa L.; *Crataegus* Tourn. ex L.; *Philadelphus* L.; *Lonicera* L.; *Prunus* L.; *Sorbus* L.

К цветочным многолетним культурам относятся *Hylotelephium spectabile* (Boreau) H. Ohba; *G. hybridum* Tourn.; *Bergenia* Moench; *Iris* L.; *Hosta* Tratt.; *Heuchera* L.; *Sempervivum* L.; *Veronica chamaedrys* L.; *Alchemílla* L.; *Ligulariadentata* (A. Gray) H. Hara; *Phalarisarundinacea* L.; *Dicentra* Bernh.; *Festuca* L.; *Ajugareptans* L.; *Myosotis* L.; *Hosta* Tratt. Из однолетних культур ежегодно высаживается *Jacobaea maritima* (L.) Pelser et Meijden, а также разные виды *Petunia* Juss., *Aster* L. и *Tagetes* L.

К сожалению, видовое разнообразие растений Дендросада имеет тенденцию к снижению: с 2000 по 2024 г. количество видов сократилось почти вдвое – с 254 до 141. На наш взгляд, такое снижение видового разнообразия флоры можно объяснить главным образом недостаточной обеспеченностью квалифицированными специалистами (дендрологами и озеленителями), непосредственно занимающимися уходом за зелеными насаждениями и поддерживающими оптимальные условия для редких видов. Так как многие виды флоры Дендросада не приспособлены к климатическим условиям Омской области, они требуют особого внимания, дополнительных усилий по сохранению их качества и количества. Это трудоемкий процесс, реализуемый на территории ООПТ преимущественно ручным трудом. Поэтому вопрос кадрового обеспечения требует особого внимания со стороны руководства Дендросада, т. к. он напрямую влияет на сохранение флористического разнообразия – главной и отличительной особенности исследуемого памятника природы.

Животный мир Дендросада менее разнообразен, чем растительный. Здесь обитают обычные для региона виды: *Sciurus vulgaris* L., *Ondatra zibethicus* L.; *Cricetus cricetus* L.; *Lacerta agilis* L. В составе авифауны *Turdus pilaris* L.; *Fringilla coelebs* L.; *Muscicapastriata* Pallas, несколько видов *Parus* L. и *Motacilla* L.

С 2015 г. в пруд на территории Дендросада летом заселяют *Cyprinus carpio haematopterus* Temminck et Schlegel.

Птичья гавань. Видовое разнообразие флоры и фауны Птичьей гавани высокое. На территории парка преобладают искусственные посадки из *Malusbaccata* (L.) Borkh.; *Salix pentandra* L.; *Betula pendula* Roth; *Acer negundo* L.; *Populus nigra* L. (Зарипов, 2003). Также высаживаются виды, обычные для Омской области, такие как *Tilia* L., *Pinus* L., *Betula L.*, *Populus tremula* L., *Picea* A.Dietr.; *Populus pyramidalis* Salisb., *Sorbus aucuparia* L.

Луговая растительность представлена осоковыми, лабазниково-дербенниковыми, клубнекамышово-осоковыми сырыми лугами, а также полынно-пырейными и кострецовыми солонцеватыми лугами (Нефедов, 2008). К числу многолетних травянистых растений относятся *Elytrigia repens* (L.) Nevski; *Carex riparia* Curtis; *Carex atherodes* Sprengel; *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.; *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub; *Phleum pratense* L.; *Lythrum virgatum* L.*; Artemisia glauca* Pall. ex Willd.; *Artemisia dracunculus* L.; *Carex acuta* L.; *Bolboschoenus maritimus* (L.) Pall. (Зарипов, Буданова, 2001; Самойлова, 2003).

На территории Птичьей гавани произрастает *Phragmites australis* (Gav.) Trin. ex Steudel; *Typha angustifolia* L.; *Ceratophyllum demersum* L.; *Potamogeton pectinatus* L. и *Myriophyllum spicatum* L. (Свириденко, 2003).

Несколько видов растений, произрастающих на территории Птичьей гавани, являются редкими и занесены в Красную книгу Омской области: к ним относятся *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soo; *Acorus calamus* L. и *Stipa pennata* L. (Свириденко, 2003).

Разнообразным и богатым можно назвать и животный мир природного парка. Активно развивается зоопланктон местного водоема: кругоресничные инфузории родов *Vorticella* (L.), *Colpoda* (Müller), *Stentor* (Oken) *Paramecium* (Müller), *Epistylis* (Ehrenberg) и *Stylonichia* (Ehrenberg) (Жирнова, 2003; Мельникова и др., 2008; Дементьева, 2010), коловратки родов *Asplanchna* (Gosse), *Epiphanes* (Ehrenberg), *Rotatoria* (Scopoli), *Collotheca* (Harring) и *Macrotrachela* (Milne) (Попова, 2005). Ихтиофауна водоема представлена *Phoxinus* L. и *Carassius* Nilsson. Водная растительность является местом оби-

тания личинок водных насекомых и моллюсков.

Среди множества видов птиц, являющихся главной особенностью парка, можно выделить *Anasplatyrhynchos* L.; *Marecastrepera* L.; *Podicepsauritus* L.; *Chroicocephalus ridibundus* L.; *Larusargentatus* Pontoppidan; *Anasacuta* L.; *Anas* L. и *Podicepsgrisegena* Boddaert. Также в Птичьей гавани обитают *Spatulaclypeata* L.; *Sterna* L.; *Strigiformes* Wagler; *Mustela eversmanii* Lesson; *Mustela erminea* L.; *Circinae* Sundevall и *Podicepscristatus* L.

Рефугиумная функция

Данная функция отражает участие ООПТ в сохранении редких и исчезающих таксонов, сообществ и экосистем (Стишов, 2012).

Из редких и охраняемых растений в коллекции Дендросада представлены 37 видов, в том числе 6 занесенных в Красную книгу Омской области: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn; *Alnus incana* (L.) Moench; *Tilia cordata* Mill.; *Linum perenne* L.; *Ranunculus reptans* L.; *Paeonia anomala* L. (Красная книга..., 2015).

Кроме того, здесь обитают растения, занесенные в Красную книгу Российской Федерации – *Cotoneaster lucidus* Schltdl.; *Hyssopus cretaceus* Dubjan. и *Pseudomuscari coeruleum Losinsk.* (Красная книга..., 2025).

На территории Птичьей гавани обитают 26 видов редких птиц, из них 4 вида – *Phalacrocorax carbo* L.; *Marecafalcata* Georgi; *Oxyuraleucocephala* Scopoli; *Himantopus himantopus* L. – относятся к очень редким. С 2016 г. в парке встречается и один краснокнижный вид птиц – *Cygnus olor* Gmelin (Птичья гавань, 2025).

Резерватная функция

Эта функция отражает роль ООПТ в качестве территории воспроизводства таксонов растений и животных, имеющих хозяйственную ценность, а также сохранения крупных скоплений животных, особо уязвимых в силу образования ими на определенных этапах жизненного цикла подобных скоплений, определяющих состояние их популяций на более или менее обширных территориях (Стишов, 2012).

Главная утилитарная ценность Дендросада заключается в обилии представленных видов растительности, в т. ч. лекарственных, пищевых, декоративных видов и диких сородичей культурных растений. Несмотря на разнообразие редких видов растений в Дендросаде, на оценку репрезентативности этой функции повлияло их незначительное количество.

Отличительной особенностью Птичьей гавани является то, что она расположена на миграционном пути множества перелетных птиц. При этом ценность парка заключается в его способности выступать местом гнездования около 88 видов птиц, которые, получая комфортные условия для существования, остаются на территории парка для вывода потомства. Остальные 67 видов находят в Птичьей гавани временный приют.

«**Монументальная» функция**

Данная функция характеризует наличие на ООПТ особо примечательных природных объектов, которые могут считаться «исключительными природными феноменами», а также «территорий исключительной природной красоты и эстетической ценности» или исключительной научно-познавательной ценности (Стишов, 2012). Из природных объектов Дендросада в этом отношении следует выделить Ель золотистую (ель колючая форма золотистая, *Picea pungens aurea* Gense) (Областной дендрологический..., 2025), которая представляет собой уникальный биологический объект не только в масштабах региона, но и страны, будучи единственной в своем роде, выведенной Г. И. Гензе в процессе селекционных работ.

Дендросад представляет собой уникальное место, где собраны растения из различных климатических зон и частей мира. На его территории можно увидеть как местные растения Сибири, так и экзотические растения из других регионов мира (Областной дендрологический..., 2025).

Благодаря разнообразию растительного мира в Дендросаде можно не только насладиться красотой природы, но и изучить различные виды растений, их особенности и экологию. Кроме того, Дендросад является важным местом для проведения научных исследований и охраны биоразнообразия на территории Омской области. С 2011 г. на его территории проводятся эколого-просветительские экскурсии для школьников, студентов, работников образовательных учреждений, а также жителей и гостей Омска. Такие мероприятия расширяют представления населения о процессах и явлениях, происходящих в живой природе, воспитывают высокий уровень экологической культуры и любовь к природе родного края, улучшают эмоциональное самочувствие населения. В ходе проведения экскурсий посетители знакомятся с растениями дендросада, их биологическими особенностями, практическим значением растений и интересными факта-

ми из истории самого Дендросада (Областной дендрологический..., 2025).

В 2015 г. по Дендросаду проложена экологическая тропа, созданная для более глубокого изучения экологических систем, природных объектов, процессов и явлений. На территории сада расположено «дерево молодоженов», на которое свадебные пары могут прикрепить символ своей семьи.

Птичья гавань является редчайшей природной территорией, сохранившей высокое биологическое разнообразие, несмотря на свое расположение в самом центре города-миллионника. Открытость и доступность парка помогает создать на его территории естественные условия для изучения птиц, проведения научных исследований и экологического мониторинга. Благодаря реконструкции парка и созданию эколого-туристической тропы в 2018 г., ООПТ стал привлекать посетителей возможностью не только насладиться живописным местами, но и узнать много интересного о деревьях, растениях и животных, обитающих в парке. На территории Птичьей гавани также можно принять участие в различных эколого-просветительских мероприятиях (Птичья гавань, 2025).

Эколого-стабилизирующая функция

Содержание данной функции заключается в предоставлении ООПТ различного вида экосистемных услуг, значимых для окружающих ее и/или более удаленных территорий, таких как:

- смягчение последствий изменения климата и состава атмосферы;
- предотвращение эрозии и деградации почв;
- защита берегов и предотвращение наводнений;
- обеспечение запасов воды и ее качества;
- воспроизводство ключевых и хозяйственно ценных видов (Стишов, 2012).

Репрезентативность данной функции на территории Дендросада реализуется главным образом за счет активного воспроизводства ключевых и хозяйственно ценных видов растений. Определенный вклад вносит также обилие древесных пород, активно участвующих в углерододепонировании, что обеспечивает смягчение последствий глобального изменения климата в черте города. По данным наших исследований, проведенным в 2022–2023 гг. в лиственничных и березовых насаждениях на карбоновом полигоне Омского ГАУ, расположенном на территории г. Омска в непосредственной близости от Дендросада, было установлено, что эти породы деревьев обладают выраженной углерододепонирующей функцией и вносят вклад в запасы углерода в зависимости от типа почвы и таксационной специфики насаждения (Шульпина, 2025).

Птичья гавань также выполняет указанные выше компоненты эколого-стабилизирующей функции, но ее репрезентативность оценена выше из-за наличия на ее территории крупного водоема, который выполняет такие важные экосистемные услуги, как обеспечение запасов воды и ее качества, предотвращение эрозии и деградации почв.

Высокая репрезентативность эталонной и эколого-стабилизирующей функций Птичьей гавани обусловила ее более высокую эффективность природоохранной деятельности по сравнению с Дендросадом (табл. 2). Следует отметить, что на высокую репрезентативность данных функций Птичьей гавани существенно повлияло ее естественное происхождение, т. к. в отличие от Дендросада, искуственно созданного для интродукции растений, природный парк располагает более обширной площадью (почти в 10 раз) и водным ландшафтом (около 70 га).

Таблица 2. Оценка репрезентативности природоохранных функций ООПТ «Птичья Гавань» и «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе» (г. Омск)

Природоохранные функции ООПТ	Сумма баллов репрезентативности	
	Птичья гавань	Дендросад
Эталонная	12	11
Рефугиумная	1	1
Резерватная	8	8
«Монументальная»	1	3
Эколого-стабилизирующая	6	3
Итого:	28	26

Следует отметить, что рассматриваемые ООПТ успешно выполняют одну из задач, обусловленную Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 № 33-ФЗ, обеспечение экологического образования и просвещения населения (Об особо охраняемых..., 1995). Эта задача выполняется главным образом в рамках реализации «монументальной» функции. Птичья гавань и Дендросад являются базой для проведения учебной и практической подготовки студентов омских вузов, подготовки курсовых и выпускных квалификационных работ. Здесь проводятся мероприятия, связанные с интродукцией растений, не типичных для природных условий Омской области, изучением видов лекарственных, декоративных и ядовитых растений и сохранением генофонда природной и культурной флоры. Посещаемость ООПТ ежегодно растет за счет проводимых ими эколого-просветительских мероприятий (Областной дендрологический..., 2025).

Обсуждение

В своей книге М. С. Стишов приводит данные оценки природоохранной эффективности системы ООПТ Республики Алтай, в частности Алтайского государственного природного биосферного заповедника, государственного природного заказника «Шавлинский», биологического заказника «Канская степь», памятников природы «Куюмские Родники» и «Пещера Туткушская» (Стишов, 2012). Сравнительная характеристика данных объектов с ООПТ г. Омска была проведена только по баллам репрезентативности (алтайские ООПТ имеют оценки выше, чем омские). В исследовании не представлены группы видов насекомых, грибов, лишайников и мхов, т. к. данная информация полностью отсутствует; для более качественного сравнения объектов необходимо провести дальнейшие исследования. Других примеров по аналогичным исследованиям ООПТ России по методике Стишова авторами найдено не было.

Заключение

Проведенная впервые оценка репрезентативности природоохранных функций региональных ООПТ, расположенных на территории г. Омска (Дендросад и Птичья гавань), показала их достаточно эффективную природоохранную деятельность. Следует отметить как преимущество методики М. С. Стишова (структурированность и комплексность критериев балльной оценки, удобной для сравнения ООПТ, имеющих схожий профиль), так и ее ограничение, выражающееся в возможной субъективности выставления баллов, требующей подключения круга экспертов для достижения объективности.

Функционирование указанных ООПТ вносит значительный вклад в реализацию национального проекта «Экология», Федерального проекта «Сохранение биологического разнообразия и развитие экологического туризма» и Государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» (Об утверждении..., 2014).

Библиография

Баженова О. П., Игошкина И. Ю. Фитопланктон и экологическое состояние водоема природного парка «Птичья гавань» (г. Омск) : Монография. Омск: ООО «Вариант-Омск», 2014. 160 с.

Гоношилов В. Человек, украсивший город // Омская индустрия. 2008. № 6. С. 80–83.

Дементьева Е. В. Ресничные инфузории водоемов города Омска // Зоологические исследования в регионах России и на сопредельных территориях: Материалы междунар. науч. конф. / Редкол.: А. Б. Ручин (отв. ред.) . Саранск: Типография «Прогресс», 2010. С. 9–11.

Жирнова Е. В. Фауна и биолого-экологические особенности кругоресничных инфузорий водоемов Омской области : Автореф. дис. … канд. биол. наук. Омск, 2003. 15 с.

Зарипов Р. Г. Древесные виды природного парка «Птичья гавань» как объекты экологической и пейзажной ценности // Изучение экосистемы природного парка «Птичья гавань»: Сб. науч. ст. / Омск. гос. пед. ун-т. Омск, 2003. С. 81–93.

Зарипов Р. Г. Экскурсии в дендрологическом саду г. Омска как средство экологического воспитания // Наука о человеке. 2016. № 7. С. 124–128.

Зарипов Р. Г., Буданова М. Г. К вопросу о состоянии растительности левобережья Иртыша г. Омска // Природа, природопользование и природообустройство Омского Прииртышья: Материалы III обл. науч.-практ. конф. Омск, 2001. С. 186–188.

К середине века 68 процентов населения планеты будет жить в городах. Официальный портал Организации Объединенных Наций . URL: https://www.un.org/ru/desa/2018-world-urbanization-prospects (дата обращения: 10.04.2025).

Костерова В. В., Баженова О. П. Современное состояние особо охраняемых природных территорий Омской области // География и природные ресурсы. 2023. № 3. С. 42–50. DOI: 10.15372/

GIPR20230305.
Красная книга Омской области / Правительство Омской области, Омский гос. пед. ун-т; Отв. ред.: Г. Н. Сидоров, Н. В. Пликина. 2-е изд., перераб. и доп. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2015. 636 с.
Красная книга Российской Федерации. Растения . URL: https://redbookrf.ru (дата обращения: 10.04.2025).
Мельникова О. Ю., Данильченко Т. С., Кубрина Л. В. Экологическая оценка природного парка на основе химических и органолептических показателей качества воды особо охраняемой территории г. Омска «Птичьей гавани» // Инновационное образование и экономика. 2008. № 2. С. 65–69.
Неверов А. В., Деревяго И. П. Природный капитал в системе устойчивого развития // Белорусский экономический журнал. 2005. № 1. С. 121–132.
Нефедов А. А. Характеристика особо охраняемых природных территорий г. Омска и пригородов // Труды Зоологической Комиссии: Ежегодник. 2008. Вып. 5. С. 138–168.
О памятнике природы регионального значения «Областной дендрологический сад имени Г. И. Гензе» : Постановление Правительства Омской области № 26-п от 16.02.2011. URL: https://omsk-gov.ru/doc/24942 (дата обращения: 10.04.2025).
О создании природного рекреационного комплекса регионального значения «Старозагородный» и внесении изменений в постановление Правительства Омской области от 16 февраля 2011 года № 26-п» : Постановление Правительства Омской области от 15.12.2021 № 609-п (ред. от 15.02.2025). URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/5500202112160009?index=4&rangeSize=1 (дата обращения: 05.05.2025).
Об особо охраняемых природных территориях : Федеральный закон от 14 марта 1995 г. № 33-ФЗ (с изменениями и дополнениями). URL: https://base.garant.ru/10107990 (дата обращения: 10.04.2025).
Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» : Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 326 (ред. от 25.11.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2024). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162183 (дата обращения 05.05.2024).
Областной дендрологический сад . URL: https://yandex.ru/profile/141150844382?no-distribution=1&source=wizbiz_new_map_single (дата обращения: 03.04.2025).
Попова Р. В. Видовое разнообразие коловраток охраняемой природной территории «Птичья гавань» // Естественные науки и экология: Ежегодник: Межвуз. сб. науч. тр. / Ом. гос. пед. ун-т. Омск, 2005. Вып. 9. С. 118–120.
Портал Правительства Омской области . URL: https://mpr.omskportal.ru/oiv/mpr/etc/Oopt (дата обращения: 10.04.2025).
Птичья гавань. Природный парк. Портал Правительства Омской области . URL: https://omskportal.ru/oiv/mpr/otrasl/ekspertiza/ohrana/PG.html?ysclid=lpf73ax6eu696800755 (дата обращения: 10.04.2025).
Розенберг А. Г. Истоки современной истории экосистемных услуг // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2017. Т. 26, № 1. С. 5–14.
Розенберг А. Г. К вопросу определения экосистемных услуг и природного капитала // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2016. Т. 25, № 4. С. 195–198.
Самойлова Г. В. Травянистые растения «Птичьей гавани» // Изучение экосистемы природного парка «Птичья Гавань»: Сб. науч. ст. / Под ред. Б. Ю. Кассала; Омск. гос. пед. ун-т. Омск, 2003. С. 58–80.
Свириденко Б. Ф. Современное состояние макрофитной растительности водоемов природного парка «Птичья Гавань» // Изучение экосистемы природного парка «Птичья Гавань»: Сб. науч. ст. / Под ред. Б. Ю. Кассала; Омск. гос. пед. ун-т. Омск, 2003. С. 42–57.
Стишов М. С. Методика оценки природоохранной эффективности особо охраняемых природных территорий и их региональных систем . М.: WWF России, 2012. 284 с.
Тихонова Т. В. Экосистемные услуги: пути практического использования // Проблемы развития территории. 2019. № 1 (99). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekosistemnye-uslugi-puti-prakticheskogo-ispolzovaniya (дата обращения: 05.04.2025).
Фоменко Г. А. Образование для устойчивого развития в постпандемийном мире // Проблемы региональной экологии. 2021. № 4. С. 83–89.
Цибульникова М. Р., Горина Н. В. Учет и оценка природного капитала как инструмент управления природопользованием // Проблемы региональной экологии. 2019. № 1. С. 91–96.
Чернова О. А. Экосистемные услуги водных объектов в обеспечении устойчивого развития региона // Регионология. 2022. Т. 30, № 3. С. 586–601. DOI: 10.15507/2413-1407.120.030.202203.586-601.
Шульпина П. Н., Баженова О. П., Каганов В. В. Особенности депонирования углерода в древостоях лиственницы сибирской в южной лесостепи Омской области // Вопросы лесной науки. 2025.

Т. 8, № 1. С. 79–100.
Экология большого города . URL: https://ecology.expoforum.ru/ru (дата обращения: 20.04.2024).
Экология. Национальный проект . URL: https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/projects/ekologiya (дата обращения: 10.04.2025).

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE REPRESENTATIVENESS OF THE ENVIRONMENTAL FUNCTIONS OF THE PROTECTED AREAS OF THE CITY OF OMSK

BAZHENOVA Olga Prokopyevna
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 644008 Siberian Federal District Omsk Region Omsk Institutskaya Square, 1, op.bazhenova@omgau.org

KOSTEROVA Valentina Vasilevna
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 644008 Siberian Federal District Omsk Region Omsk Institutskaya Square, 1, vv.kosterova@omgau.org

BYCHKOVA Valeria Pavlovna
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 644008 Siberian Federal District Omsk Region Omsk Institutskaya Square, 1, vp.bychkova2303@omgau.org

Keywords:
sustainable development
specially protected natural areas
environmental functions
natural benchmark «Regional Dendrological Garden named after G. I. Genze»
natural park «Bird Harbor»

Summary: The article presents a comparative analysis of the representativeness of environmental functions of specially protected natural areas (SPNA) of regional significance located on the territory of Omsk. They are the natural benchmark «Regional Dendrological Garden named after G.I. Genze» and the natural park «Bird Harbor». The SPNA representativeness scores were determined according to the method of M. S. Stishov (2012), and a comparative analysis of the obtained data was carried out. It was established that the representativeness of the environmental functions of the «Bird's Harbor» protected area was higher than that of the «Regional Dendrological Garden named after G. I. Genze» protected area due to more developed conservation and ecological-stabilizing functions. The potential for the development of ecological tourism in the city of Omsk on the territory of these protected areas was identified.

Reviewer: A. V. Markovsky

Received on: 11 April 2025 **Published on:** 21 June 2025

References

About specially protected natural territories: Federal'nyy zakon ot 14 marta 1995 g. No. 33-FZ (s izmeneniyami i dopolneniyami). URL: https://base.garant.ru/10107990 (data obrascheniya: 10.04.2025).

About the nature benchmark of regional importance «Regional Dendrological Garden named after G. I. Genze»: Postanovlenie Pravitel'stva Omskoy oblasti No. 26-p ot 16.02.2011. URL: https://omsk-gov.ru/doc/24942 (data obrascheniya: 10.04.2025).

Bazhenova O. P. Igoshkina I. Yu. Phytoplankton and ecological condition of the reservoir of the natural park «Bird Harbor» (Omsk): Monografiya. Omsk: OOO «Variant-Omsk», 2014. 160 p.

Bird harbor. Nature Park. portal of the Government of Omsk Region. URL: https://omskportal.ru/oiv/mpr/otrasl/ekspertiza/ohrana/PG.html?ysclid=lpf73ax6eu696800755 (data obrascheniya: 10.04.2025).

By the middle of the century, 68 percent of the world's population will live in cities. The official portal of the United Nations. URL: https://www.un.org/ru/desa/2018-world-urbanization-prospects (data

obrascheniya: 10.04.2025).
Chernova O. A. Ecosystem services of water bodies in ensuring sustainable development of the region, Regionologiya. 2022. T. 30, No. 3. P. 586–601. DOI: 10.15507/2413-1407.120.030.202203.586-601.
Cibul'nikova M. R. Gorina N. V. Accounting and evaluation of natural capital as a tool for environmental management, Problemy regional'noy ekologii. 2019. No. 1. P. 91–96.
Dement'eva E. V. Ciliates of reservoirs of the city of Omsk, Zoologicheskie issledovaniya v regionah Rossii i na sopredel'nyh territoriyah: Materialy mezhdunar. nauch. konf., Redkol.: A. B. Ruchin (otv. red.) . Saransk: Tipografiya «Progress», 2010. P. 9–11.
Ecology of the big city. URL: https://ecology.expoforum.ru/ru (data obrascheniya: 20.04.2024).
Ecology. The national project. URL: https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/projects/ekologiya (data obrascheniya: 10.04.2025).
Fomenko G. A. Education for sustainable development in a post-pandemic world, Problemy regional'noy ekologii. 2021. No. 4. P. 83–89.
Gonoshilov V. The man who decorated the city, Omskaya industriya. 2008. No. 6. P. 80–83.
Kosterova V. V. Bazhenova O. P. The current state of specially protected natural areas of the Omsk region, Geografiya i prirodnye resursy. 2023. No. 3. P. 42–50. DOI: 10.15372/GIPR20230305.
Mel'nikova O. Yu. Danil'chenko T. S. Kubrina L. V. Ecological assessment of a natural park based on chemical and organoleptic indicators of water quality in the specially protected area of Omsk «Bird Harbor», Innovacionnoe obrazovanie i ekonomika. 2008. No. 2. P. 65–69.
Nefedov A. A. Characteristics of specially protected natural areas of Omsk and its suburbs, Trudy Zoologicheskoy Komissii: Ezhegodnik. 2008. Vyp. 5. P. 138–168.
Neverov A. V. Derevyago I. P. Natural capital in the system of sustainable development, Belorusskiy ekonomicheskiy zhurnal. 2005. No. 1. P. 121–132.
Omsk Region Government Portal. URL: https://mpr.omskportal.ru/oiv/mpr/etc/Oopt (data obrascheniya: 10.04.2025).
On the approval of the State program of the Russian Federation «Environmental Protection»: Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15.04.2014 No. 326 (red. ot 25.11.2023) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.01.2024). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162183 (data obrascheniya 05.05.2024).
On the creation of a natural recreation complex of regional significance «Starozagorodny» and amendments to the Decree of the Government of the Omsk region dated February 16, 2011 No. 26-p: Postanovlenie Pravitel'stva Omskoy oblasti ot 15.12.2021 No. 609-p (red. ot 15.02.2025). URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/5500202112160009?index=4&rangeSize=1 (data obrascheniya: 05.05.2025).
Popova R. V. Species diversity of rotifers of the Bird Harbor Protected Natural Area, Estestvennye nauki i ekologiya: Ezhegodnik: Mezhvuz. sb. nauch. tr., Om. gop. ped. un-t. Omsk, 2005. Vyp. 9. P. 118–120.
Regional Arboretum Garden. URL: https://yandex.ru/profile/141150844382?no-distribution=1&source=wizbiz_new_map_single (data obrascheniya: 03.04.2025).
Rozenberg A. G. On the issue of defining ecosystem services and natural capital, Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii. 2016. T. 25, No. 4. P. 195–198.
Rozenberg A. G. The origins of the modern history of ecosystem services, Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii. 2017. T. 26, No. 1. P. 5–14.
Samoylova G. V. Herbaceous plants of Bird Harbor, Izuchenie ekosistemy prirodnogo parka «Ptich'ya Gavan'»: Sb. nauch. st., Pod red. B. Yu. Kassala; Omsk. gop. ped. un-t. Omsk, 2003. P. 58–80.
Shul'pina P. N. Bazhenova O. P. Kaganov V. V. Features of carbon deposition in stands of Siberian larch in the southern forest-steppe of the Omsk region, Voprosy lesnoy nauki. 2025. T. 8, No. 1. P. 79–100.
Stishov M. S. Methodology for assessing the environmental effectiveness of specially protected natural areas and their regional systems. M.: WWF Rossii, 2012. 284 p.
Sviridenko B. F. The current state of macrophytic vegetation in reservoirs of the Bird Harbor Nature Park, Izuchenie ekosistemy prirodnogo parka «Ptich'ya Gavan'»: Sb. nauch. st., Pod red. B. Yu. Kassala; Omsk. gop. ped. un-t. Omsk, 2003. P. 42–57.
The Red Book of the Omsk region, Pravitel'stvo Omskoy oblasti, Omskiy gop. ped. un-t; Otv. red.: G. N. Sidorov, N. V. Plikina. 2-e izd., pererab. i dop. Omsk: Izd-vo OmGPU, 2015. 636 p.
The Red Book of the Russian Federation. Plants. URL: https://redbookrf.ru (data obrascheniya: 10.04.2025).
Tihonova T. V. Ecosystem services: ways of practical use, Problemy razvitiya territorii. 2019. No. 1 (99). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekosistemnye-uslugi-puti-prakticheskogo-ispolzovaniya (data obrascheniya: 05.04.2025).
Zaripov R. G. Budanova M. G. On the issue of the vegetation status of the left bank of the Irtysh river in Omsk, Priroda, prirodopol'zovanie i prirodoobustroystvo Omskogo Priirtysh'ya: Materialy III obl. nauch, prakt. konf. Omsk, 2001. P. 186–188.
Zaripov R. G. Arboreal species of the Bird Harbor Nature Park as objects of ecological and landscape value,

Izuchenie ekosistemy prirodnogo parka «Ptich'ya gavan'»: Sb. nauch. st., Omsk. gop. ped. un-t. Omsk, 2003. P. 81–93.

Zaripov R. G. Excursions in the arboretum garden of Omsk as a means of environmental education, Nauka o cheloveke. 2016. No. 7. P. 124–128.

Zhirnova E. V. Fauna and biological and ecological features of peritrichans ciliates of reservoirs of the Omsk region: Avtoref. dip. … kand. biol. nauk. Omsk, 2003. 15 p.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 639.28.053.7(268.45)

ШРИМСЫ-МЕДВЕЖАТА БАРЕНЦЕВА МОРЯ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

БАКАНЕВ Сергей Викторович

доктор биологических наук, Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО), Россия, 183038, г. Мурманск, ул. Книповича, 6, mombus@gmail.com

Ключевые слова:
шримс-медвежата
Sclerocrangon boreas
Sclerocrangon ferox
Баренцево море
распределение
факторы среды
ансамблевое
моделирование
изменение климата

Аннотация: Исследование посвящено анализу влияния изменения климата на распределение двух видов арктических креветок рода Sclerocrangon (S. boreas и *S. ferox*) в Баренцевом море и сопредельных акваториях. С применением ансамблевого моделирования распределения видов (SDM, species distribution models) оценены экологические предпочтения видов и их реакция на три климатических сценария (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5; Shared Socioeconomic Pathways) к 2100 г. Результаты выявили значимые различия в устойчивости ареалов: *S. boreas*, адаптированный к мелководным зонам с умеренной соленостью, сохраняет до 77 % первоначального ареала даже при экстремальном потеплении (SSP5-8.5), тогда как ареал холодноводного *S. ferox* сокращается на 64 % из-за узкого температурного оптимума (-1–0 °C) и зависимости от высокой солености. Установлено, что усиление атлантификации (интрузия атлантических вод) и сокращение ледового покрова приводят к смещению ареалов в восточные и северо-восточные районы моря.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 07 апреля 2025 года **Подписана к печати**: 03 июня 2025 года

Введение

Креветки рода Sclerocrangon, известные в русскоязычной литературе как шримсы-медвежата, являются десятиногими ракообразными (Decapoda), входящими в состав арктических морских экосистем. Эти виды встречаются в бентосных сообществах, где служат пищевым ресурсом для рыб (например, трески, камбалы) и морских млекопитающих, а также участвуют в регуляции численности некоторых донных беспозвоночных (Кузнецов, 1964; Соколов, 2003; Zimina et al., 2015). Экологическая значимость Sclerocrangon дополнительно подчеркивается чувствительностью их личиночных стадий к температурным колебаниям, что делает их удобным объектом для изучения реакции гидробионтов на изменения среды (Thorson, 1950; Berge et al., 2009).

В Баренцевом море и сопредельных водах распространены два вида шримсов-медвежат: *Sclerocrangon boreas* и *S. ferox* (Кузнецов, 1964). Оба вида относятся к циркумполярным высокобореально-арктическим формам, чье распределение тесно связано с холодными арктическими водными массами (Соколов, 2003; Zimina et al., 2015; Зимина, 2021). Согласно исследованиям Я. М. Веславского (Weslawski, 1987), *S. boreas* и *S. ferox* служат биоиндикаторами атлантических и арктических вод соответственно, что отражает их экологические ниши: *S. boreas* тяготеет к зонам смешения вод с умеренной соленостью (32–34 ‰), тогда как *S. ferox* приурочен к стабильно холодным (-1–2 °C) и высокосоленым (34–35 ‰) акваториям.

Ранее исследования фауны Decapoda Баренцева моря фокусировались на таксономии и общем распределении видов (Кузнецов, 1964; Петряшев, 2002а, б; Соколов, 2003), однако данные о пространственной динамике в контексте климатических изме-

нений остаются ограниченными. Совместные российско-норвежские экосистемные съемки, проводимые с 2004 г., предоставляют такую возможность для анализа современных тенденций и прогностического моделирования (Jørgensen et al., 2015). Цель работы – проанализировать современное распределение шримсов-медвежат (*S. boreas* и *S. ferox*) в Баренцевом море, выявить их экологические предпочтения и оценить их реакцию на атлантификацию региона к концу XXI в.

Для достижения поставленной цели была предпринята попытка статистически связать массив данных по встречаемости креветок рода Sclerocrangon с информационным массивом океанографических и биоклиматических данных для Баренцева моря, полученных как для настоящего периода 2004–2023 гг., так и с помощью сценарных прогнозов на основе глобальных климатических моделей CMIP6 для периода 2025–2100 гг. (Assis et al., 2024). В качестве инструмента исследования был выбран ансамблевый подход моделирования распределения видов SDM (species distribution model), объединяющий несколько алгоритмов, в т. ч. машинного обучения. Ансамблевый подход, объединяющий в данной работе 11 алгоритмов пространственно-временной оценки, минимизирует неопределенности, связанные с выбором единичной модели, и повышает точность прогнозов за счет усреднения результатов. В морских экосистемах, где сбор данных осложнен логистическими и техническими ограничениями, такой подход позволяет эффективно использовать фрагментарные данные съемок, спутникового мониторинга и климатических реконструкций (Siders et al., 2020). Например, связывая температурные градиенты, соленость и продуктивность вод с встречаемостью десятиногих ракообразных, SDM выявляет критические пороговые значения параметров, определяющие границы их экологических ниш (Баканев, 2015; Goulet et al., 2022; Liu et al., 2022; Nephin et al., 2023).

Материалы

Район исследований включал акваторию Баренцева моря и сопредельных вод и был ограничен координатами 5–65° в. д. и 68–82° с. ш., а его площадь составила около 2.8 млн км^2. В качестве текущих и прогнозируемых факторов среды были использованы данные веб-портала Bio-ORACLE, полученные с использованием моделей общей циркуляции атмосферы и океана (Assis et al., 2024). Репозиторий предоставляет 26 слоев физических, химических, биологических и топографических морских данных с глобальным покрытием и равномерной системой координат с пространственным разрешением 0.05 градуса и временным десятилетним шагом с 2000 по 2100 г. 19 основных физических, химических и биологических переменных представлены в виде 6 наборов данных, которые соответствуют сценариям общего социально-экономического пути SSP (Shared Socio-Economic Pathways; Frame et al., 2018) на 2020–2100 гг., выполненных с помощью климатической модели CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6; Eyring et al., 2016).

В работе рассматривается текущее и потенциальное распределение двух видов креветок рода Sclerocrangon в Баренцевом море с учетом трех сценариев изменения климата. Первый сценарий, SSP1-1.9, отражающий «устойчивое развитие» с минимальным антропогенным воздействием (включая переход к низкоуглеродной экономике), характеризуется наименьшим потеплением – средний рост температуры придонных вод в регионе составит +0.46 °C. Однако текущие социально-экономические тренды снижают вероятность реализации данного сценария. Второй, промежуточный сценарий, SSP2-4.5, предполагает умеренные темпы экономического роста без радикальных мер по декарбонизации. При таком развитии глобальное повышение температуры с вероятностью >66 % превысит порог +2 °C к 2100 г. Третий сценарий, SSP5-8.5, соответствует инерционному развитию с интенсивным использованием ископаемого топлива, что приведет к экстремальному потеплению: прогнозируемый рост глобальной температуры к концу столетия достигнет +4.3 °C (±0.7 °C) (Notz, 2020). Данная модель рассматривается как наихудший, но эмпирически значимый сценарий для оценки экологических рисков.

Встречаемость *S. boreas* и *S. ferox* в Баренцевом море и сопредельных водах оценивалась по данным Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО», полученных в ходе комплексных российско-норвежских летних экосистемных съемок в 2004–2023 гг. (рис. 1). Ежегодные экосистемные съемки проводились по стандартной методике в летне-осенний период и охватывали большую часть акватории Баренцева моря на площади в среднем около 1500 тыс. км^2 (Eriksen et al., 2018). Каждая съемка проводилась одновременно 4–5 судами. Сбор материала осуществляли дон-

ным тралом Campelen с горизонтальным раскрытием 15 м, вертикальным – 6 м и вставкой в кутовой части из дели с ячеей 22 мм. Количество донных тралений, выполненных за съемку, варьировало от 311 до 649. Всего было проанализировано 8033 траления, выполненных в 20 рейсах на всей исследованной акватории. Океанографические наблюдения в ходе съемок выполнялись, как правило, с помощью океанографического зонда SBE 19 Plus фирмы SeaBird Electronics. Океанографические условия (температуру и соленость) изучали в толще воды от поверхности до дна. В процессе исследований океанографические станции сопровождали постановку каждой траловой станции.

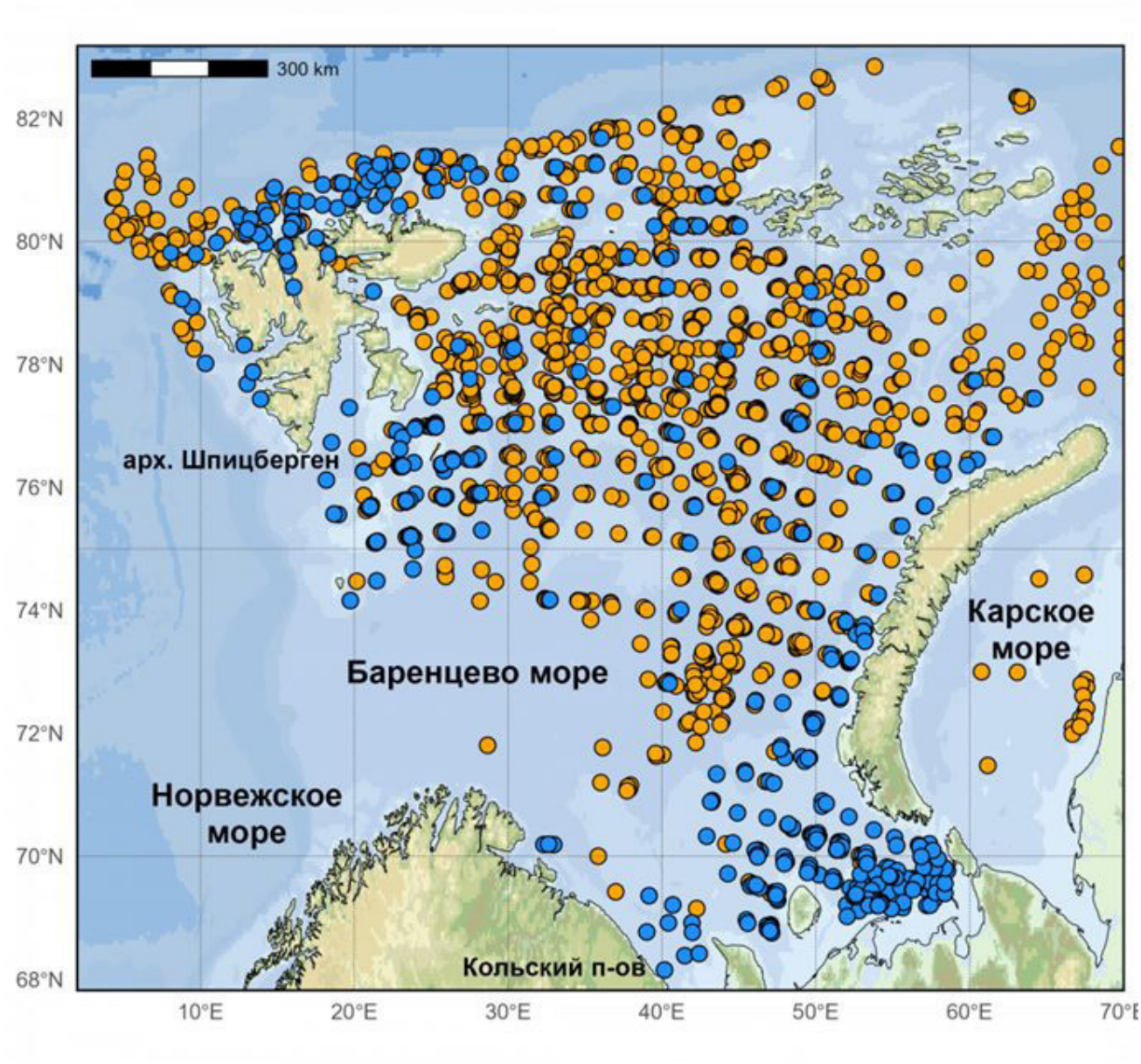


Рис. 1. Места поимок *Sclerocrangon boreas* (синие точки) и *S. ferox* (оранжевые точки) по данным экосистемных съемок в Баренцевом море и прилегающих водах в 2004–2023 гг.

Fig. 1. Capture sites of Sclerocrangon boreas (blue dots) and *S. ferox* (orange dots) according to ecosystem surveys in the Barents Sea and adjacent waters in 2004-2023.

В ходе съемок было идентифицировано 16845 экз. *S. boreas* из 413 тралений и 43567 экз. *S. ferox* из 1718 тралений. Кроме того, в работе использованы данные по встречаемости этих видов, находящиеся в открытом доступе на репозиториях AQUAMAPS (https://www.aquamaps.org/) и норвежского банка данных о биоразнообразии (https://artskart.artsdatabanken.no/#map/).

Методы

Предварительный анализ подходящей среды обитания включал оценку доли (%) объясненной дисперсии частоты встречаемости вида параметрами среды с использованием аддитивных обобщенных моделей (GAM) и построением кривых вероятности встречаемости креветок Sclerocrangon в зависимости от факторов среды, как взятых из репозитория Bio-ORACLE, так и полученных на основе собственных измерений температуры, солености и глубины в ходе экосистемных съемок. Кривые вероятности встречаемости шримсов-медвежат в зависимости от наиболее значимых факторов визуализировались с помощью библиотеки R: *visreg* (Breheny, Burchett, 2017). Чтобы при построении моделей избежать эффекта коллинеарности, в расчетах учитывалась коррелированность биоклиматических данных, и в конечных расчетах отбирались несколько базовых переменных с минимальным уровнем фактора инфляции дисперсии (VIF) (Guisan et al., 2017).

Для оценки текущего и потенциального распределения креветок, а также анализа факторов среды, влияющих на это распределение, было использовано ансамблевое моделирование семейства картографических моделей распределения вида (*species distribution model*; SDM), реализованных в библиотеке R: *Biomod2* (Thuiller, 2003). Модели оценивались с использованием 100-кратной перекрестной проверки (*cross-validation*) и случайного разделения данных на обучающие (70 %) и тестовые (30 %) данные для калибровки и тестирования, что позволяло оценить точность модели и эффективность прогнозирования с использованием внутренних и внешних данных (Мастицкий, Шитиков, 2014). Эффективность моделей оценивалась с использованием AUC (area under receiver operating characteristic (ROC) curve; площадь под ROC-кривой) – непараметрического иерархического инструмента, используемого для оценки прогнозной способности модели (Fielding, Bell, 1997). Модели с AUC более 0.7 были включены и объединены в окончательные ансамблевые модели (Hosmer, Lemeshow, 2000). Ансамблевые модели для оценки потенциального распределения креветок оценивались с использованием той же статистики, что и отдельные модели: AUC, TSS (True Skill Statistics или критерий Пирса-Обухова (Киктев и др., 2021; Allouche et al., 2006)), чувствительность (доля правильно идентифицированных истинных положительных результатов) и специфичность (доля правильно определенных истинных отрицательных результатов) (Pearson, 2007).

Функциональные взаимосвязи между предикторами окружающей среды и вероятностью потенциального распределения гидробионтов были дополнительно изучены с использованием анализа важности переменных и графиков влияний факторов. В качестве оценки влияния того или иного фактора на распределение гидробионта использована мера относительной важности каждой переменной, полученная с помощью процедуры пермутации (Fisher, 1935). Суть метода состоит в анализе корреляционной связи между прогнозными значениями двух вариантов модели: с обычным набором независимых переменных и при замещении исследуемой переменной ее рандомизированным аналогом. При этом, чем ниже корреляция, тем выше влияние исследуемой переменной, и наоборот (Mielke, Berry, 2001). Площадь распространения вида рассчитывали на акватории с вероятностью встречаемости вида более 50 % (Иоганзен, Файзова, 1978)

Визуализация и анализ данных производились в среде R с помощью библиотек: *biomod2*, *ggOceanMaps*, *ggplot2*, *ggspatial*, *marmap*, *mgcv*, *sf*, *stars*, *tidyverse*, *tmap*, *rnaturalearth*, *visreg*.

Результаты

Анализ взаимосвязи распределения шримсов-медвежат (*S. boreas* и *S. ferox*) с параметрами среды, выполненный с использованием обобщенных аддитивных моделей (GAM), выявил значимые различия в экологических предпочтениях видов. Для *S. boreas* ключевыми факторами, объясняющими 25.36 % дисперсии, стала глубина, что свидетельствует о его приуроченности к относительно мелководным участкам. Вторым по значимости параметром оказался размах температурного диапазона (19.78 %), отражающий толерантность вида к значительным сезонным термическим колеба-

ниям на мелководьях. Существенный вклад также внесли соленость (18.62 %) и минимальная температура самого холодного месяца (16.51 %), что подтверждает адаптацию *S. boreas* к устойчиво холодным водам с умеренной соленостью, характерным для арктических водных масс (табл. 1).

Таблица 1. Доля (%) объясненной дисперсии, рассчитанная на основе встречаемости *S. boreas* и *S. ferox* в зависимости от параметров среды в Баренцевом море по данным экосистемных съемок 2004–2023 гг.

Факторы / вид	*S. boreas*	*S. ferox*
Фактическая придонная температура, °C	1.02	21.7
Максимальная температура самого теплого месяца, °C	2.91	21.44
Минимальная температура самого холодного месяца, °C	16.51	17.57
Максимальная температура, °C	3.72	20.97
Средняя температура, °C	3.50	18.27
Минимальная температура, °C	3.72	20.97
Размах температурного диапазона, °C	19.78	6.19
Глубина, м	25.36	4.97
Дистанция до берега, км	13.74	14.99
Концентрация кислорода, ммоль/м³	16.85	9.35
Ледовитость, %	14.13	15.33
Концентрация нитратов, ммоль/м³	13.53	14.86
Концентрация фосфатов, ммоль/м³	13.65	7.10
Первичная продукция, ммоль/м³	11.28	14.94
Соленость, ‰	18.618	4.84
pH	15.24	7.19
Коэффициент диффузного ослабления света (Kd, $м^{-1}$)	8.52	22.51

Для *S. ferox* доминирующими факторами стали коэффициент диффузного ослабления света (Kd), связанный с прозрачностью воды и проникновением фотосинтетически активной радиации, и фактическая придонная температура, что указывает на чувствительность вида к термическому режиму. Высокая значимость максимальной температуры самого теплого месяца (21.44 %) и ледовитости (15.33 %) подчеркивает роль летнего прогрева и сезонной динамики льдов в формировании его ареала.

Корреляционный кластер, включающий придонную температуру, ледовитость и концентрацию биогенов, объясняется совместным воздействием адвекции атлантических вод (перенос тепла течениями) и солнечного прогрева. Параметры с низким вкладом (например, дистанция до берега – 13.74 % для *S. boreas*) могут на первый взгляд отражать вторичную роль пространственных факторов по сравнению с гидрохимическими и термическими условиями.

Анализ данных моделирования выявил выраженные различия в экологических предпочтениях *S. boreas* и *S. ferox*. Для *S. ferox* ключевым фактором стала придонная температура: вероятность встречаемости достигает пика (39 %) при температурах от -1 до 0 °C, но резко снижается при прогреве выше 4 °C (рис. 2А). Напротив, *S. boreas* демонстрирует умеренную зависимость от температуры с максимумом встречаемости (9.7 %) при 1.1–1.6 °C, что соответствует зонам смешения арктических и атлантических вод. Батиметрическая приуроченность видов также различается. *S. boreas* тяготеет к мелководным участкам (25–150 м) в радиусе 0–150 км от береговой линии, где вероятность его встречаемости достигает 61 % (рис. 2Б). Для *S. ferox* оптимальны глубины 100–300 м (26 % вероятности), что коррелирует с его распространением в северо-восточной части Баренцева моря.

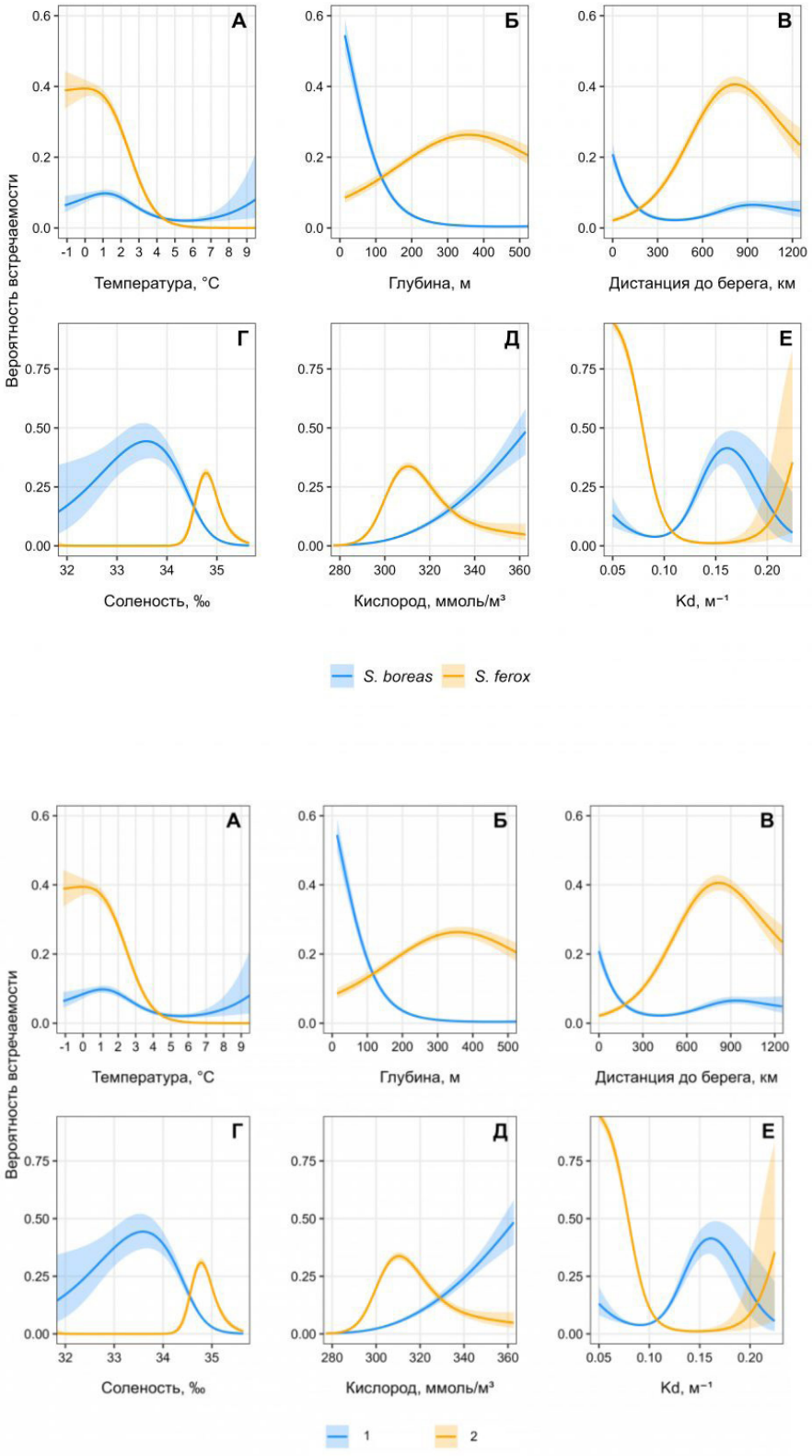


Рис. 2. Кривые вероятности встречаемости *S. boreas* (1) и *S. ferox* (2) в Баренцевом море и прилегающих водах в зависимости от абиотических факторов: А – среднегодовая придонная температура; Б – глубина; В – дистанция до берега; Г – придонная соленость; Д – концентрация растворенного кислорода; Е – коэффициент диффузного ослабления света (Kd) по результатам моделирования GAM

Fig. 2. Probability curves of *S. boreas* (1) *and S. ferox* (2) occurence in the Barents Sea and adjacent waters depending on abiotic factors: A – average annual bottom temperature; Б – depth; B – distance to the shore; Г – bottom salinity; Д – dissolved oxygen concentration; E – diffuse light attenuation coefficient (Kd) based on the results of GAM modeling

Соленость играет критическую роль: *S. ferox* демонстрирует резкий рост встречаемости (до 30 %) при солености 34.6–35.0 ‰ (рис. 3Г), что характерно для атлантических вод. Для *S. boreas* пик вероятности (44 %) наблюдается при умеренной солености (32.5–33.5 ‰), что отражает его связь с опресненными прибрежными зонами. Концентрация кислорода оказывает противоположное влияние. Для *S. ferox* вероятность встречаемости возрастает до 34 % при 309–313 ммоль/м³, что соответствует холодным водам с высоким содержанием кислорода. *S. boreas* достигает максимума (≈45 %) при 355–360 ммоль/м³, что характерно для прогретых мелководных акваторий. Коэффициент диффузного ослабления света (Kd) подчеркивает различия в адаптации к освещенности. Для *S. ferox* прозрачность воды (Kd < 0.1 $м^{-1}$) критична: вероятность встречаемости достигает 95 % (рис. 3Д). *S. boreas*, напротив, тяготеет к мутным водам (Kd > 0.15 $м^{-1}$), где вероятность встречаемости достигает 41 %, что связано с его приуроченностью к эстуарным зонам.

Градиенты биогенов также значимы: *S. ferox* связан с районами высокой концентрации нитратов (8–9 ммоль/м³), характерными для зон апвеллинга. *S. boreas* чаще встречается в водах с повышенным содержанием фосфатов (13.65 %), что типично для прибрежных биотопов. Таким образом, распределение *S. boreas* и *S. ferox* отражает их адаптацию к разным экологическим нишам: первый вид тяготеет к мелководным, умеренно соленым и мутным водам, второй – к глубоководным, холодным и прозрачным акваториям с высокой соленостью.

Прогнозы, основанные на моделировании климатических сценариев, демонстрируют существенные изменения в распределении *S. boreas* и *S. ferox* в Баренцевом море к концу XXI в. (табл. 2). При экстремальном сценарии SSP5-8.5 (повышение придонной температуры до 4.08 °C) площадь обитания *S. boreas* сократится с 0.82 млн км² (29 % акватории Баренцева моря) до 0.63 млн км² (22 %), а для *S. ferox* – с 0.81 млн км² (28 %) до 0.29 млн км² (10 %). Это связано с их чувствительностью к прогреву вод: *S. ferox*, как холодноводный вид, теряет биотопы при температурах выше 3 °C, тогда как *S. boreas* сохраняет части ареала за счет адаптации к смешанным водам.

Таблица 2. Площадь (тыс. км²) и доля (%) акватории потенциального распределения крабов в Баренцевом море и сопредельных водах и ее площадь (млн км²) при текущей оценке и трех вариантах прогноза придонной температуры в 2090–2100 гг.

Сценарии прогноза	Текущая оценка	SSP1-1.9	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Среднемноголетняя придонная температура (медиана),ºС	1.05 (0.55)	1.51 (1.09)	2.63 (2.53)	4.08 (4.25)
Доля (%) акватории потенциального распределения видов в Баренцевом море				
S. boreas	0.82 (29 %)	0.77 (27 %)	0.70 (25 %)	0.63 (22 %)
S. ferox	0.81 (28 %)	0.58 (20 %)	0.41 (14 %)	0.29 (10 %)

Рассмотрим подробнее пространственно-временную динамику популяций шримсов-медвежат в Баренцевом море при сценарии SSP5-8.5 (экстремальное потепление). Динамика ареала шримса-медвежонка *S. boreas* в Баренцевом море демонстрирует два ключевых тренда. Это постепенное сокращение общей площади обитания. К 2100 г. ареал *S. boreas* уменьшится на 23 % – с 0.82 до 0.63 млн км², что связано с прогнозируемым ростом придонной температуры с 1.05 °C (2020–2029 гг.) до 4.08 °C (2090–2100 гг.). Второй тренд – сохранение ключевых биотопов. Несмотря на общее сокращение, зоны с высокой вероятностью встречаемости (>60 %) останутся стабильными как к середине (2050–2060 гг., рис. 3-1Б), так и концу века (рис. 3-1В). Причина устойчивости ареала *S. boreas* заключается в его адаптации к термическим колебаниям от холодных арктических вод (прибрежные воды северной части архипелага Шпицберген и Земли Франца-Иосифа) до прогретых прибрежных акваторий Норвегии. Даже в условиях усиления атлантификации *S. boreas* может сохранить основные места концентрации популяции в мелководных районах, демонстрируя более высокую устойчивость по сравнению с глубоководным *S. ferox*.

Пространственно-временная динамика ареала *S. ferox* в Баренцевом море при сценарии SSP5-8.5 демонстрирует выраженную уязвимость вида к климатическим изменениям. К концу XXI в. прогнозируемое повышение придонной температуры до 4.08 °C приведет к сокращению площади его обита-

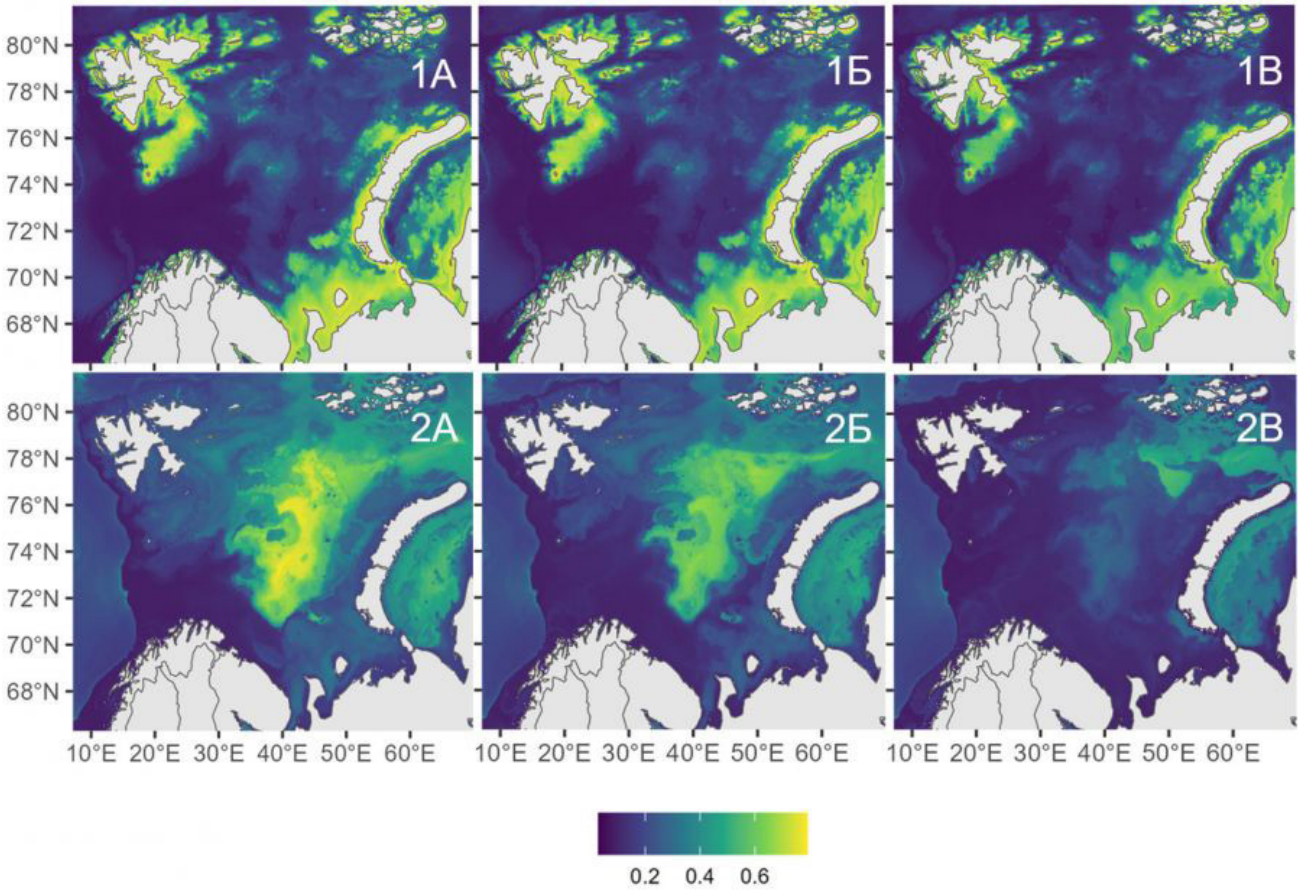


Рис. 3. Прогноз вероятности встречаемости *S. boreas* (1) и *S. ferox* (2) в Баренцевом море и прилегающих водах в 2020–2030 гг. (А), 2050–2060 гг. (Б), 2090–2100 гг. (В), выполненный на основе моделирования распределения видов в рамках социально-экономического сценария SSP5-8.5

Fig. 3.Prediction of the probability of Sclerocrangon boreas (1) and *S. ferox* (2) occurrence in the Barents Sea and adjacent waters in 2020-2030 (A), 2050-2060 (Б), 2090-2100 (B), based on modeling of the distribution of species n the framework of the socio-economic scenario SP5-8.5

ния на 64 % – с 0.81 млн км² (28 % акватории) в 2020–2029 гг. до 0.29 млн км² (10 %) к 2090–2100 гг. В отличие от *S. boreas*, который сохраняет стабильность в мелководных зонах, ареал *S. ferox* смещается в северо-восточные районы моря, где сохраняются холодные арктические воды с температурой ниже 3 °C (рис. 3-2А, Б, В). Основной причиной сокращения является узкий температурный оптимум вида. *S. ferox* достигает пика встречаемости (39 %) при придонных температурах от -1 до 0 °C, но его вероятность резко падает при прогреве выше 4 °C. Это ограничивает распространение вида глубоководными участками (100–300 м) с высокой соленостью (34.6–35.0 ‰), которые постепенно исчезают из-за усиления адвекции атлантических вод. Ключевым фактором риска выступает деградация ледовых биотопов. Сокращение сезонного ледового покрова нарушает условия для размножения и нагула молоди, что может усугубляться конкуренцией с бореальными видами бентоса. Прогнозы показывают, что к 2100 г. зоны с высокой вероятностью встречаемости *S. ferox* (>50 %) сохранятся лишь в северно-восточной части моря, где влияние атлантических вод будет минимально.

Глобальное потепление и связанное с ним сокращение ледового покрова, усиление адвекции атлантических и тихоокеанских вод, а также изменения в солености и продуктивности трансформируют ареалы холодноводных видов по всему арктическому шельфу (Blum, 2024; Lind et al., 2018; Smedsrud et al., 2013). Используя только входные данные по Баренцеву морю, можно оценить индекс пригодности среды обитания на всем арктическом шельфе для баренцевоморских шримсов-медвежат. Прогноз их потенциального распределения был выполнен для текущего периода и на конец XXI в., и для *S. boreas* и *S. ferox* он имеет видовую специфичность, определяемую их экологической пластичностью (рис. 4).

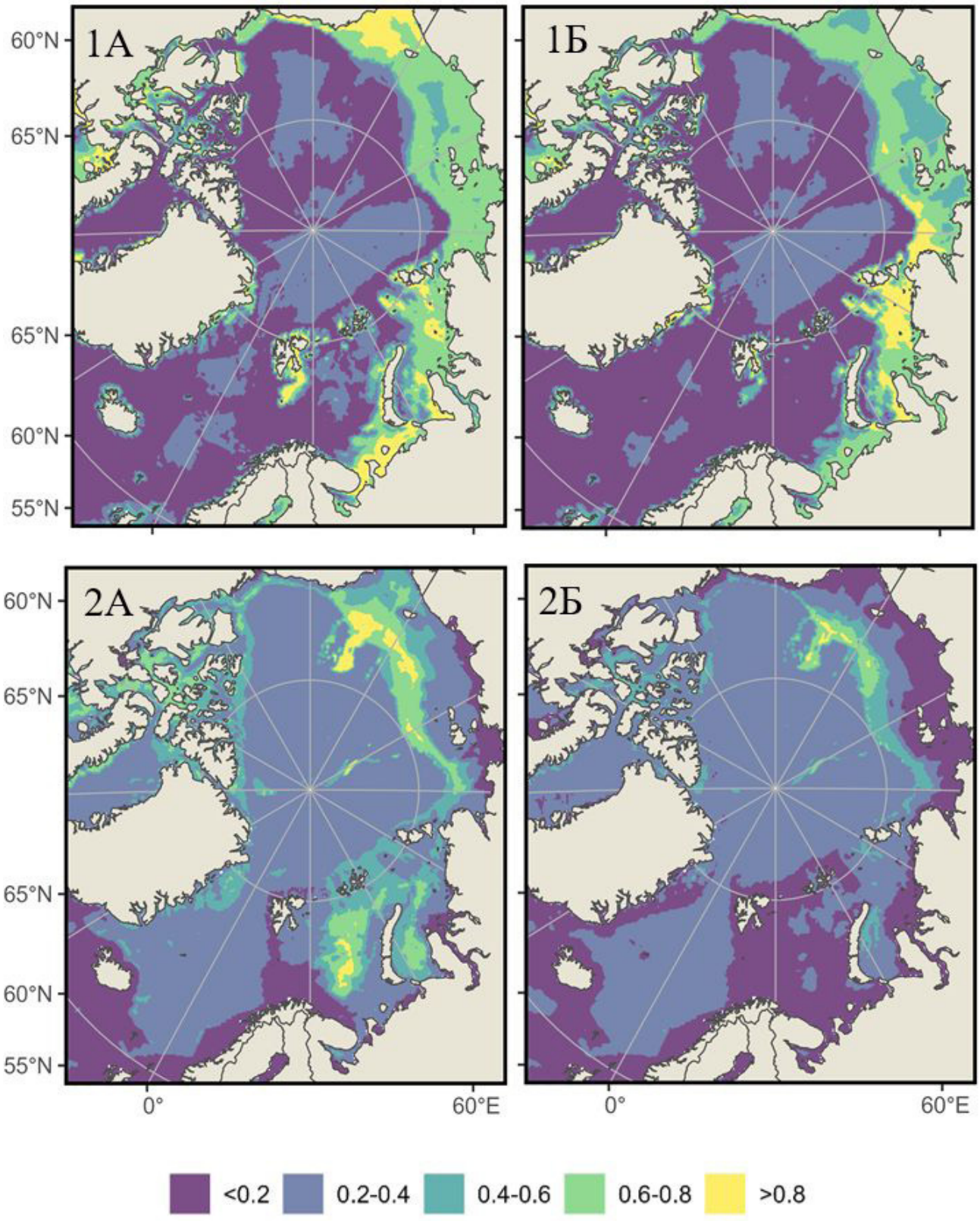


Рис. 4. Прогноз вероятности встречаемости *S. boreas* (1) и *S. ferox* (2) в Северном Ледовитом океане и прилегающих водах в 2020–2030 гг. (А) и 2090–2100 гг. (Б), выполненный на основе моделирования распределения видов в рамках социально-экономического сценария SSP5-8.5

Fig. 4. Prediction of the probability of *Sclerocrangon boreas* (1) and *S. ferox* (2) occurrence in the Arctic Ocean and adjacent waters in 2020-2030 (A) and 2090-2100 (Б), based on modeling of species distribution in the framework of the socio-economic scenario SP5-8.5

S. boreas – высокобореальный, арктический циркумполярный вид, обнаруженный у берегов Гренландии, Исландии, архипелага Шпицберген, вдоль восточного побережья Северной Америки и во всех арктических и дальневосточных морях России (Соколов, 2003; Zimina et al., 2015), что хорошо согласуется с данными моделирования (рис. 4-1A). Увеличение продолжительности безледного периода и прогрев мелководных акваторий могут позволить *S. boreas* колонизировать восточные районы Карского моря и прибрежные зоны моря Лаптевых, где в настоящее время доминируют строго арктические виды (рис. 4-1A). В устьевых зонах крупных рек (Обь, Енисей, Лена) вид может укрепить позиции благодаря устойчивости к низкой солености (до 25 ‰), что подтверждается его присутствием в настоящее время в Печорском море и в южной части Карского моря. Одновременно с увеличением вероятности встречаемости *S. boreas* в арктических зонах уменьшается его вероятность присутствия в высоко бореальных районах, например в Баренцевом и Чукотском морях.

S. ferox сконцентрирован в относительно глубоководных желобах (300–500 м) Баренцева, Карского и Чукотского плато, где сохраняются стабильно низкие температуры (-1.5-2 °C) и высокая соленость (34.5–35 ‰) (рис. 4-2A). Прогрев придонного слоя в Баренцевом и Карском морях может привести к сокращению пригодных биотопов на 50–70 % к 2100 г. На Чукотском плато и проливах Канадского арктического архипелага *S. ferox,* вероятно, найдет рефугиумы благодаря сохраняющемуся ледовому покрову и низким температурам, однако фрагментация ареала может повысить уязвимость популяций.

Заключение

Экологические предпочтения и реакции на климатические изменения двух видов шримсов-медвежат Баренцева моря – *S. boreas* и *S. ferox* – демонстрируют существенные различия. Ансамблевое моделирование распределения видов подтвердило, что *S. boreas*, адаптированный к мелководным зонам с умеренной соленостью и термической пластичностью, может сохранить устойчивость даже в условиях экстремального потепления (сокращение ареала на 23 % при SSP5-8.5). В отличие от него *S. ferox*, связанный с холодными глубоководными биотопами, вероятно, потеряет до 64 % ареала к 2100 г. из-за узкого температурного оптимума (-1–0 °C) и зависимости от высокой солености. Эти тенденции, вероятно, будут отражать глобальные процессы «арктической атлантификации», ведущие к смещению холодноводных видов в рефугиумы северо-восточных акваторий.

Ограничения прогностических расчетов связаны с локальным охватом данных научно-исследовательских съемок, которые не полностью отражают реальное распределение видов. Включение литературных данных из других бореальных и арктических регионов позволило бы уточнить границы их экологических ниш и повысить точность прогнозов изменений ареалов на арктическом шельфе.

Изменения в арктических экосистемах важно отслеживать не только для понимания сокращения ареалов местных видов, но и для наблюдения за появлением новых, ранее нехарактерных для этих вод видов. Потепление и уменьшение ледового покрова создают условия для проникновения в Баренцево море видов из более южных районов. Это может изменить пищевые цепочки и привести к конкуренции между видами. Чтобы прогнозировать такие изменения, полезно использовать модели распределения видов (SDM), которые помогают оценить, где могут появиться новые обитатели и как это повлияет на экосистемы. Регулярный сбор данных и их интеграция с прогнозными моделями позволят лучше подготовиться к последствиям климатических сдвигов.

Библиография

Баканев С. В. Расселение и оценка возможного ареала краба-стригуна (Chionoecetes opilio) в Баренцевом море // Принципы экологии. 2015. Т. 4, № 3. С. 27–39.

Зимина О. Л. Десятиногие ракообразные Карского моря по результатам траловых съемок 2012 и 2016 гг.: фауна и распределение // Труды Зоологического института РАН. 2021. Т. 325, № 3. С. 364–372.

Иоганзен Б. Г., Файзова Л. В. Об определении показателей встречаемости, обилия, биомассы и их соотношения у некоторых гидробионтов // Элементы водных экосистем. М.: Наука, 1978. С. 215–225.

Киктев Д. Б., Муравьев А. В., Бундель А. Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов . М.: Типография АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.

Кузнецов В. В. Биология массовых и наиболее обычных видов ракообразных Баренцева и Белого

моря . М.; Л.: Наука, 1964. 242 с.
Мастицкий С. Э., Шитиков В. К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R . 2014. URL: http://r-analytics.blogspot.com (дата обращения: 12.01.2025).
Петряшев В. В. Фауна ракообразных Leptostraca, Mysidacea, Isopoda и Decapoda (Anomura) Чукотского моря и сопредельных вод: биогеография и история формирования // Биология моря. 2002а. Т. 28, № 3. С. 161–169.
Петряшев В. В. Фауна ракообразных Leptostraca, Mysidacea, Isopoda и Decapoda (Anomura) Чукотского моря и сопредельных вод: условия существования и видовой состав // Биология моря. 2002б. Т. 28, № 2. С. 85–92.
Соколов В. И. Фауна десятиногих ракообразных (Crustacea, Decapoda) Баренцева моря // Труды ВНИРО. 2003. Т. 142. С. 25–76.
Allouche O., Tsoar A., Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS) // Journal of Applied Ecology. 2006. Vol. 43. P. 1223–1232.
Assis J., Fernández Bejarano S. J., Salazar V. W., Schepers L., Gouvêa L., Fragkopoulou E., Leclercq F., Vanhoorne B., Tyberghein L., Serrão E. A., Verbruggen H., De Clerck O. Bio-ORACLE v3.0. Pushing marine data layers to the CMIP6 Earth system models of climate change research // Global Ecology and Biogeography. 2024. DOI: 10.1111/geb.13813
Berge J., Renaud P. E., Eiane K., Gulliksen B., Cottier F. R., Varpe O., Brattegard T. Changes in the decapod fauna of an Arctic fjord during the last 100 years (1908–2007) // Polar Biology. 2009. Vol. 32, No 7. P. 953–961.
Blum H. Atlantification: Facing the Atlantic from the Arctic – a provocation // Atlantic Studies. 2024. Vol. 21 (1). P. 192–194.
Breheny P., Burchett W. Visualization of Regression Models Using visreg // The R Journal. 2017. Vol. 9/2. P. 56–71.
Eriksen E., Gjøsæter H., Prozorkevich D., Shamray E., Dolgov A., Skern-Mauritzen M., Stiansen J. E., Kovalev Yu., Sunnanå K. From single species surveys towards ecosystem monitoring in the Barents Sea // Progress in Oceanography. 2018. Vol. 166. P. 4–14.
Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. P. 1937–1958.
Fielding A. H., Bell J. F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models // Environmental Conservation. 1997. Vol. 24, № 1. P. 38–49.
Fisher R. A. The design of experiments. London: Oliver and Boyd, 1935. 252 p.
Frame B., Lawrence J., Ausseil A. G., Reisinger A., Daigneault A. Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios // Clim. Risk Manage. 2018. Vol. 21. P. 39–51.
Goulet P., Mullowney D., Ratsimandresy A., Kingsbury M., Hamoutene D. Species Distribution Modelling for snow crab (Chionoecetes opilio) potential habitat in Connaigre Bay Newfoundland // Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2022. Vol. 3517. vii + 36 p.
Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. Habitat Suitability and Distribution Models. With Applications in R. Cambridge University Press, 2017. 462 p.
Hosmer D. W., Lemeshow S. Applied logistic regression (2nd ed.). Wiley, 2000. 397 p.
Jørgensen L. L., Lyubin P. A., Skjoldal H. R., Ingvaldsen R. B., Anisimova N. A., Manushin I. E. Distribution of benthic megafauna in the Barents Sea: baseline for an ecosystem approach to management // ICES Journal of Marine Science. 2015. Vol. 72, No 2. P. 595–613.
Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature Climate Change. 2018. Vol. 8. P. 634–639.
Liu X., Han X., Han Z. Effects of climate change on the potential habitat distribution of swimming crab Portunus trituberculatus under the species distribution model // J. Ocean. Limnol. 2022. Vol. 40. P. 1556–1565.
Mielke P. W., Berry K. J. Permutation Methods: A Distance Function Approach. N. Y.: Springer, 2001. 446 p.
Nephin J., Thompson P. L., Anderson S. C et al. Integrating disparate survey data in species distribution models demonstrate the need for robust model evaluation // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2023. Vol. 80 (12). P. 1869–1889.
Notz D. Arctic Sea Ice in CMIP6 // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. 11 p.
Pearson R. G. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners // American Museum of Natural History. Lessons in Conservation. 2007. Vol. 3. P. 54–89.
Siders Z., Ducharme-Barth N., Carvalho F. et al. Ensemble Random Forests as a tool for modeling rare occurrences // Endangered Species Research. 2020. Vol. 43.
Smedsrud L. H., Esau I., Ingvaldsen R. B. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // Reviews of Geophysics. 2013. Vol. 51 (3). P. 415–449.
Thorson G. Reproductive and larval ecology of marine bottom invertebrates // Biological Reviews. 1950. Vol. 25, No 1. P. 1–45.

Thuiller W. BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change // Global Change Biology. 2003. Vol. 9. P. 1353–1362.
Weslawski J. M. Distribution of Decapoda (Crustacea) in South Spitsbergen coastal waters with remarks on their ecology and breeding biology // Polish Polar Research. 1987. Vol. 8 (2). P. 121–134.
Zimina O. L., Lyubin P. A., Jørgensen L. L., Zakharov D. V., Lyubina O. S. Decapod Crustaceans of the Barents Sea and adjacent waters: species composition and peculiarities of distribution // Arthropoda Selecta. 2015. Vol. 24 (4). P. 417–428. DOI: 10.15298/ARTHSEL.24.4.04

Благодарности

Автор выражает благодарность коллегам и сотрудникам ПИНРО (Россия, Мурманск) и БИМИ (Норвегия, Тромсё) за добросовестный сбор материала, ведение и редактирования базы данных. Также автор персонально выражает благодарность руководителю лаборатории гидробиологии ПИНРО И. Е. Манушину за предоставление исходных данных.

SCLEROCRANGON SHRIMPS OF THE BARENTS SEA AND ADJACENT WATERS IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

BAKANEV Sergey Victorovich *PhD, Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO), 6 Knipovich St. Murmansk 183763 Russia, mombus@gmail.com*

Keywords:
Arctic shrimps
Sclerocrangon boreas
Sclerocrangon ferox
Barents Sea
species distribution
environmental factors
ensemble modeling (SDM)
climate change

Summary: This study examines the impact of climate change on the distribution of two species of Arctic shrimp of the genus Sclerocrangon (*S. boreas* and *S. ferox*) in the Barents Sea and adjacent waters (the Kara Sea, the Norwegian Sea). Using ensemble modeling of species distribution (SDM), we assessed the ecological preferences of both species and their responses to three climate scenarios (SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5; Shared Socioeconomic Pathways) by 2100. The results revealed significant differences in habitat stability: *S. boreas*, adapted to shallow water zones with moderate salinity, retains up to 77 % of its original range even under extreme warming (SSP5-8.5), while the cold-water *S. ferox* loses 64% of its habitat due to a narrow temperature optimum (-1–0°C) and dependence on high salinity. It is established that increased Atlanticization (intrusion of Atlantic waters) and a reduction in ice cover lead to a shift of habitats to the eastern and northeastern regions of the sea.

Received on: 07 April 2025 **Published on:** 03 June 2025

References

Allouche O., Tsoar A., Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS), Journal of Applied Ecology. 2006. Vol. 43. P. 1223–1232.

Assis J., Fernández Bejarano S. J., Salazar V. W., Schepers L., Gouvêa L., Fragkopoulou E., Leclercq F., Vanhoorne B., Tyberghein L., Serrão E. A., Verbruggen H., De Clerck O. Bio-ORACLE v3.0. Pushing marine data layers to the CMIP6 Earth system models of climate change research, Global Ecology and Biogeography. 2024. DOI: 10.1111/geb.13813

Bakanev S. V. Distribution and assessment of the possible range of the snow crab (Chionoecetes opilio) in the Barents Sea, Principy ekologii. 2015. T. 4, No. 3. P. 27–39.

Berge J., Renaud P. E., Eiane K., Gulliksen B., Cottier F. R., Varpe O., Brattegard T. Changes in the decapod fauna of an Arctic fjord during the last 100 years (1908–2007), Polar Biology. 2009. Vol. 32, No 7. P. 953–961.

Blum H. Atlantification: Facing the Atlantic from the Arctic – a provocation, Atlantic Studies. 2024. Vol. 21 (1). P. 192–194.

Breheny P., Burchett W. Visualization of Regression Models Using visreg, The R Journal. 2017. Vol. 9/2. P. 56–71.

Eriksen E., Gjøsæter H., Prozorkevich D., Shamray E., Dolgov A., Skern-Mauritzen M., Stiansen J. E., Kovalev Yu., Sunnanå K. From single species surveys towards ecosystem monitoring in the Barents Sea , Progress in Oceanography. 2018. Vol. 166. P. 4–14.

Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. P. 1937–1958.

Fielding A. H., Bell J. F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models, Environmental Conservation. 1997. Vol. 24, No. 1. P. 38–49.

Fisher R. A. The design of experiments. London: Oliver and Boyd, 1935. 252 p.

Frame B., Lawrence J., Ausseil A. G., Reisinger A., Daigneault A. Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios, Clim. Risk Manage. 2018. Vol. 21. P. 39–51.

Goulet P., Mullowney D., Ratsimandresey A., Kingsbury M., Hamoutene D. Species Distribution Modelling for snow crab (Chionoecetes opilio) potential habitat in Connaigre Bay Newfoundland, Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2022. Vol. 3517. vii + 36 p.

Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. Habitat Suitability and Distribution Models. With Applications in R. Cambridge University Press, 2017. 462 p.

Hosmer D. W., Lemeshow S. Applied logistic regression (2nd ed.). Wiley, 2000. 397 p.
Ioganzen B. G. Fayzova L. V. On the determination of the indicators of occurrence, abundance, biomass and their ratio in some hydrobionts, Elementy vodnyh ekosistem. M.: Nauka, 1978. P. 215–225.
Jørgensen L. L., Lyubin P. A., Skjoldal H. R., Ingvaldsen R. B., Anisimova N. A., Manushin I. E. Distribution of benthic megafauna in the Barents Sea: baseline for an ecosystem approach to management, ICES Journal of Marine Science. 2015. Vol. 72, No 2. P. 595–613.
Kiktev D. B. Murav'ev A. V. Bundel' A. Yu. Methodological recommendations for verification of meteorological forecasts. M.: Tipografiya AMA PRESS, 2021. 94 p.
Kuznecov V. V. Biology of the most common and abundant crustacean species of the Barents and White Seas. M.; L.: Nauka, 1964. 242 p.
Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import, Nature Climate Change. 2018. Vol. 8. P. 634–639.
Liu X., Han X., Han Z. Effects of climate change on the potential habitat distribution of swimming crab Portunus trituberculatus under the species distribution model, J. Ocean. Limnol. 2022. Vol. 40. P. 1556–1565.
Mastickiy S. E. Shitikov V. K. Statistical Analysis and Data Visualization with R. 2014. URL: http://r-analytics.blogspot.com (data obrascheniya: 12.01.2025).
Mielke P. W., Berry K. J. Permutation Methods: A Distance Function Approach. N. Y.: Springer, 2001. 446 p.
Nephin J., Thompson P. L., Anderson S. C et al. Integrating disparate survey data in species distribution models demonstrate the need for robust model evaluation, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2023. Vol. 80 (12). P. 1869–1889.
Notz D. Arctic Sea Ice in CMIP6, Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. 11 p.
Pearson R. G. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners, American Museum of Natural History. Lessons in Conservation. 2007. Vol. 3. P. 54–89.
Petryashev V. V. Fauna of crustacean Leptostraca, Mysidacea, Isopoda and Decapoda (Anomura) of the Chukchi Sea and adjacent waters: biogeography and history of formation, Biologiya morya. 2002a. T. 28, No. 3. P. 161–169.
Petryashev V. V. Fauna of crustacean Leptostraca, Mysidacea, Isopoda and Decapoda (Anomura) of the Chukchi Sea and adjacent waters: conditions of existence and species composition, Biologiya morya. 2002b. T. 28, No. 2. P. 85–92.
Siders Z., Ducharme-Barth N., Carvalho F. et al. Ensemble Random Forests as a tool for modeling rare occurrences, Endangered Species Research. 2020. Vol. 43.
Smedsrud L. H., Esau I., Ingvaldsen R. B. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system, Reviews of Geophysics. 2013. Vol. 51 (3). P. 415–449.
Sokolov V. I. Fauna of decapod crustaceans (Crustacea, Decapoda) of the Barents Sea, Trudy VNIRO. 2003. T. 142. P. 25–76.
Thorson G. Reproductive and larval ecology of marine bottom invertebrates, Biological Reviews. 1950. Vol. 25, No 1. P. 1–45.
Thuiller W. BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change, Global Change Biology. 2003. Vol. 9. P. 1353–1362.
Weslawski J. M. Distribution of Decapoda (Crustacea) in South Spitsbergen coastal waters with remarks on their ecology and breeding biology, Polish Polar Research. 1987. Vol. 8 (2). P. 121–134.
Zimina O. L. Decapod crustaceans of the Kara Sea based on the results of trawl surveys in 2012 and 2016: fauna and distribution, Trudy Zoologicheskogo instituta RAN. 2021. T. 325, No. 3. P. 364–372.
Zimina O. L., Lyubin P. A., Jørgensen L. L., Zakharov D. V., Lyubina O. S. Decapod Crustaceans of the Barents Sea and adjacent waters: species composition and peculiarities of distribution, Arthropoda Selecta. 2015. Vol. 24 (4). P. 417–428. DOI: 10.15298/ARTHSEL.24.4.04

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 504.064.36/628.357.1

ОЦЕНКА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТОЧНЫХ ВОД ПОЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

КОВАЛЕВА Ольга Викторовна *кандидат сельскохозяйственных наук, ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, Россия, г. Тюмень, ул. Республики, 7, kovalevaov@gausz.ru*

Ключевые слова:
загрязняющие вещества
сточные воды
поля фильтрации
биологическая очистка
биопленка
микробное загрязнение
патогены

Аннотация: Предприятия по переработке молока, в сточной воде которых содержатся микроорганизмы различной степени патогенности, являются не только постоянным источником загрязнения окружающей среды, но и природными биокатализаторами, способными к запуску биологических процессов очистки сточных вод с любым содержанием органических загрязнителей. Поэтому важной задачей является постоянный контроль в сточных водах основных нормируемых микробиологических показателей для принятия своевременных мер по снижению биоэкологической нагрузки на компоненты окружающей среды. В статье представлены результаты анализа микробиологических показателей сточных вод полей фильтрации. Отмечается наибольшее разнообразие в количественном отношении колифагов, термотолерантных колиформных бактерий, общих колиформных бактерий, патогенных энтеробактерий родов Salmonella и Shigella, общего микробного числа и грибов сточных вод первой карты полей фильтрации, это говорит о том, что чем дольше период нахождения стоков в картах полей фильтрации, тем ниже показатели микробиологического загрязнения. Выявлено существенное влияние температуры воды производственных сточных вод полей фильтрации молокоперерабатывающего предприятия на качественный и количественный состав микроорганизмов: чем ниже температура, тем ниже содержание микроорганизмов. Так, термотолерантные колиформные бактерии в летний период составляли максимальное количество (800 КОЕ/100 мл), что на 38.8 % больше в аналогичной пробе осенью. Наименьшее количество термотолерантных колиформных бактерий было установлено при температуре сточной воды +8˚С в октябре во второй контрольной точке (200 КОЕ/100 мл). Полученные данные сравнения микробиологических показателей сточных вод карт полей фильтрации с гигиеническим нормативом стали основополагающими при принятии решения о выборе и разработке способа доочистки сточных вод предприятия.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 04 Мая 2025 года **Подписана к печати**: 28 Мая 2025 года

Введение

Работа молокоперерабатывающих предприятий сопровождается образованием значительного количества сточных вод, которые содержат множество различных по своей природе загрязняющих веществ, в т. ч. микроорганизмов (Щербаков и др., 2020; Ковалева и др., 2020). При содержании большого количества патогенных микроор-

ганизмов, несмотря на их биокаталитическую активность, возникает риск вспышки инвазионных и инфекционных заболеваний (Kovaleva, Sannikova, 2019; Демидова и др., 2020).

Аммонифицирующие бактерии производят аммиак, который грамположительные бактерии рода Nitrosomonas, принадлежащие к семейству бетапротеобактерий, используют в процессе получения энергии. Их метаболические продукты – нитриты – становятся источником энергии для других грамотрицательных и хемоавтотрофных бактерий, таких как Nitrobacter.

Процессы разложения органических веществ микробиомом в сточных водах сопровождаются образованием сероводорода (H_2S) – токсичного газа, оказывающего негативное воздействие на нервную систему человека и животных. Выделение H_2S стимулирует интенсивный рост нитчатых микроорганизмов, что приводит к увеличению объема активного ила, явлению, известному как «вспухание» ила. Это существенно снижает эффективность процесса седиментации, т. е. самопроизвольного оседания ила, ухудшая качество очищенной воды и затрудняя ее дальнейшую обработку (Оковитая, Суржко, 2018).

На эффективность этого процесса влияют многочисленные факторы, включая температуру, pH, концентрацию питательных веществ и состав микробиоты. Например, дефицит кислорода, часто возникающий в условиях перегрузки очистных сооружений, способствует развитию сульфатредуцирующих бактерий, усиливающих производство H_2S. Зимний период характеризуется снижением самоочищающей способности водоемов из-за низких температур (Ильясов и др., 2017; Рябцева и др., 2019). Холодная вода замедляет метаболические процессы микроорганизмов, что приводит к увеличению времени их выживания и сохранению вирулентности патогенных бактерий, вирусов и простейших. Это увеличивает риск микробного загрязнения водоемов и потенциально опасного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Более того, низкие температуры могут влиять на эффективность работы очистных сооружений, замедляя процессы биологической очистки и снижая эффективность дезинфекции.

В отличие от свободноживущих микроорганизмов, обитающих в водном слое, клетки в биопленке (сложные, многовидовые сообщества микроорганизмов, которые формируются на различных поверхностях) ведут прикрепленный образ жизни, образуя высокоорганизованные структуры с пространственной неоднородностью и функциональным разделением труда. Процесс формирования биопленки начинается с адгезии отдельных клеток к поверхности (Skopina et al., 2023). Эта начальная стадия, инициируемая слабыми Вандерваальсовыми силами, быстро переходит в более прочные связи, опосредованные специфическими молекулярными взаимодействиями, включая лектин-углеводные взаимодействия, взаимодействие белков-адгезинов с рецепторами на поверхности, а также формирование специфичных пилей и фимбрий у бактерий. К первоначальному слою прикрепляются все новые и новые клетки бактерий, архей, грибов, водорослей и простейших, образуя многослойную структуру. Важную роль в создании и стабилизации этой структуры играют внеклеточные полимерные вещества (ВПВ), которые выделяются микроорганизмами. Состав ВПВ может существенно варьировать в зависимости от видового состава биопленки, условий окружающей среды и других факторов. Внутри биопленки существует градиент концентрации кислорода, питательных веществ и других факторов. Микроорганизмы, расположенные на внешней стороне биопленки, имеют доступ к наибольшему количеству кислорода и питательных веществ, поэтому их скорость роста максимальна. В более глубоких слоях, где доступ кислорода ограничен, преобладают анаэробные или микроаэрофильные виды, осуществляющие, например, анаэробное дыхание или брожение. Такое пространственное разделение метаболических процессов создает уникальную экологическую нишу, позволяющую существовать разнообразным видам микроорганизмов, взаимодействующим друг с другом в сложных симбиотических или конкурентных отношениях. Защита от внешних факторов, таких как антибиотики, биоциды, иммунная система хозяина или механическое воздействие, является ключевым преимуществом жизни в биопленке. Многослойная структура ВПВ действует как барьер, препятствующий проникновению многих веществ, и обеспечивает медленно растущим клеткам в глубине биопленки дополнительную защиту. Это объясняет высокую устойчивость биопленок к различным методам дезинфекции и антимикробным агентам. Кроме того, внутри биопленки могут формироваться

«микроколонии» с пониженной метаболической активностью, что способствует выживанию микроорганизмов в неблагоприятных условиях. Отслоение частей биопленки в виде сгустков клеток (так называемый «sloughing») является важным механизмом распространения биопленок. Сгустки могут переноситься потоком жидкости и прикрепляться к новым поверхностям, инициируя формирование новых колоний. Это делает борьбу с биопленками особенно сложной задачей, поскольку достаточно небольшого количества клеток для формирования новой биопленки. Разработке эффективных стратегий по борьбе с биопленками уделяется огромное внимание, т. к. они вызывают коррозию в промышленных системах, биологические загрязнения медицинских устройств и снижают эффективность очистки сточных вод. Изучение структуры, физиологии и генетических механизмов формирования биопленок является ключевым направлением в современной микробиологии.

Поэтому важной задачей является постоянный контроль в сточных водах (Богатырев, Корнилов, 2020; Виноградов и др., 2020; Блюменкранц, Ленченко, 2020; Жемухова, Васенев, 2024) основных микробиологических показателей для снижения биоэкологической нагрузки на компоненты окружающей среды (Guo et al., 2010).

Цель работы – провести анализ качественного и количественного состава микробиологических показателей сточных вод полей фильтрации молокоперерабатывающего предприятия.

Материалы

Объектом исследований являются карты полей фильтрации молокоперерабатывающего предприятия Тюменской области, предназначенные для очистки производственных сточных вод. Общая площадь карт полей фильтрации, согласно Техническому паспорту, составляет 94458 м^2. Исследования проводились в период 2019–2024 гг., пробы отбирались ежегодно в одни и те же месяцы и дни.

Отбор проб сточных вод осуществлялся из двух основных точек полей фильтрации в соответствии с утвержденной программой исследований: 1-я контрольная точка (1 к.т.) – первая карта (место сброса сточных вод с завода) площадью 10038 м^2; 2-я контрольная точка (2 к.т.) – последняя карта площадью 4249.95 м^2. Для анализа выбраны три основные месяца: август, сентябрь, октябрь. Величина изменения температуры окружающего воздуха в эти периоды составляла от +28 ˚С до -15 ˚С. Отбор проводился в соответствии с общими требованиями для поверхностных вод ГОСТ 31861-2012. Всего было отобрано 60 точечных проб, из них составили объединенные пробы объемом 1 литр, которые использовали для выполнения исследований; срок начала исследований составлял 3.5 часа.

Методы

Пробоподготовку и проведение исследований осуществляли с использованием стандартных методик. Микробиологические исследования проводили по следующим показателям: колифаги, термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ), общие колиформные бактерии (ОКБ), патогенные энтеробактерии родов Salmonella и Shigella, общее микробное число (ОМЧ), грибы. Микробиологическую оценку сточных вод и биопленки проводили с учетом методических указаний по организации госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод МУ2.1.5.800-99 и МУК 4.2.2872-11, а также методических рекомендаций по идентификации ветеринарно значимых микроорганизмов.

Все исследования проводили в трехкратной повторности. Математическая обработка полученных результатов осуществлялась с использованием пакетов программ Microsoft Excel 2010, STATISTICA 10 (StatSoft Inc., USA), онлайн-калькулятора (http://genexp.ru/calculatoror.php). Для представления результатов измерения показателя рассчитывалось его среднее значение с указанием ошибки среднего (X ± m).

Результаты

При разработке международных и отечественных нормативов для оценки качества воды заложен основной принцип – осуществление контроля качества воды по индикаторным показателям, гарантирующим отсутствие в воде патогенных микроорганизмов. Согласно п. 1 статьи 44 ВК РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ, использование водных объектов для целей сброса сточных, в т. ч. дренажных, вод осуществляется с соблюдением требований законодательства в области охраны окружающей среды и обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения.

В связи с отсутствием нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганиз-

мов на предприятии, сравнение полученных результатов исследований производили с нормативами СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», согласно которому определяются санитарно-микробиологические и паразитологические показатели безопасности обеззараженных сточных вод, допустимые к сбросу в поверхностные водные объекты: обобщенные колиформные бактерии, термотолерантные колиформные бактерии, Escherichia coli, энтерококки, колифаги, возбудители кишечных инфекций бактериальной и вирусной природы, цисты и ооцисты патогенных простейших, яйца и личинки гельминтов. Общее микробное число данным нормативным документом не нормируется.

Проведенные лабораторные исследования микробиологических показателей сточных вод представлены в табл. 1.

Таблица 1. Средние значения микробиологических показателей сточных вод

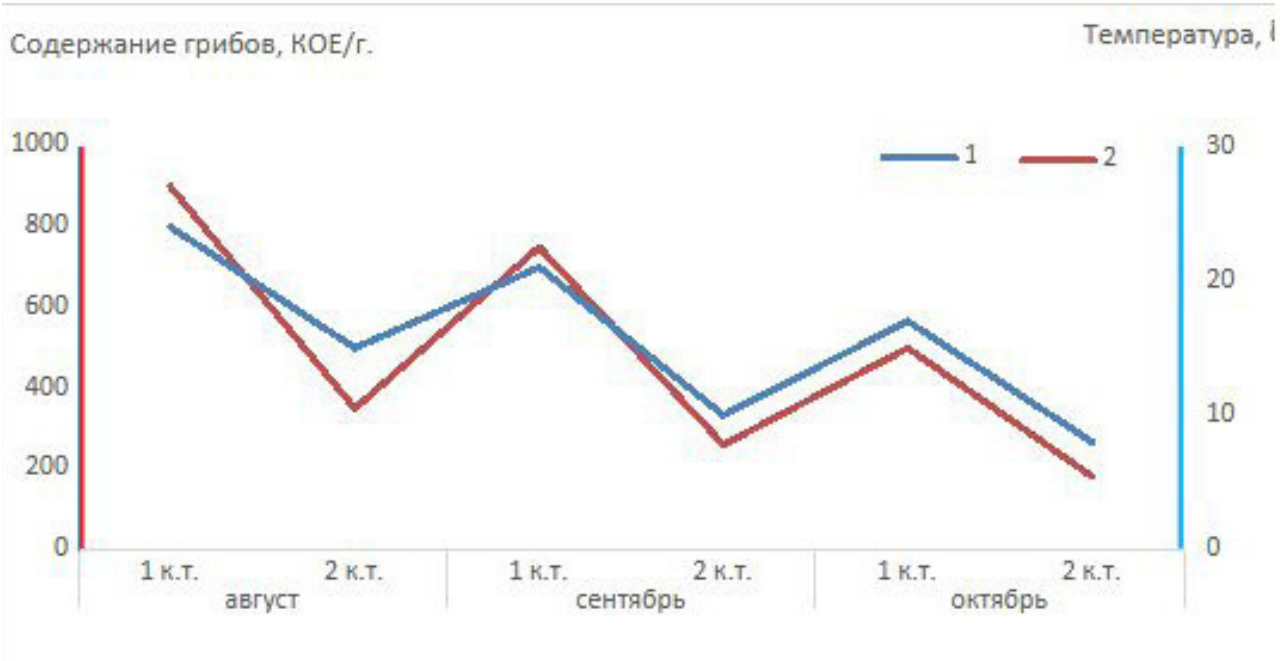
	Вода сточная						СанПиН 1.2.3685-21
	август		сентябрь		октябрь		
Показатель	1 к.т.	2 к.т.	1 к.т.	2 к.т.	1 к.т.	2 к.т	
Колифаги, БОЕ/100 мл	1±0.12	6±0.32	2±0.23	2±0.16	1±0.11	не обнар.	≤ 100
Термотолерантные колиформные бактерии, КОЕ/100 мл	800±35.3	280±24.2	700±26.5	280±11.5	490±23.3	200±9.4	≤ 100
Общие колиформные бактерии, КОЕ/100 мл	1450±98.1	180±12.5	1300±76.8	28 0± 16.5	190±11.2	100±6.5	≤ 500
Общее микробное число (ОМЧ), КОЕ/100 мл	6.7 *10^5	2.4 *10^5	5.7 *10^5	2.7 *10^5	5.7 *10^5	2.0 *10^5	-
Температура воды, ˚С	24±1.1	15±0.5	21±0.8	10±0.3	17±0.5	8±0.06	-

Различия всех приведенных в табл. 1 показателей для образцов сточных вод статистически значимы ($P < 0.05$). Наиболее высоким показателем общего микробного числа характеризуются пробы, отобранные в 1-й карте полей фильтрации в летний период времени, так, разница с октябрем составила 14.9 %, в последней карте – 44.4 % соответственно. Показатели ОМЧ с августа по октябрь по обеим точкам отбора не превысили значение ГОСТа КНД 211.1.2.009–94 «Правила контроля состава и свойств сточных и технологических вод». Термотолерантные колиформные бактерии в данный период составляли максимальное количество 800 КОЕ/100 мл, что на 38.8 % больше в аналогичной пробе октября. Наименьшее количество термотолерантных колиформных бактерий было установлено при температуре сточной воды +8 ˚С в октябре во 2-й контрольной точке, что составило 200 КОЕ/100 мл. По данному показателю наблюдается превышение норматива СанПиН 1.2.3685-21 в 2–4 раза. Общие колиформные бактерии в сточной воде характеризуют уровень фекального загрязнения и степень вероятности присутствия возбудителей бактериальных кишечных инфекций. Так, их содержание во весь период исследований во 2-й к.т. не превышало норматива и находилось в пределах 100–280 КОЕ/100 мл. Патогенных энтеробактерий родов *Salmonella* и *Shigella*, которые представляют особый интерес в плане эпизоотолого-эпидемиологического значения, ни в одной пробе во все периоды не было обнаружено.

Динамика содержания грибов *Aspergillus spp*. в сточной воде представлена на рис. 1.

При исследовании содержания грибов *Aspergillus spp.* в сточной воде было отмечено, что при снижении температуры окружающей среды их количество закономерно снижается. Так, содержание грибов с августа по октябрь в 1-й к.т. снизилось на 45 %, во 2-й к.т. – на 48 %.

Признаки формирования микробной биопленки в сточных водах первой карты полей фильтрации стали визуально заметны на третий день после добавления микробиологических средств в первую карту при работающем аэраторе. Фотоснимок биопленки на поверхности воды в карте полей фильтрации представлен на рис. 2.



Среднее содержание грибов рода Aspergillus spp., КОЕ/г (2) в сточной воде при разной температуре (1)
Fig. 1. The average content of fungi of the genus Aspergillus spp., CFU/g (2) in wastewater at different temperatures (1)

Рис. 2. Образование биопленки, 3-й день (фото, масштаб 1:10)
Fig. 2. Biofilm formation. day 3 (photo, scale 1:10)

На рис. 2 видно, что биопленка имеет форму тонких воздушных пузырьковых скоплений. Высота слоя составляла 0.5 см. В этот период происходило первичное прикрепление микроорганизмов к поверхности из толщи воды, что в дальнейшем облегчает прикрепление последующих клеток, и внеклеточный матрикс может удерживать вместе всю колонию. В лабораторных условиях при рассмотрении под микроскопом нарост выглядел как скопление микробных клеток на поверхности носителя.

Дисперсия планктонных клеток из зрелых биопленок происходит по достижении максимальной зрелости микроколоний (более 72 часов). Так, на седьмой день такие скопления на водной поверхности карт полей фильтрации стали заметны невооруженным глазом, они представляют собой пушистую достаточно плотную серую массу, что уве-

личивало мутность сточных вод. На этой стадии уже образована зрелая биопленка, которая изменяет свой размер и форму (внеклеточный матрикс служит защитой клеток от внешних угроз). Высота слоя биопленки в отдельных местах достигала 5 см и легко собиралась пробоотборником. Фотоснимок биопленки на 7-й день на поверхности воды в карте полей фильтрации представлен на рис. 3.

Рис. 3. Образования биопленки, 7-й день (фото, масштаб 1:10)
Fig. 3. Biofilm formation on the 7th day (photo, scale 1:10)

Визуальные наблюдения за скопившейся на поверхности воды биопленкой показали, что с понижением температуры она расходится к краям обваловки по всему периметру первой карты (частично стекает во вторую карту), уплотняется и оседает. Жировые взвеси, собранные в биопленке, затем становятся частью донных отложений, что усложняет разрушение загрязняющих веществ. Для санитарно-микробиологической оценки обсемененности биопленки проводилось определение общего микробного числа, термотолерантных колиформных бактерий и общих колиформных бактерий (табл. 2).

Таблица 2. Микробиологические показатели биопленки

Показатель	Вода сточная		
	август	сентябрь	октябрь
Термотолерантные колиформные бактерии, КОЕ/100 мл	300 ± 12.36	160 ± 6.56	70 ± 4.56
Общие колиформные бактерии, КОЕ/100 мл	1200 ± 83.24	860 ± 38.95	370 ± 13.24
Общее микробное число (ОМЧ), КОЕ/100 мл	$8.5 * 10^6$	$6.7 * 10^6$	$3.7 * 10^6$

Изучив полученные данные, можно утверждать, что наблюдается тенденция, схожая с показателями сточных вод. С понижением температуры происходит снижение этих показателей: с августа по октябрь содержание термотолерантных колиформных бактерий уменьшилось в 4 раза, общих колиформных бактерий – в 3 раза, а общее число микроорганизмов – в 2.3 раза.

Известно, что сточные воды молокоперерабатывающих предприятий отличаются высоким содержанием белков. При разложении белка под воздействием микроорганизмов происходит аммонификация, т. е. распад аминогрупп с их накоплением в среде аммония или аммиака. Обычно этот процесс достигает своего максимума в теплый период года, что бывает связано с возникновением резкого токсичного запаха.

Обсуждение

Молочные предприятия представляют собой постоянный источник микробного загрязнения окружающей среды. Сточные

воды таких предприятий содержат большое количество микроорганизмов, в т. ч. патогенных бактерий (например, *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Listeria*), вирусов (например, вирусы гепатита А, норовирусы) и паразитов (например, яйца гельминтов). По данным исследований М. А. Полетаевой и др. (2013), состав микрофлоры сточных вод молочных заводов может значительно варьироваться в зависимости от технологического процесса, используемого оборудования и санитарных условий на предприятии. Например, недостаточная пастеризация молока может привести к выбросу в сточные воды большего количества живых патогенов. Несмотря на значимость проблемы, эффективность обеззараживания сточных вод от различных патогенов, включая бактерии, вирусы и яйца гельминтов, недостаточно полно изучена. Существующие данные преимущественно ограничиваются оценкой общего микробного числа и концентрации кишечной палочки (*Escherichia coli*), которая используется в качестве индикатора фекального загрязнения. Однако наличие только *Escherichia coli* не является достаточным показателем безопасности воды, поскольку многие другие патогены могут присутствовать, не будучи обнаруженными стандартными методами анализа. Необходимо проводить комплексные исследования, учитывающие широкий спектр патогенов, используя современные методы молекулярной биологии (например, ПЦР), позволяющие обнаруживать даже малые количества ДНК или РНК патогенных организмов. Только такой подход позволит разработать более эффективные и надежные методы очистки сточных вод и обеспечить безопасность окружающей среды и здоровья населения. Кроме того, необходимо учитывать и влияние различных факторов, таких как тип и концентрация дезинфектантов, время контакта с дезинфектантом, температура и pH воды на эффективность обеззараживания. Разработка интегрированных систем мониторинга и контроля за качеством очистки сточных вод, включающих регулярные анализы на широкий спектр патогенов, является неотъемлемой частью обеспечения экологической безопасности (Касимов и др., 2015; Kovaleva et al., 2021).

Так, согласно исследованиям А. Г. Захаровой (2024), эффективность работы бактерий во многом зависит от параметров окружающей среды. Температура, pH, содержание органических веществ и другие факторы значительно изменяют скорость биохимических реакций. По данным исследований Е. С. Лебедевой и др. (2014), снижение температуры сточных вод снижает скорость микробиологической сульфатредукции – главного источника сероводорода в сточной воде, снижая тем самым мультипликативный коэффициент.

Заключение

Проведенные исследования показали, что наибольшим разнообразием в количественном отношении колифагов, термотолерантных колиформных бактерий, общих колиформных бактерии, патогенных энтеробактерий родов *Salmonella u Shigella*, общего микробного числа и грибов характеризовались показатели сточных вод первой карты полей фильтрации: чем дольше период нахождения стоков в картах полей фильтрации, тем ниже показатели микробиологического загрязнения. Выявлено существенное влияние температуры воды производственных сточных вод полей фильтрации молокоперерабатывающего предприятия на качественный и количественный состав микроорганизмов: чем ниже температура, тем ниже содержание микроорганизмов.

В результате полученные данные сравнения микробиологических показателей сточных вод карт полей фильтрации с гигиеническим нормативом стали основополагающими при принятии решения о выборе и разработке способа доочистки сточных вод предприятия.

Библиография

Блюменкранц Д. А., Ленченко Е. М. Исследование биопленок энтеробактерий при контроле критических точек технологии животноводства и пищевых производств // Health, Food & Biotechnology. 2020. Т. 2, № 3. С. 12–25.

Богатырев К. С., Корнилов А. Г. Экологическое состояние поверхностных водных объектов под воздействием комплексов тепличных хозяйств // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 4 (79). С. 143–150.

Виноградов Д. В., Ильинский А. В., Данчеев Д. В. Экология агроэкосистем . Рязань: ИП Жуков В. Ю., 2020. 256 с.

Демидова С. Е., Балог М. М., Троян В. В. Устойчивое развитие и экологическая безопасность в аспек-

те «зеленой» проблематики // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. 2020. № 5. С. 87–107.

Жемухова О. А., Васенев И. И. Экологические подходы к улучшению качества воды птицеводческого пруда в условиях Кабардино-Балкарской Республики // Проблемы региональной экологии. 2024. № 3. С. 27–31.

Захарова А. Г. Роль микроорганизмов и современный метод очистки сточных вод // Вестник науки. 2024. Т. 1, № 12 (81). С. 1684–1690.

Ильясов О. Р., Неверова О. П., Зуева Г. В., Шаравьев П. В. Санитарно-гигиеническая проблема загрязнения окружающей среды отходами животноводческих и птицеводческих комплексов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2017. Т. 5, № 3. С. 59–65.

Касимов Н. С., Кондратьев А. Д., Кречетов П. П., Королева Т. В., Черницова О. В., Шарапова А. В. Оценка устойчивости компонентов экосистем к техногенному воздействию как основа экологического нормирования // Экологическая безопасность ракетно-космической деятельности. М.: Спутник+, 2015. С. 45–54.

Ковалева О. В., Костомахин Н. М., Лебедько Е. Я. Влияние биопрепаратов на состав осадка сточных вод молокоперерабатывающих предприятий // Аграрная наука. 2020. № 5. С. 98–101.

Лебедева Е. С., Юрченко В. А., Свергузова С. В. Количественная оценка влияния температурного фактора на накопление сероводорода в подсводовом пространстве канализационного коллектора // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 24. С. 141–143.

Оковитая К. О., Суржко О. А. Обеззараживание сточных вод на мясоперерабатывающем предприятии мясного кластера // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 178–182.

Полетаева М. А., Осадчая О. С., Рузаева Н. А. Пути решения проблемы очистки сточных вод молочного предприятия // Ползуновский вестник. 2013. № 1. С. 273–275.

Рябцева С. А., Табакова Ю. А., Анисимов Г. С., Кравцов В. А., Салова О. В. Образование и удаление биопленок в пермеате обезжиренного молока // Молочная промышленность. 2019. № 6. С. 48–50.

Щербаков М. С., Плешакова В. И., Лещева Н. А., Лоренгель Т. И. Микробиологическая оценка сточных вод перерабатывающего цеха промышленной птицефабрики // Вестник КрасГАУ. 2020. № 8 (161). С. 90–95.

Guo H., Luo S., Chen L. et al. Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulaor endophytic bacterium Bacillus sp. L14 // Bioresour. Technol. 2010. Vol. 101, No 22. P. 8599.

Kovaleva O., Sannikova N., Ilyasov O. Content of heavy metals in the bottom sediments of the wastewater of the processing enterprise // E3S Web of Conferences: 22, Voronezh, 08–10 декабря 2020 года. Voronezh, 2021. P. 01009.

Kovaleva O., Sannikova N. Microbiological treatment system of storage ponds // E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09–14 сентября 2019 года. Vol. 135. Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. P. 01007.

Skopina L. Yu., Demin E., Kostomakhin N. M., Kovaleva O. V. Sanitary and microbiological assessment of wastewater when using a biological treatment system // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Practical Conference: Food and Environmental Security in Modern Geopolitical Conditions: Problems and Solutions (EPFS-2023), Kostanay, 21–22 февраля 2023 года. Vol. 1206. IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2023. P. 012040.

EVALUATION OF MICROBIOLOGICAL PARAMETERS OF WASTEWATER FROM FILTRATION FIELDS OF A MILK PROCESSING PLANT

KOVALEVA Olga Viktorovna *Ph.D., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education in the Northern Trans-Urals, Russia, Tyumen, Republic St., 7, kovalevaov@gausz.ru*

Keywords:
pollutants
wastewater
filtration fields
biological treatment
biofilm
microbial
contamination
pathogens

Summary: Milk processing plants are a constant source of environmental pollution, as their wastewater contains microorganisms of varying degrees of pathogenicity. At the same time, they are natural biocatalysts capable of launching biological processes of wastewater treatment with any content of organic pollutants. Therefore, it is an important task to continuously monitor the basic microbiological parameters in wastewater in order to take timely measures to reduce the bioecological burden on environmental components. The article presents the results of the analysis of microbiological parameters of wastewater from filtration fields. There is the greatest quantitative diversity of coliphages, thermotolerant coliform bacteria, common coliform bacteria, pathogenic enterobacteria of the genera Salmonella and Shigella, the total microbial number, and fungi of wastewater of the first filtration field map. It suggests that the longer the period of wastewater in the filtration field maps, the lower the indicators of microbiological contamination. In addition, it was revealed that the water temperature of the industrial wastewater of the filtration fields of a milk processing plant influence significantly the qualitative and quantitative composition of microorganisms: the lower the temperature, the lower the content of microorganisms. Thus, thermotolerant coliform bacteria in the summer period accounted for a maximum amount of 800 CFU/100 ml, which is 38.8% more than in a similar sample in the autumn. The smallest number of thermotolerant coliform bacteria which amounted to 200 CFU/100 ml was found at a wastewater temperature of +8˚C in October at the second control point, As a result, the comparison of the microbiological parameters of wastewater from filtration field maps with the hygienic standard formed the basis for deciding on the choice and development of a method for additional wastewater treatment at the enterprise.

Received on: 04 May 2025 **Published on:** 28 May 2025

References

Blumenkrantz D. A., Lenchenko E. M. Study of enterobacterial biofilms in monitoring critical points of livestock and food production technology, Health, Food & Biotechnology. 2020. Vol. 2, No. 3. P. 12-25.

Blyumenkranc D. A. Lenchenko E. M. Study of biofilms of enterobacteria in monitoring critical points of livestock and food production technology, Health, Food & Biotechnology. 2020. T. 2, No. 3. P. 12–25.

Bogatyrev K. S. Kornilov A. G. Ecological state of surface water bodies under the influence of greenhouse complexes, Geologiya, geografiya i global'naya energiya. 2020. No. 4 (79). P. 143–150.

Bogatyrev K. S., Kornilov A. G. Ecological state of surface water bodies under the influence of greenhouse complexes, Geology, geography and global energy. 2020. No. 4 (79). P. 143-150.

Demidova S. E. Balog M. M. Troyan V. V. Sustainable development and environmental safety in the aspect of «green» issues, ETAP: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika. 2020. No. 5. P. 87–107.

Demidova S.E., Balog M.M., Troyan V.V. Sustainable development and environmental safety in the aspect of «green» issues, STAGE: economic theory, analysis, practice. 2020. No. 5. P. 87-107.

Guo H., Luo S., Chen L. et al. Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulaor endophytic bacterium Bacillus sp. L14, Bioresour. Technol. 2010. Vol. 101, No 22. P. 8599.

Guo H., Luo S., Chen L. et al. Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulaor endophytic bacterium Bacillus sp. L14, Bioresour. Technol. 2010. Vol. 101.No. 22. P. 8599.

Il'yasov O. R. Neverova O. P. Zueva G. V. Sharav'ev P. V. Sanitary and hygienic problem of environmental

pollution with waste from livestock and poultry farms, Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pischevye i biotehnologii. 2017. T. 5, No. 3. P. 59–65.
Ilyasov O.R., Neverova O.P., Zueva G.V., Sharavyev P.V. Sanitary and hygienic problem of environmental pollution by waste from livestock and poultry complexes, Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2017. Vol. 5, No. 3. P. 59-65.
Kasimov N. S. Kondrat'ev A. D. Krechetov P. P. Koroleva T. V. Chernicova O. V. Sharapova A. V. Assessment of the sustainability of ecosystem components to technogenic impacts as a basis for environmental regulation, Ekologicheskaya bezopasnost' raketno-kosmicheskoy deyatel'nosti. M.: Sputnik+, 2015. P. 45–54.
Kasimov N.S., Kondratyev A.D., Krechetov P.P. et al. Assessment of the sustainability of ecosystem components to technogenic impact as a basis for environmental regulation, Environmental safety of rocket and space activities. 2015. P. 45-54.
Kovaleva O. V. Kostomahin N. M. Lebed'ko E. Ya. The influence of biopreparations on the composition of wastewater sludge from milk processing plants, Agrarnaya nauka. 2020. No. 5. P. 98–101.
Kovaleva O. V., Kostomakhin N.M., Lebedko E. Ya. The influence of biopreparations on the composition of wastewater sludge from milk processing enterprises, Agrarian science. 2020. No. 5. P. 98-101.
Kovaleva O., Sannikova N., Ilyasov O. Content of heavy metals in the bottom sediments of the wastewater of the processing enterprise , E3S Web of Conferences: 22, Voronezh, 08–10 dekabrya 2020 goda. Voronezh, 2021. P. 01009.
Kovaleva O., Sannikova N. Microbiological treatment system of storage ponds, E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09–14 sentyabrya 2019 goda. Vol. 135. Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. P. 01007.
Kovaleva O., Sannikova N. Microbiological treatment system of storage ponds, E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, September 09–14, 2019. Vol. 135. – Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. P. 01007.
Kovaleva O., Sannikova N., Ilyasov O. Content of heavy metals in the bottom sediments of the wastewater of the processing enterprise, E3S Web of Conferences: 22, Voronezh, December 08–10, 2020. Voronezh, 2021. P. 01009.
Lebedeva E. S. Yurchenko V. A. Sverguzova S. V. Quantitative assessment of the influence of the temperature factor on the accumulation of hydrogen sulfide in the subsurface of the sewer collector, Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2014. T. 17, No. 24. P. 141–143.
Lebedeva E. S., Yurchenko V. A., Sverguzova S. V. Kolichestvennaya ocenka vliyaniya temperaturnogo faktora na nakoplenie serovodoroda v podsvodovom prostranstve kanalizacionnogo kollektora , Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. T. 17. No. 24. P. 141-143.
Okovitaya K. O. Surzhko O. A. Disinfection of wastewater at a meat processing plant of the meat cluster, Inzhenernyy vestnik Dona. 2018. No. 2 (49). P. 178–182.
Okovitaya K.O., Surzhko O.A. Wastewater disinfection at a meat processing plant of the meat cluster, Engineering Bulletin of the Don. 2018. No. 2 (49). S. 178-182.
Poletaeva M. A. Osadchaya O. S. Ruzaeva N. A. Solutions to the problem of wastewater treatment in a dairy plant, Polzunovskiy vestnik. 2013. No. 1. P. 273–275.
Poletaeva M.A., Osadchaya O.S., Ruzaeva N.A. Ways to solve the problem of wastewater treatment at a dairy enterprise, Polzunovsky Vestnik. 2013. No. 1. P. 273-275.

References

Ryabceva S. A. Tabakova Yu. A. Anisimov G. S. Formation and removal of biofilms in skim milk permeate, Molochnaya promyshlennost'. 2019. No. 6. P. 48–50.
Ryabtseva S.A. Anisimov G.S. et al.Formation and removal of biofilms in skim milk permeate, Dairy industry, 2019. No. 6. P. 48-50.
Scherbakov M. S. Pleshakova V. I. Lescheva N. A. Lorengel' T. I. Microbiological assessment of wastewater from a processing plant of an industrial poultry farm, Vestnik KrasGAU. 2020. No. 8 (161). P. 90–95.
Shcherbakov M.S., Pleshakova V.I., Leshcheva N.A., Lorengel T.I. Microbiological assessment of wastewater from the processing shop of an industrial poultry farm, Bulletin of KrasSAU. 2020. No. 8(161). pp. 90-95.
Skopina L. Yu., Demin E., Kostomakhin N. M., Kovaleva O. V. Sanitary and microbiological assessment of wastewater when using a biological treatment system, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Practical Conference: Food and Environmental Security in Modern Geopolitical Conditions: Problems and Solutions (EPFS-2023), Kostanay, 21–22 fevralya 2023 goda. Vol. 1206. IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2023. P. 012040.
Skopina L.Yu., Demin E., Kostomakhin N.M., Kovaleva O.V. Sanitary and microbiological assessment of wastewater when using a biological treatment system, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Practical Conference: Food and Environmental Security in Modern Geopolitical Conditions: Problems and Solutions (EPFS-2023), Kostanay,

February 21–22, 2023. Vol. 1206. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2023. P. 012040.
Vinogradov D. V. Il'inskiy A. V. Dancheev D. V. Ecology of agroecosystems. Ryazan': IP Zhukov V. Yu., 2020. 256 p.
Vinogradov D. V., Ilyinsky A. V., Dancheev D. V. Ecology of agroecosystems, Ryazan: IP Zhukov V. Yu., 2020. 256 p.
Zaharova A. G. Rol' mikroorganizmov i sovremennyj metod ochistki stochnyh vod , Vestnik nauki. 2024. T. 1. No. 12(81). R. 1684-1690.
Zaharova A. G. The role of microorganisms and the modern method of wastewater treatment, Vestnik nauki. 2024. T. 1, No. 12 (81). P. 1684–1690.
Zhemuhova O. A. Vasenev I. I. Ecological approaches to improving the quality of water in a poultry pond in the Kabardino-Balkarian Republic, Problemy regional'noy ekologii. 2024. No. 3. P. 27–31.
Zhemukhova O.A., Vasenev I.I. Environmental approaches to improving the water quality of a poultry pond in the Kabardino-Balkarian Republic, Problems of regional ecology. 2024. No. 3. P. 27-31.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 631.81

БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И СОДЕРЖАНИЕ СЕЛЕНА В РАСТЕНИЯХ СВЕКЛЫ И МОРКОВИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ БИОФОРТИФИКАЦИИ ЙОДОМ И СЕЛЕНОМ

МАНГУТОВА Анна Константиновна — *ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, annamangutova@gmail.com*

СИНДИРЕВА Анна Владимировна — *доктор биологических наук, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, sindireva72@mail.ru*

КОСОЛАПОВ Радмир Маратович — *ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, stud0000265202@utmn.ru*

Ключевые слова:
селен
биофортификация
свекла Бордо 237
морковь Витаминная 6
дерново-подзолистые почвы
юг Тюменской области

Аннотация: В данном исследовании изучалось влияние биофортификации растений моркови (Daucus carota) и свеклы (Beta vulgaris) с использованием микроэлементов йода и селена, представленных в виде KI и Na_2SeO_3. Биофортификация проводилась двумя методами: фолиарной обработкой (опрыскиванием) с концентрациями 0.005 % и 0.01 %, а также корневым внесением в дозировках 12 и 24 кг/га для селена и 6.5 и 13 кг/га для йода. Дополнительно было изучено сочетанное воздействие данных микроэлементов в концентрациях Na2SeO3 12 кг/га + KI 6.5 кг/га и Na2SeO3 24 кг/га + KI 13 кг/га для корневого внесения, Na2SeO3 0.005 % + KI 0.005 % и Na2SeO3 0.01 % + KI 0.01 % для фолиарного опрыскивания. Результаты эксперимента показали, что основное внесение микроэлементов оказывало стимулирующее влияние на биометрические показатели растений моркови, тогда как у свеклы наблюдалось угнетающее воздействие, особенно при внесении йода. В большинстве вариантов с фолиарной обработкой свеклы также отмечалось снижение биометрических показателей. Изучение накопления селена в растениях (ботве и корнеплодах) выявило ряд специфических закономерностей. У моркови максимальное содержание селена в ботве наблюдалось при фолиарной обработке с концентрацией 0.01 %, где его уровень превышал контрольный в 31.9 раза. Сочетанное внесение селена и йода (Se + I) также способствовало значительному увеличению накопления селена в ботве – в 26 раз по сравнению с контролем. У свеклы наибольшее накопление селена в корнеплодах (в 12.2 раза) и ботве (в 16.2 раза) отмечалось при корневом внесении селена. При фолиарной обработке с использованием комбинации Se + I (концентрация 0.005 %) накопление селена в корнеплодах и ботве увеличивалось в 12.9 и 10 раз соответственно по сравнению с контрольным вариантом. При этом содержание селена в сухой массе растений на контрольном варианте не

превышало у свеклы 0.9 мг/кг, у моркови – 0.5 мг/кг. Полученные результаты демонстрируют различия в эффективности методов биофортификации для различных культур. В отличие от ряда предыдущих исследований, где наблюдалась линейная зависимость между дозировкой микроэлементов и их накоплением в растениях, в данном эксперименте выявлены вариабельные эффекты в зависимости от метода внесения и концентрации микроэлементов. Для оптимизации биофортификации растений йодом и селеном необходимы дальнейшие исследования, направленные на уточнение наиболее эффективных методов и условий применения.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. В. Вапиров

Получена: 01 марта 2025 года **Подписана к печати**: 21 июня 2025 года

Введение

Обогащение сельскохозяйственных культур микроэлементами, такими как селен и йод, является одной из актуальных задач современной агрономии и биологии. Это связано как с необходимостью повышения питательной ценности продуктов питания, так и с решением проблемы дефицита эссенциальных микроэлементов в организме человека. Селен, как известно, поступает в организм исключительно через пищу или биологически активные добавки, а его недостаток может приводить к серьезным последствиям для здоровья, включая снижение иммунитета, повышение риска сердечно-сосудистых заболеваний и даже онкологических процессов (Chen et al., 2023). В этой связи растения играют ключевую роль в цепи передачи селена от почвы к человеку.

Проведенные исследования на различных овощных культурах, таких как морковь (Rakozky-Lelek et al., 2021; Smolen et al., 2016), сельдерей, мангольд, редис и зеленый лук (Baset, 2024), продемонстрировали неоднозначные результаты в отношении эффективности биофортификации. Например, в экспериментах на моркови изучались различные сорта (Smolen et al., 2019), что позволило выявить различия в накоплении селена и йода в корнеплодах в зависимости от генотипа растений. Однако не во всех случаях применение удобрений с селеном и йодом оказывало значительное влияние на урожайность. В частности, иногда наблюдалось снижение урожая корнеплодов при внесении Na2SeO4 и Na2SeO3 (Голубкина и др., 2015), тогда как в другие годы показатели оставались стабильными. Это указывает на необходимость учета не только состава удобрений, но и погодных условий, типа почвы и других факторов.

Исследования на других овощах, таких как сельдерей, мангольд и редис (Baset, 2024), также показали вариативность результатов. Различные методы внесения микроэлементов (корневое внесение, внекорневое опрыскивание) и использование различных соединений селена приводили к различным эффектам на биометрические показатели растений и содержание микроэлементов в съедобных частях. Это подчеркивает сложность процесса биофортификации и необходимость дальнейших исследований для оптимизации технологий.

Особое значение имеет изучение обогащения растений селеном в регионах с низким содержанием этого элемента в почвах. Например, в Тюменской области России отмечается дефицит селена в почвенном покрове (Синдирева и др., 2021). Это требует активного внедрения технологий биофортификации для обеспечения населения региона продуктами с достаточным содержанием селена. Подобный опыт был успешно реализован в Финляндии: начиная с 1985 г. применение удобрений с селеном позволило удвоить его потребление населением (Alfthan, Aro, 2005). Однако важно учитывать региональные особенности почвенно-климатических условий при разработке подобных программ.

Несмотря на значительные успехи в области биофортификации растений селеном и йодом, существует множество нерешенных вопросов, например:

- выбор метода применения микроэлементов (корневой или внекорневой), наиболее эффективного для определенных культур;
- разработка оптимальной доза селена и йода для достижения максимального накопления микроэлементов без ущерба для урожайности и качества культур;
- оценка влияния генотипических особенностей растений на их способность к накоплению селена и йода.

Кроме того, необходимо учитывать экологическую безопасность таких методов. Избыточное внесение микроэлементов может

привести к их накоплению в окружающей среде и негативным последствиям для экосистем.

Результаты проведенных исследований согласуются с данными предыдущих работ (Hossain et al., 2021), подтверждающих эффективность биофортификации для увеличения содержания селена в растениях. Однако данное исследование уточняет влияние различных методов внесения микроэлементов и их комбинаций на конкретные овощные культуры. Таким образом, работа вносит важный вклад в развитие технологий обогащения растений.

В будущем требуется продолжение исследований для оценки долгосрочного влияния биофортификации на урожайность, качество продукции и здоровье потребителей. Важно также разработать регионально адаптированные технологии обогащения растений микроэлементами для обеспечения их максимальной эффективности и экологической безопасности.

Цель работы – оценить влияние различных методов биофортификации йодом и селеном на биометрические показатели растений свеклы и моркови, а также содержание селена в их ботве и корнеплодах.

Материалы

В статье использованы материалы биометрических измерений и химического анализа столовой свеклы Бордо 237 и моркови Витаминной 6, выращенных на дерново-подзолистых почвах юга Тюменской области. Микрополевой опыт проводился на научной базе Тюменского государственного университета «Озеро Кучак» в Нижнетавдинском районе Тюменской области.

Климат Нижнетавдинского района Тюменской области является умеренно-континентальным, с холодной продолжительной зимой и теплым, относительно коротким летом. За вегетационный период средняя температура воздуха составляла 18.1 °C. Минимальное значение – 4 °C (28 августа и 7 сентября). Максимальное значение – 37 °C (3 июня, 11 июля, 12 июля). Среднее значение атмосферного давления, приведенное к среднему уровню моря, составило 758.1 мм рт. ст. Средний показатель относительной влажности – 67 %.

Почва опытного участка – дерново-подзолистая, образована в условиях умеренно-континентального климата при избыточном увлажнении и вымывании питательных веществ. Почва участка слабо-кислая (pH = 5.87), среднесуглинистая. Содержание нитратного азота 10.5 мг/кг, подвижных соединений калия 226 мг/кг, подвижных соединений фосфора >250 мг/кг, сумма поглощенных оснований 15.8 ммоль/100 г, содержание гумуса 3.8–4.5 %. Содержание селена в почве до посева составляло 0.16 мг/кг.

Методы

В начале мая 2023 г. был заложен микрополевой опыт с целью изучения эффективности методов биофортификации селеном и йодом. Уборка урожая была произведена в середине сентября 2023 г. Участок был разделен на две части для применения различных методов биофортификации: фолиарная обработка (опрыскивание) на стадии вегетации 6–8 листьев и корневое (основное) внесение солей селена и йода в почву перед посевом.

Селен вносили в форме селенита натрия (Na2SeO3) в двух дозах: 24 кг/га и 12 кг/га при корневом внесении и при опрыскивании 0.01 % Se и 0.005 % Se. Йод вносили в форме йодида калия (KI) также в двух дозах: 13 кг/га и 6.5 кг/га при корневом внесении и при опрыскивании 0.01 % I и 0.005 % I. Подбор и выбор дозировок микроэлементов был осуществлен на основе предыдущих опытов исследователей с этими же микроэлементами без учета сочетанного действия селена и йода (Sindireva et al., 2023; Степанова и др., 2020). Площадь делянки 1 м^2. Повторность каждого варианта 3-кратная. Опыт заложен по следующей схеме:

Вариант	Корневое внесение, доза микроэлемента	Фолиарная обработка, концентрация микроэлемента
1	Контроль	Контроль
2	Na_2SeO_3 12 кг/га	Na_2SeO_3 0.005 %
3	KI 6.5 кг/га	KI 0.005 %
4	Na_2SeO_3 12 кг/га + KI 6.5 кг/га	Na_2SeO_3 0.005 % + KI 0.005 %
5	KI 13 кг/га	KI 0.01 %
6	Na_2SeO_3 24 кг/га	Na_2SeO_3 0.01 %
7	Na_2SeO_3 24 кг/га + KI 13 кг/га	Na_2SeO_3 0.01 % + KI 0.01 %

Закладка опытов и их проведение осуществлялись в соответствии с Методикой полевого опыта (Доспехов, 1985). Исследования проводились на опытных делянках с соблюдением принципов повторности, рандомизации и систематического контроля условий выращивания. Особое внимание уделялось учету биометрических показателей, которые являются ключевыми для оценки роста и развития растений, а также их продуктивности. Для измерений отбирались растения из центральной части делянки, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Количество растений для учета составляло 12 экземпляров на каждую повторность. Биометрические замеры проводились в трехкратной повторности для повышения достоверности данных, в строго определенный срок, соответствующий фазе технической спелости, чтобы обеспечить сопоставимость результатов. Растения выкапывались вручную из почвы с минимальным повреждением корнеплода и ботвы. Сначала измерялась общая масса растения, затем отдельно масса корнеплода и масса ботвы. Для точности измерений использовались лабораторные весы с точностью до 0.01 г. Длина корнеплода измерялась от основания до кончика (максимальная продольная ось). Длина ботвы измерялась от основания корнеплода до верхушки самого длинного листа. Измерения проводились с использованием измерительной линейки с точностью до 1 мм. Диаметр измерялся в самой широкой части корнеплода с использованием штангенциркуля. Подготовка проб для химического анализа проводилась согласно ГОСТ РЕН 13804–2010. Содержание селена в почве и растительных образцах определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Тюменской области с использованием метода спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно методике ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98 (Количественный химический анализ..., 2005). Метод заключается в возбуждении атомов и ионов анализируемых элементов в высокотемпературной индуктивно-связанной плазме, а затем измерении излучения света, испускаемого этими атомами и ионами на определенных длинах волн. Каждая длина волны соответствует определенному элементу, что позволяет количественно определить его содержание. Математическая обработка полученных данных осуществлялась с применением стандартных статистических методов с использованием программного пакета MS Excel.

Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (p), при этом критическим уровнем значимости принимали $p \leq 0.05$.

Результаты

При исследовании биометрических показателей были измерены следующие параметры: масса ботвы и корнеплода, длина ботвы и корнеплода, диаметр корнеплода (рис. 1).

Морковь. В проведенном исследовании преимущественно стимулирующее действие микроэлементов на биометрические показатели растений отмечены у моркови при основном внесении. Наибольшие показатели по массе ботвы и ее длине, по массе корнеплода, его длине и диаметру отмечены на варианте «Se 24 кг/га + I 13 кг/га», они превышали уровень контроля на 58.33, 11.63, 95.26, 15.20 и 27.27 % соответственно.

Согласно данным рис. 1, на варианте «I 13 кг/га» стимулирующее действие микроэлемента было отмечено в отношении показателей массы ботвы и корнеплода, его длины и диаметра на 33.33, 64.82%, 13.60 и 18.18 % больше контрольного варианта соответственно. На варианте «Se 12 кг/га» масса корнеплода и его диаметр превышали на 44.66 и 13.64 % эти же показатели на контрольном варианте. При увеличении дозы на варианте «Se 24 кг/га» показатели массы ботвы и корнеплода, его диаметра были больше на 20.83, 90.12 и 13.64 %, чем на контрольном варианте. Масса ботвы и корнеплода варианта «Se 12 кг/га + I 6.5 кг/га» была больше на 49.17 и 19.76 % контрольного варианта. При основном внесении угнетающий эффект был отмечен лишь на варианте «I 13 кг/га» по массе ботвы на 38.33 % относительно этого же показателя контрольного варианта.

У моркови при опрыскивании отмечено меньше стимулирующих действий микроэлементов на биометрические показатели растений. Наиболее стимулирующее действие отмечено на варианте «Se + I 0.005 %», здесь показатели массы ботвы и корнеплода, его диаметра больше на 20.67, 20.60 и 16.67 %, чем на контрольном варианте, однако по длине ботвы зафиксирован угнетающий эффект на 21.78 %. При применении опрыскивания отмечено больше угнетающих эффектов по массе ботвы и корнеплодов на следующих вариантах: «Se + I 0.005 %» на 46.00 и 34.22 %; «Se + I 0.01 %» на 52.00 и 37.54 %; «Se 0.01 %» на 22.00 и 24.25 %; «I

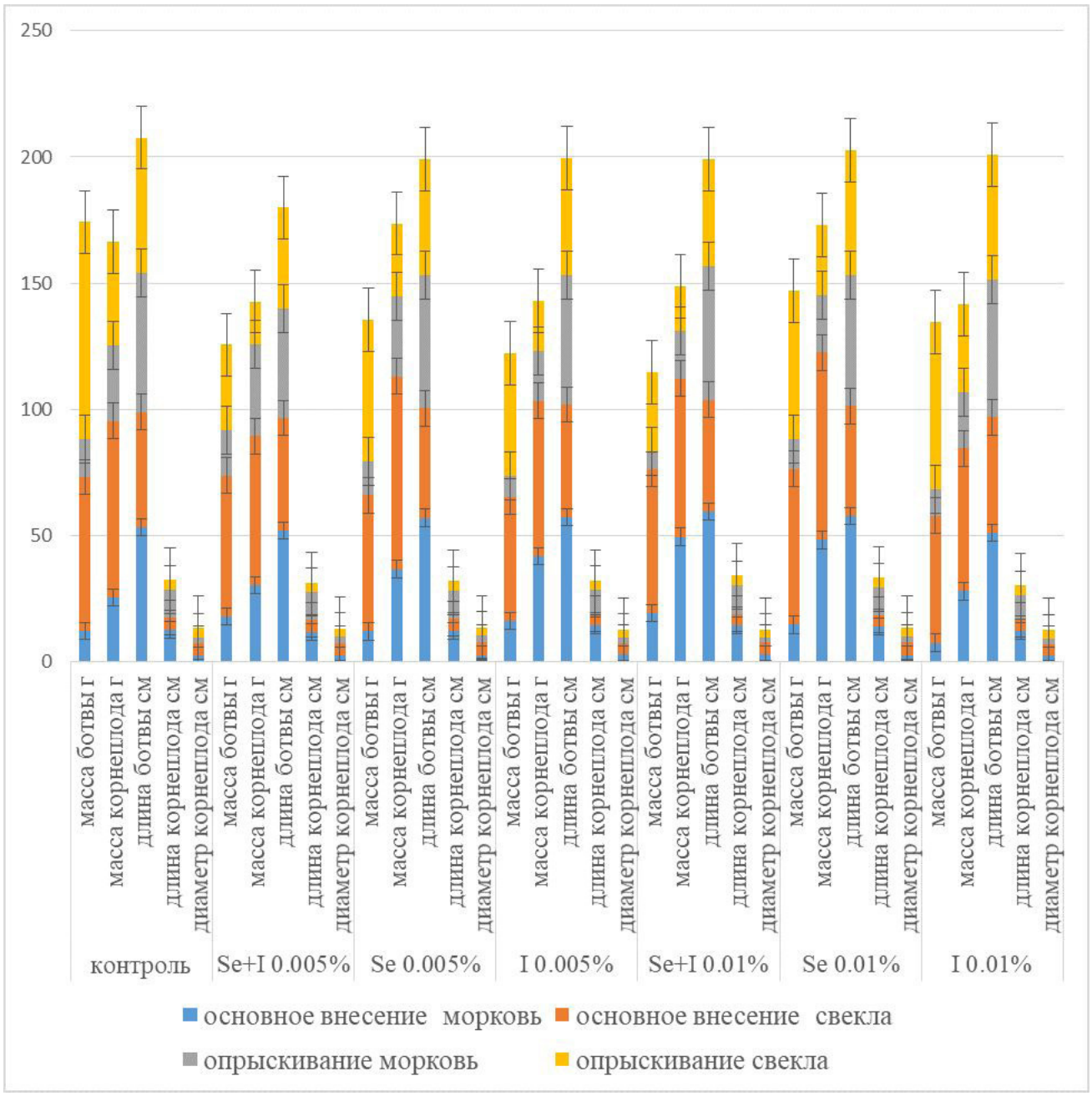


Рис. 1. Биометрические параметры корнеплодов при биофортификации селеном и йодом разными методами

Fig. 1. Biometric parameters of root crops under biofortification with selenium and iodine by different methods

0.01 %» на 29.33 и 25.91 %.

Свекла. При основном внесении микроэлементов было отмечено угнетающее действие на массу ботвы и корнеплодов растений свеклы на варианте: «I 6.5 кг/га» на 19.31 и 12.00 %; «I 13 кг/га» на 17.51 и 19.14 % относительного тех же показателей контрольного варианта. Угнетающее действие на массу корнеплода отмечено на варианте «Se 12 кг/га +I 6.5» на 15.71 % и на массу ботвы на варианте «Se 12 кг/га» на 11.78 % относительно контрольных растений.

Угнетающих эффектов на биометрические показатели было зафиксировано больше при опрыскивании, чем при основном внесении. Так, на вариантах «Se + I 0.005 %» и «I 0.005 %» было зафиксировано угнетение всех биометрических показателей: массы ботвы на 60.86 и 43.44 %, массы корнеплода на 58.39 и 51.82 %, длины ботвы на 25.14 и 13.59 %, длины корнеплода на 17.07 и 12.20 %, диаметра корнеплода на 18.42 и 21.05 % соответственно. На варианте «Se + I 0.01 %» угнетение зафиксировано по четы-

рем показателям: масса ботвы на 63.65 %, масса корнеплода на 59.93 %, длина ботвы на 20.86 % и диаметр корнеплода на 21.05 %. На вариантах «Se 0.005 %» и «Se 0.01 %» угнетение зафиксировано по двум одинаковым биометрическим показателям: масса ботвы на 34.84 и 31.59 %, масса корнеплода на 30.17 и 32.60 %. Так же на варианте «Se 0.005 %» зафиксировано угнетение длины ботвы на 14.71 %, а на варианте «Se 0.01 %» угнетение диаметра корнеплода на 13.16 % соответственно относительно контрольного варианта. На варианте «I 0.01 %» отмечено угнетение только по двум параметрам: масса ботвы на 23.23 % и масса корнеплода на 15.09 %.

Разные методы биофортификации растений микроэлементами продемонстрировали неоднородные результаты по биометрическим показателям. При основном внесении более стимулирующий эффект микроэлементов на исследуемые биометрические показатели отмечен у растений моркови; при этом же методе зафиксированы угнетающие эффекты на некоторые показатели растений свеклы. При опрыскивании у растений моркови отмечены как положительные эффекты, так и отрицательные, тогда как у растений свеклы – только отрицательные эффекты на всех вариантах.

Методы биофортификации могут оказывать как стимулирующее, так и угнетающее влияние на ростовые характеристики растений в зависимости от вида культуры и способа внесения микроэлементов. При этом эффективность накопления селена в тканях растений не всегда коррелирует с биометрическими параметрами. Например, у столовой свеклы некорневое внесение оказалось более результативным для накопления селена, несмотря на угнетающий эффект на биометрические показатели. Так, в проведенном исследовании было установлено, что наибольшее накопление селена в ботве и корнеплодах столовой свеклы наблюдается при некорневом внесении по сравнению с основным внесением в почву (рис. 2).

Это свидетельствует о более эффективном применении данного метода биофортификации. При этом на вариантах с отдельным внесением йода отмечено снижение накопления селена по сравнению с контрольной группой. В данном случае это может быть связано как с явлением антагонизма, так и с синергизмом в паре «селен – йод», влиянием йода на антиоксидантную систему растений, что может уменьшать их потребность в селене. Так, в последних исследованиях выявлено влияние йода на экспрессию генов, кодирующих стресс-регулирующие белки, что может снижать потребность растений в селене как антиоксиданте (Kiferle et al., 2021).

Максимальное накопление селена при опрыскивании как в ботве, так и в корнеплодах свеклы зафиксировано на варианте «Se + I» в концентрации 0.005 %, что в 10.0 и 12.9 раза больше контрольного варианта. При увеличении концентрации до 0.01 % содержание селена выше в 4.5 и 6.3 раза контрольного варианта, что может быть связано с ингибирующим эффектом избыточных концентраций микроэлементов на их накопление в растениях. На вариантах с отдельным внесением «Se 0.005 %» и «Se 0.01 %» выявлена тенденция к снижению содержания селена в ботве при увеличении дозы, тогда как в корнеплодах наблюдается противоположная зависимость. Наибольшее накопление селена при корневом внесении отмечено на варианте «Se 24 кг/га» что в 12.2 раза больше, чем в корнеплодах и в 16.2 раза больше, чем в ботве рпстений контрольного варианта. В то же время при отдельном внесении йода отмечено большее накопление селена: в 2.4 раза в корнеплодах и в 3.9 раза в ботве по сравнению с контрольным вариантом, что указывает на возможные синергетические взаимодействия между йодом и селеном на этапе поглощения растениями. При корневом внесении Se с увеличением дозы с 12 до 24 кг/га также увеличивается содержание селена в ботве, что больше в 16.2 раза, и корнеплодах – в 12.2 раза относительно контрольного варианта. Однако более высокое накопление селена отмечено при отдельном внесении селена по сравнению с сочетанным внесением Se и I. В отличие от предыдущего синергетического взаимодействия здесь может быть отмечено конкурирующее взаимодействие микроэлементов между йодом и селеном в процессе поглощения и транспорта, а также с возможным влиянием йода на микробиологическую активность почвы или ее pH, что может косвенно влиять на доступность селена для растений. Кроме того, йод может активировать антиоксидантные ферменты через экспрессию генов, кодирующих стресс-регулирующие белки растений, что снижает уровень окислительного стресса. В этом случае растения могут меньше нуждаться в селене как антиоксиданте, что объясняет снижение его накопления (Kiferle et al., 2021; Blasco et al., 2013).

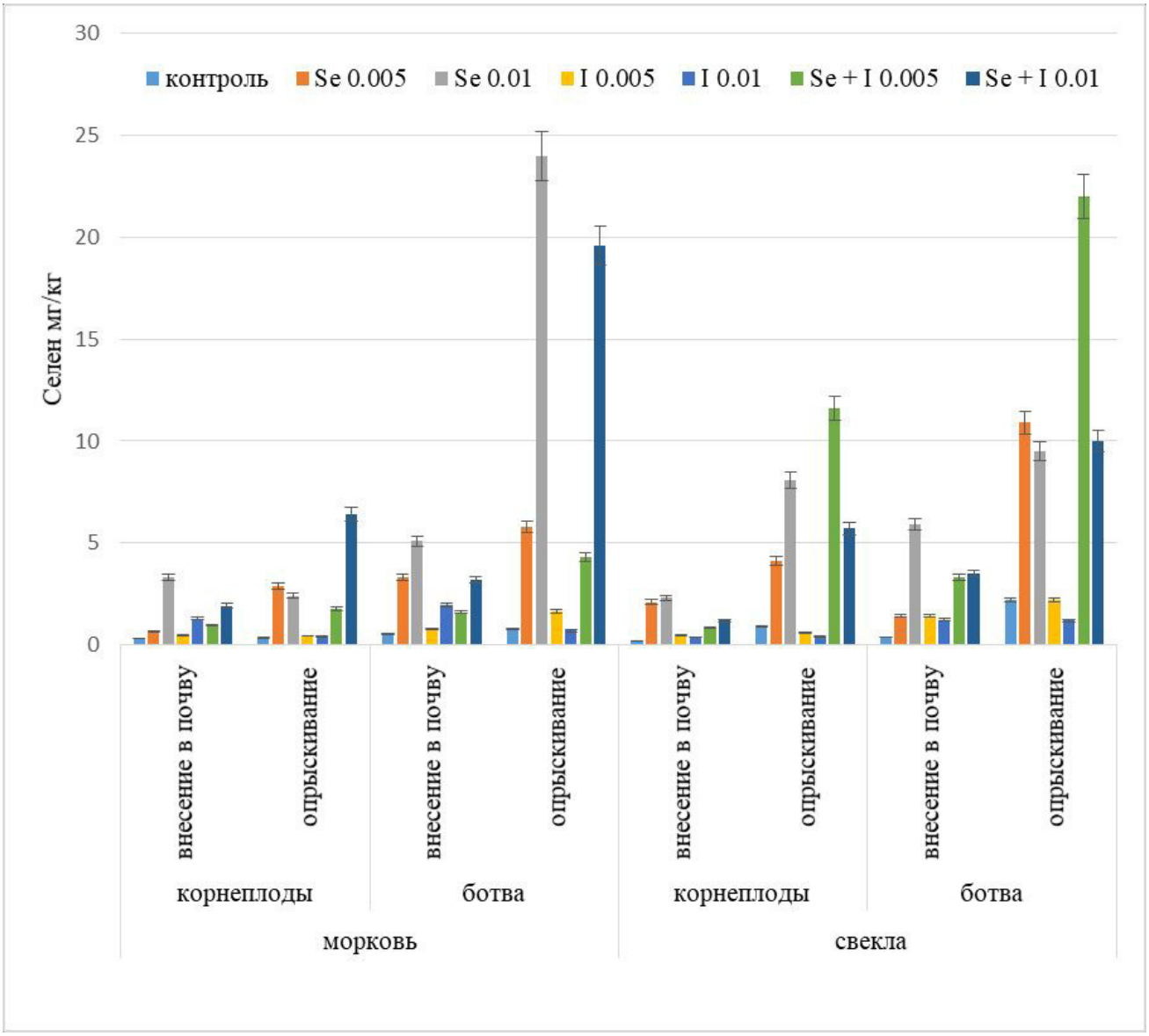


Рис. 2. Содержание селена в ботве и корнеплодах растений при разных методах биофортификации

Fig. 2. Selenium content in haulm and root crops of plants under different biofortification methods

Из-за генетических различий между морковью и свеклой процессы накопления селена в ботве и корнеплодах этих растений протекают по-разному. Однако прослеживаются некоторые закономерности накопления селена в растениях при внесении различных концентраций солей микроэлементов. Наибольшее содержание селена в растениях моркови наблюдается на вариантах «Se + I 0.01 %» для корнеплодов, что в 18.3 раза больше контрольного варианта, и «Se 0.01 %» для ботвы при опрыскивании, что в 31.9 раза больше контрольного варианта. Отмечается тенденция к большему накоплению селена в ботве при опрыскивании по сравнению с основным внесением в почву. Аналогичная тенденция отмечена и в надземной части растений при опрыскивании по сравнению с внесением в почву. При отдельном внесении йода, как методом основного внесения в почву, так и опрыскиванием, наблюдается увеличение содержания селена в надземной части и корнеплодах по сравнению с растениями контрольного варианта. Это может свидетельствовать о синергетических взаимодействиях микроэлементов, влияющих как на процесс поглощения микроэлементов растениями, так и на косвенные факторы, такие как изменение pH и микробиологическое состояние почвы.

При изолированном действии Se в дозе 0.005 % по сравнению с сочетанным приме-

нением Se + I в той же концентрации наблюдается более высокое содержание селена в надземной части и корнеплодах, что может указывать на антагонистические взаимодействия между этими микроэлементами и ингибирование поглощающей способности селена растениями. В условиях высоких доз «Se 24 кг/га» и «Se 24 кг/га + I 13 кг/га» наблюдается аналогичная картина при основном внесении в почву. Однако при опрыскивании накопление селена выше в корнеплодах при сочетанном действии с йодом, чем при отдельном внесении, что может указывать на избыточные поступления микроэлементов в растения и их угнетение.

Обсуждение

Несмотря на применение различных методов биофортификации для обеих культур, основным местом аккумуляции селена оказалась надземная часть растений – ботва, а не корнеплоды. Преимущественную аккумуляцию селена в листьях можно объяснить несколькими факторами: после поглощения корнями селен транспортируется вверх по ксилеме, что способствует его перемещению к листьям. Он поглощается в виде ионов селената или селенита, которые легко транспортируются и могут превращаться в менее подвижные органические соединения, такие как селенометионин, в листьях. Листья, как основное место фотосинтеза и метаболической активности, способствуют накоплению селена из-за интенсивного преобразования веществ. Кроме того, селен может выполнять защитные функции против стрессов, таких как ультрафиолетовое излучение или патогены, что делает его большое накопление особенно важным в листьях. Транспорт селена обратно в корни или другие части растения может быть ограничен, особенно если органические формы селена менее подвижны в флоэме. Когда селен применяется в виде опрыскивания, он непосредственно попадает на поверхность листьев и быстро поглощается через кутикулу и устьица. Листья, как основное место метаболической активности и фотосинтеза, обладают высокой способностью к поглощению и преобразованию селена. Кроме того, поскольку опрыскивание осуществляется непосредственно на листья, большая часть селена остается и аккумулируется в них (Duborská et al., 2022; Молдован и др., 2022; Hossain et al., 2021; Smolen, 2019).

В исследованиях (Smolen, 2016) подтверждаются данные о накоплении селена в растениях моркови при отдельном внесении I. Однако есть и противоречащие данные о накоплении селена при отдельном внесении Se и сочетанном Se + I, так, в нашем исследовании при низких дозировках на вариантах Se + I наблюдается меньшее накопление микроэлемента, чем на варианте с Se. Тогда как для свеклы такой эффект наблюдается только при повышенных дозах Seи Se + I, а на вариантах с меньшими дозами обратный эффект, когда накопление селена в растениях на варианте Se + I больше, чем на Se. В исследовании (Rakozky-Lelek et al., 2021) представлена прямая зависимость накопления селена от внесенных дозировок: чем больше дозировка микроэлементов, тем больше накопление селена в ботве и корнеплодах, подтверждаются данные о синергетическом взаимодействие Se + I и большее накопление микроэлемента в растениях, чем при отдельном внесении.

В целом результаты нашего исследования подтверждают сложный характер накопления селена в растениях в зависимости от культуры, метода биофортификации и сочетания микроэлементов. Наблюдаемая тенденция к накоплению селена в надземной части растений, особенно в листьях, согласуется с физиологическими и биохимическими особенностями транспорта и метаболизма этого микроэлемента. Однако различия между культурами (морковью и свеклой) подчеркивают необходимость более глубокого изучения механизмов взаимодействия селена с другими микроэлементами, такими как йод, а также влияния дозировок на эффективность их усвоения.

Морковь, как показали наши данные, обладает более низкой способностью к накоплению селена по сравнению со свеклой. Это может быть связано как с особенностями анатомического строения корнеплодов, так и с различиями в метаболической активности тканей. Важно отметить, что основной аккумуляцией селена отличается ботва, что подтверждается как нашими экспериментальными данными, так и результатами других исследований (Duborská et al., 2022; Smolen et al., 2016). Этот факт имеет важное значение для практической агрономии, поскольку ботва часто остается неиспользуемой частью урожая, тогда как обогащение корнеплодов селеном имеет более высокую ценность для питания человека.

Синергетическое или антагонистическое взаимодействие селена и йода при их сочетанном применении требует особого вни-

мания. В нашем исследовании выявлены интересные закономерности: для моркови при низких дозировках сочетание Se + I приводит к меньшему накоплению селена по сравнению с его отдельным внесением, тогда как для свеклы при низких дозах наблюдается противоположный эффект. При высоких дозировках микроэлементов для свеклы проявляется снижение накопления селена при их сочетанном внесении. Эти результаты указывают на сложный характер взаимодействия микроэлементов в зависимости от дозировки и культуры растений. Исследование (Rakozky-Lelek et al., 2021) подтверждает прямую зависимость накопления селена от дозировки, а также синергетический эффект Se + I при определенных условиях. Однако наши данные показывают, что эта зависимость может быть нелинейной и варьироваться в зависимости от культуры и метода биофортификации.

Заключение

В ходе исследования была изучена эффективность различных методов биофортификации сельскохозяйственных культур селеном и йодом на морковь и свеклу, в частности на их биометрические показатели и накопление селена.

Морковь:

- Основное внесение микроэлементов оказало преимущественно стимулирующее действие на биометрические показатели. Наиболее эффективным оказался вариант «Se 24 кг/га + I 13 кг/га», где показатели массы ботвы, массы, длины и диаметра корнеплода превысили контрольный вариант на 58.33, 95.26, 15.20 и 27.27 % соответственно.
- Опрыскивание показало меньшее стимулирующее действие и больше угнетающих эффектов на рост и развитие растений. Наиболее благоприятный результат зафиксирован на варианте «Se + I 0.005 %» (увеличение массы ботвы и корнеплода на 20.67 и 20.60 %), однако отмечено снижение длины ботвы на 21.78 %.

Свекла:

- При основном внесении микроэлементов преобладало угнетающее действие на рост и развитие растений. Наибольшее снижение массы ботвы и корнеплода отмечено на вариантах «I 6.5 кг/га» (на 19.31 и 12 %) и «I 13 кг/га» (на 17.51 и 19.14 %).
- Опрыскивание вызвало более выраженное угнетение всех биометрических показателей. На вариантах «Se + I 0.005 %» и «I 0.005 %» масса ботвы снизилась на 60.86 и 43.44 %, масса корнеплода – на 58.39 и 51.82 %.

Общие выводы:

- Морковь положительно реагирует на основное внесение микроэлементов, особенно на комбинацию «Se 24 кг/га + I 13 кг/га».
- Свекла проявляет высокую чувствительность к микроэлементам с преобладанием угнетающего эффекта, особенно при опрыскивании.
- Для моркови рекомендуется основное внесение микроэлементов, а для свеклы требуется дальнейшая оптимизация дозировок и методов внесения. На процессы аккумуляции селена влияют следующие факторы:

Накопление селена при различных методах внесения:

- Некорневое внесение (опрыскивание) оказалось более эффективным методом биофортификации селеном, чем основное внесение в почву. Это подтверждается значительным увеличением содержания селена как в ботве, так и в корнеплодах столовой свеклы.
- Максимальное накопление селена при опрыскивании наблюдалось на варианте «Se + I 0.005 %», где содержание микроэлемента превысило контрольный вариант в 10.0 раз в ботве и в 12.9 раза в корнеплодах. Однако увеличение концентрации до 0.01 % привело к снижению содержания селена, что указывает на возможный ингибирующий эффект высоких доз микроэлементов на их накопление в растениях.
- При корневом внесении максимальное накопление селена зафиксировано на варианте «Se 24 кг/га», где содержание селена в ботве увеличилось в 16.2 раза, а в корнеплодах – в 12.2 раза по сравнению с контрольным вариантом.

Влияние йода на накопление селена:

- На вариантах с отдельным внесением йода наблюдалось снижение содержания селена по сравнению с контролем. Это может быть связано с влиянием йода на антиоксидантную систему растений, что снижает их потребность в селене.
- При сочетанном внесении Se и I отмечено конкурирующее взаимодействие между микроэлементами, что могло ограничивать поглощение и транспорт селена растениями. Это проявилось в меньшем накоплении селена по сравнению с вариантами с отдельным внесением селена.
- При корневом внесении йода выяв-

лено большее накопление селена (в 2.4 раза в корнеплодах и в 3.9 раза в ботве) по сравнению с контрольным вариантом. Это указывает на возможность синергетического взаимодействия между йодом и селеном на этапе поглощения растениями.

Дозозависимые эффекты:

- При некорневом внесении увеличение концентрации Se с 0.005 до 0.01 % приводило к снижению содержания селена как в ботве, так и в корнеплодах. Это может быть связано с угнетающим действием избыточных концентраций микроэлементов.
- В случае корневого внесения увеличение дозы Se привело к росту содержания селена как в ботве (в 16.2 раза больше контроля), так и в корнеплодах (в 12.2 раза больше контроля), что свидетельствует о положительном влиянии повышенных доз при данном способе внесения.

Физиологические аспекты взаимодействия микроэлементов:

- Влияние йода на антиоксидантную систему растений может снижать их потребность в селене или изменять механизмы его усвоения.
- Конкуренция между йодом и селеном на этапе поглощения и транспорта, а также возможное влияние йода на микробиологическую активность почвы или ее pH могут ограничивать доступность селена для растений.

Следует учитывать взаимодействие микроэлементов в паре «йод – селен» при их сочетанном внесении в растения столовой свеклы и моркови. Это требует дальнейших исследований для оптимизации соотношений и методов внесения данных микроэлементов.

Библиография

Синдирева А. В., Котченко С. Г., Гурьев Н. Е. Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области // Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 32–38.

Голубкина Н. А., Кекина Е. Г., Надежкин С. М. Перспективы обогащения сельскохозяйственных растений йодом и селеном (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2015. Т. 16, № 3. С. 12–19.

Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) . 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98 . М., 1998 (издание 2005). URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf

Молдован А. И., Харченко В. А., Голубкина Н. А., Кекина Е. Г., Карузо Д. Внекорневое обогащение кервеля селеном и йодом на фоне использования микроудобрения Силиплант, содержащего кремний // Овощи России. 2022. Т. 2. С. 57–64.

Степанова О. В., Синдирева А. В., Вешкурцева С. С., Вранеско В. С. Экологическая оценка действия йода на начальные показатели роста и развития зерновых культур // Проблемы региональной экологии. 2020. № 2. С. 33–38.

Титов А. Ф., Казнина Н. М., Карапетян Т. А., Доршакова Н. В., Тарасова В. Н. Роль селена в жизнедеятельности растений, животных и человека // Успехи современной биологии. 2021. Т. 141, № 5. С. 443–456.

Alfthan G., Aro A. Enviromental effects of selenium fertilization – Is there a potential risk? // Proc. "Twenty Years of selenium Fertilization" Is Here a potencial risk? Proc. "Twenty Years of selenium Fertilization" – sept. 8–9. Helsinki, 2005. P. 33–35.

Blasco B., Leyva R., Romero L., Ruiz J. M. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress // J. Agric. Food Chem. 2013. Vol. 61 (11). P. 2591–2596.

Chen Z., Lu Y., Dun X., Wang X., Wang H. Research Progress of Selenium-Enriched Foods // Nutrients. 2023. Vol. 15 (19). P. 4189.

Duborska E., Sebesta M., Matulova M., Zverina O., & Urik M. Current Strategies for Selenium and Iodine Biofortification in Crop Plants // Nutrients. 2022. Vol. 14 (22). P. 4717.

Hossain A., Skalicky M., Brestic M., et al. Selenium Biofortification: Roles, Mechanisms, Responses and Prospects // Molecules. 2021. Vol. 26 (4). P. 881.

Kiferle C., Martinelli M., Salzano A. M., et al. Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants // Front Plant Sci. 2021. Vol. 12. P. 616868.

Rakoczy-Lelek R., Smoleń S., Grzanka M., et al. Effectiveness of Foliar Biofortification of Carrot With Iodine and Selenium in a Field Condition // Front Plant Sci. 2021. Vol. 12. P. 656283. DOI: 10.3389/fpls.2021.656283

Sindireva A., Golubkina N., Bezuglova H., Fedotov M., Alpatov A., Erdenotsogt E., Sękara A., Murariu O. C., Caruso G. Effects of High Doses of Selenate, Selenite and Nano-Selenium on Biometrical Characteristics, Yield and Biofortification Levels of *Vicia faba* L. Cultivars // Plants. 2023. Vol. 12

(15). P. 2847.

Smoleń S., Baranski R., Ledwożyw-Smoleń I., Skoczylas Ł., Sady W. Combined biofortification of carrot with iodine and selenium // Food Chem. 2019. Vol. 300. P. 125202. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125202

Smoleń S., Skoczylas Ł., Ledwożyw-Smoleń I., et al. Biofortification of Carrot (*Daucus carota* L.) with Iodine and Selenium in a Field Experiment // Front Plant Sci. 2016. Vol. 7. P. 730. DOI: 10.3389/fpls.2016.00730

Mangutova, A., Sindireva, A., Kosolapov, R. Biometric indices and selenium content in beet and carrot plants using different methods of biofortification with iodine and selenium. // Principy èkologii. 2025 № 2. P. 58–70. DOI: 10.15393/j1.art.2025.15782

BIOMETRIC INDICES AND SELENIUM CONTENT IN BEET AND CARROT PLANTS USING DIFFERENT METHODS OF BIOFORTIFICATION WITH IODINE AND SELENIUM

MANGUTOVA Anna Konstantinovna — *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Tyumen State University", 6 Volodarsky St. Tyumen Russia 625003, annamangutova@gmail.com*

SINDIREVA Anna Vladimirovna — *D.Sc., Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Tyumen State University", 6 Volodarsky St. Tyumen Russia 625003, sindireva72@mail.ru*

KOSOLAPOV Radmir Maratovich — *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Tyumen State University", 6 Volodarsky St. Tyumen Russia 625003, stud0000265202@utmn.ru*

Keywords:
selenium
biofortification
Bordeaux 237 beets
Vitaminnaya 6 carrots
sod-podzolic soils
south of the Tyumen Region

Summary: The effect of biofortification of carrot (Daucus carota) and beet (Beta vulgaris) plants was investigated using trace elements of iodine and selenium presented as KI and Na_2SeO_3. Biofortification was carried out by two methods: foliar treatment (spraying) with concentrations of 0.005 % and 0.01 %, as well as root application in dosages of 12 and 24 kg/ha for selenium and 6.5 and 13 kg/ha for iodine. Additionally, the combined effects of these micronutrients were studied at concentrations of Na2SeO3 12 kg/ha + KI 6.5 kg/ha and Na2SeO3 24 kg/ha + KI 13 kg/ha for root application, and Na2SeO3 0.005 % + KI 0.005 % and Na2SeO3 0.01 % + KI 0.01 % for foliar spraying. The experimental results showed that the main application of micronutrients had a stimulating effect on the biometric parameters of carrot plants, whereas beet plants showed a depressing effect, especially when iodine was applied. In most variants with foliar processing of beet plants, a decrease in biometric indicators was also noted. The study of selenium accumulation in plants (tops and root crops) revealed a number of specific patterns. In carrots, the maximum selenium content in tops was observed during foliar treatment with a concentration of 0.01 %, where its level exceeded the control level by 31.9 times. Combined application of selenium and iodine (Se + I) also contributed to a significant increase in selenium accumulation in the tops – by 26 times compared with the control. In beets, the highest accumulation of selenium in root crops (12.2 times) and tops (16.2 times) was observed with root application of selenium. In foliar treatment using a combination of Se + I (concentration 0.005 %) the accumulation of selenium in root crops and tops increased by 12.9 and 10 times, respectively, compared with the control variant. At the same time, the selenium content in the dry mass of plants in the control variant did not exceed 0.9 mg/kg in beets and 0.5 mg/kg in carrots. The obtained results demonstrate the differences in the efficiency of biofortification methods for different crops. In contrast to a number of previous studies, where a linear relationship was observed between the dosage of micronutrients and their accumulation in plants, this experiment revealed variable effects depending on the method of application and concentration of micronutrients. To optimize biofortification of plants with iodine and selenium, further studies are needed to clarify the most effective methods and conditions of application.

Reviewer: V. V. Vapirov

Received on: 01 March 2025 **Published on:** 21 June 2025

References

Alfthan G., Aro A. Enviromental effects of selenium fertilization – Is there a potential risk?, Proc. «Twenty Years of selenium Fertilization» Is Here a potencial risk? Proc. «Twenty Years of selenium Fertilization» – sept. 8–9. Helsinki, 2005. P. 33–35.

Blasco B., Leyva R., Romero L., Ruiz J. M. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress, J. Agric. Food Chem. 2013. Vol. 61 (11). P. 2591–2596.

Chen Z., Lu Y., Dun X., Wang X., Wang H. Research Progress of Selenium-Enriched Foods, Nutrients. 2023. Vol. 15 (19). P. 4189.

Dospehov B. A. Methodology of field experiment (with basics of statistical processing of research results). 5-e izd., dop. i pererab. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p.

Duborska E., Sebesta M., Matulova M., Zverina O., & Urik M. Current Strategies for Selenium and Iodine Biofortification in Crop Plants, Nutrients. 2022. Vol. 14 (22). P. 4717.

Golubkina N. A. Kekina E. G. Nadezhkin S. M. Prospects of agricultural plants biofortification with iodine and selenium (review), Mikroelementy v medicine. 2015. T. 16, No. 3. P. 12–19.

Hossain A., Skalicky M., Brestic M., et al. Selenium Biofortification: Roles, Mechanisms, Responses and Prospects, Molecules. 2021. Vol. 26 (4). P. 881.

Kiferle C., Martinelli M., Salzano A. M., et al. Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants, Front Plant Sci. 2021. Vol. 12. P. 616868.

Methodology for Measurements of Metal Content in Solid Objects by Inductively Coupled Plasma Spectrometry. M., 1998 (izdanie 2005). URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf

Moldovan A. I. Harchenko V. A. Golubkina N. A. Kekina E. G. Karuzo D. Foliar biofortification of chervil with selenium and iodine under silicon containing fertilizer supply, Ovoschi Rossii. 2022. T. 2. P. 57–64.

Rakoczy-Lelek R., Smoleń S., Grzanka M., et al. Effectiveness of Foliar Biofortification of Carrot With Iodine and Selenium in a Field Condition, Front Plant Sci. 2021. Vol. 12. P. 656283. DOI: 10.3389/fpls.2021.656283

Sindireva A. V. Kotchenko S. G. Gur'ev N. E. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region, Problemy regional'noy ekologii. 2021. No. 3. P. 32–38.

Sindireva A., Golubkina N., Bezuglova H., Fedotov M., Alpatov A., Erdenotsogt E., Sękara A., Murariu O. C., Caruso G. Effects of High Doses of Selenate, Selenite and Nano-Selenium on Biometrical Characteristics, Yield and Biofortification Levels of Vicia faba L. Cultivars, Plants. 2023. Vol. 12 (15). P. 2847.

Smoleń S., Baranski R., Ledwożyw-Smoleń I., Skoczylas Ł., Sady W. Combined biofortification of carrot with iodine and selenium, Food Chem. 2019. Vol. 300. P. 125202. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125202

Smoleń S., Skoczylas Ł., Ledwożyw-Smoleń I., et al. Biofortification of Carrot (Daucus carota L.) with Iodine and Selenium in a Field Experiment, Front Plant Sci. 2016. Vol. 7. P. 730. DOI: 10.3389/fpls.2016.00730

Stepanova O. V. Sindireva A. V. Veshkurceva S. S. Vranesko V. S. Environmental assessment of iodine for initial cereal growth and development, Problemy regional'noy ekologii. 2020. No. 2. P. 33–38.

Titov A. F. Kaznina N. M. Karapetyan T. A. Dorshakova N. V. Tarasova V. N. The Role of Selenium in the Life of Plants, Animals and Human, Uspehi sovremennoy biologii. 2021. T. 141, No. 5. P. 443–456.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 57.017.6, 57.017.8, 57.042

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКТОВ ЛИСТЬЕВ И ЯГОД АРОНИИ МИЧУРИНА (×*SORBARONIA MITSCHURINII*) НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ *DROSOPHILA MELANOGASTER*

ПЛАТОНОВА Елена Юрьевна	*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28, Dega37@yandex.ru*
ГОЛУБЕВ Денис Анатольевич	*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28, denismeatboy@gmail.com*
ЗЕМСКАЯ Надежда Владимировна	*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28, zemskaya@ib.komisc.ru*
МИХАЙЛОВА Дарья Владимировна	*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28, kukuman@ib.komisc.ru*
ПАКШИНА Наталья Ришатовна	*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28, pakshina.n.r@ib.komisc. ru*
ТИМУШЕВА Наталия Сергеевна	*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28, uliasheva.n.s@ib.komisc.ru*
ШАПОШНИКОВ Михаил Вячеславович	*кандидат биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28, shaposhnikov@ib.komisc.ru*
МОСКАЛЕВ Алексей Александрович	*доктор биологических наук, Институт долголетия с клиникой реабилитации и превентивной медицины РНЦХ имени академика Б. В. Петровского, Москва, 119435, Россия, amoskalev@list.ru*

Ключевые слова:
листья
плоды
экстракт аронии Мичурина
продолжительность жизни
Drosophila melanogaster
×Sorbaronia mitschurinii

Аннотация: Арония Мичурина (*×Sorbaronia mitschurinii*) является ценной плодовой культурой с высоким содержанием широкого профиля полифенолов и других биологически активных веществ. В плодах содержатся флавоноиды (кверцетин, рутин), фенольные кислоты (неохлорогеновая, хлорогеновая и кофейная кислоты), антоцианы (различные цианидины), а также витамины (C, E, B2, B9, P, PP) и минеральные вещества (цинк, медь, железо, кобальт). В листьях преобладают флавоноиды (рутин, кверцетин) и фенольные кислоты в виде кофейной, хлорогеновой и розмариновой кислот. Известно, что данные биологически активные вещества обладают геропротекторным потенциалом. Ранее нами было обнаружено, что кратковременно примененный экстракт ягод аронии Мичурина с 4-й по 6-ю неделю жизни увеличивает продолжительность жизни Drosophila melanogaster. Поэтому мы проанализировали влияние на продолжительность жизни экстрактов плодов (0.01, 0.1, 1, 2.5, 5 и 10 мг/мл) и листьев (0.01, 0.1, 1 и 5 мг/мл) аронии Мичурина при обработке имаго D. melanogaster начиная с возраста 4 недель и до конца жизни. Выявлено, что экстракт ягод в концентрации 0.1 мг/мл снижал медианную и максимальную продолжительность жизни самцов на 7 и 2 % соответственно, а у самок экстракт в концентрации 1 мг/мл увеличивал медианную и максимальную продолжительность жизни на 5 и 4 % соответственно. При этом экстракт листьев уменьшал медианную и максимальную продолжительность жизни самцов. У самок экстракт листьев в концентрации 0.1 мг/мл увеличивал медианную продолжительность жизни на 2 %, а в концентрации 0.01 мг/мл - снижал на 5 %. Необходимы дальнейшие исследования экстрактов плодов и листьев аронии Мичурина для выявления механизмов воздействия на адаптационные возможности особей обоих полов *D. melanogaster*.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Н. В. Мацишина

Получена: 03 апреля 2025 года **Подписана к печати**: 28 мая 2025 года

Введение

Арония Мичурина (*×Sorbaronia mitschurinii* (A. K. Skvortsov & Maitul.) Sennikov), также известная как черноплодная рябина *Aronia mitschurinii*, была выведена русским селекционером И. В. Мичуриным в начале XX в. (Скворцов и др., 1983; Leonard et al., 2013). *×S. mitschurinii* является межродовым гибридом видов, принадлежащих к семейству розоцветных: *×Sorbaronia fallax* (*A. melanocarpa* × *Sorbus aucuparia*) и *A. melanocarpa* (Sennikov, Phipps, 2013, Stalažs, 2021). *×S. mitschurinii* и *A. melanocarpa* обладают сходным фенотипом и часто могут различаться только по названиям сортов (Скворцов, Майтулина, 1982; Leonard et al., 2013).

Плоды *A. melanocarpa* и *×S. mitschurinii* обладают очень близким фитохимическим составом, что обусловлено их генетическим родством (Kulling, Rawel, 2008). Оба вида богаты биологически активными веществами, включая флавоноиды (кверцетин, рутин), фенольные кислоты (неохлорогеновая, хлорогеновая, кофейная) и антоцианы (различные производные цианидина). Кроме того, плоды содержат комплекс витаминов (C, E, B2, B9, P, PP) и минеральные вещества (цинк, медь, железо и кобальт). Листья аронии (*A. melanocarpa*) также отличаются высоким содержанием биофлавоноидов. Основными соединениями являются флавоноиды (рутин), флавонолы (кверцетин, кемпферол, мирицетин), процианидины и флаван-3-олы (катехин, эпикатехин, процианидин B2). Помимо этого, в листьях обнаружены фенольные кислоты, включая кофейную, хлорогеновую, розмариновую, протокатеховую и хинную кислоты (Скворцов и др., 1982; Скворцов, Майтулина, 1983; Kulling, Rawel, 2008; Skupień et al., 2008; Cvetanović et al., 2018; Platonova et al., 2021; Stalažs, 2021; Repajić et al., 2024).

Указанные биологически активные вещества описаны как соединения, способные увеличивать продолжительность жизни и повышать адаптационный потенциал модельных организмов (дрожжи, нематоды, мухи, мыши). Такие вещества классифицируются как геропротекторы (http://geroprotectors.org/) (Moskalev et al., 2015). К ключевым критериям, определяющим принадлежность веществ к классу геропротекторов, относятся следующие характеристики: демонстрируемое увеличение продолжительности жизни различных модельных организмов, улуч-

шение биомаркеров старения и качества жизни, наличие минимального количества побочных эффектов и низкая токсичность (Moskalev et al., 2016). В качестве дополнительных критериев геропротекторов рассматривают эволюционно консервативные механизмы эффектов, воспроизводимые на различных моделях, способность отсрочивать развитие возрастзависимых заболеваний и повышать устойчивость организма к неблагоприятным факторам окружающей среды (Moskalev et al., 2016).

Старение представляет собой сложный патологический процесс, сопровождающийся прогрессирующим снижением функциональной активности биологических систем организма, включая ухудшение когнитивных функций (Del Rio et al., 2013; He, Jasper, 2014). В условиях глобального ухудшения экологической обстановки, усиления антропогенной нагрузки на окружающую среду и роста загрязнений поиск натуральных и экологически безопасных методов борьбы с возрастными изменениями становится особенно актуальным.

Исследование растительных экстрактов является перспективным направлением в поиске биологически активных соединений с геропротекторным потенциалом, поскольку их производство имеет меньший экологический след по сравнению с синтетическими аналогами (Sammut Bartolo et al., 2021). Выявление таких веществ имеет важное значение не только для медицины, но и для устойчивого развития, т. к. их применение может способствовать улучшению качества жизни, снижению фармацевтической нагрузки на экосистемы и обеспечению здорового долголетия в гармонии с природой. Кроме того, использование этих природных соединений в зрелом возрасте способно отсрочить или замедлить развитие возраст-ассоциированных заболеваний (Sammut Bartolo et al., 2021), что в долгосрочной перспективе может снизить нагрузку на систему здравоохранения и уменьшить объемы медицинских отходов, негативно влияющих на окружающую среду. Таким образом, развитие «натуральной геронтологии» соответствует принципам зеленой химии и способствует сохранению биоразнообразия планеты.

Ранее нами был исследован геропротекторный потенциал этанольного экстракта ягод аронии Мичурина (Platonova et al., 2022). Было установлено, что добавление экстракта в питательную среду плодовых мушек *Drosophila melanogaster* на протяжении всей жизни или в первые две недели жизни вызвало снижение продолжительности жизни особей обоих полов. Однако при добавлении экстракта плодов в пищу с 4-й по 6-ю неделю жизни максимальная продолжительность жизни самцов увеличивалась на 9 %, а у самок медианная и максимальная продолжительность жизни возрастали на 5 и 3 % соответственно (Platonova et al., 2022).

Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения на модели *Drosophila melanogaster* экстракта аронии Мичурина начиная со зрелого возраста (4 недели) и до конца жизни, поскольку именно такая схема демонстрирует наиболее выраженный геропротекторный эффект, увеличивая продолжительность жизни у особей *D. melanogaster*. Целью настоящего исследования было изучение геропротекторного действия экстрактов ягод и листьев ×*Sorbaronia mitschurinii* на модели *D. melanogaster*. Экстракты добавляли в пищу особям обоих полов начиная с 4-недельного возраста и до конца жизни.

Материалы

Растительный материал

Сбор листьев и плодов аронии Мичурина производился в Ботаническом саду (Научная коллекция живых растений, № 507428) Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (Сыктывкар, Республика Коми) в августе 2020 г. Для дальнейших приготовлений экстрактов листья высушивали и упаковывали в крафтовую бумагу, а ягоды замораживали при -20 ˚С. Для сохранения антоцианового профиля плодов использовали метод экстракции этанолом. Для листьев применяли метод экстракции фенольных соединений с получением этилацетатной фракции.

Методы

Экстракция антоциановой фракции из плодов

Для приготовления экстракта плоды измельчали и центрифугировали для получения надосадочной жидкости. Полученную массу смешивали с глиной и снова центрифугировали. Глину готовили путем смешивания сухого порошка глины с 0.1 М соляной кислотой. Образовавшуюся жидкость сливали и смешивали с экстрагентом: 1 % раствором концентрированной соляной кислоты в 96 % этиловом спирте. Полученный раствор центрифугировали, а затем этанол и соляную кислоту из экстракта упаривали на

вакуумно-ротационном испарителе ИР-1М (Химлаборприбор, Россия) при +40 °С для высушивания остатка. Экспериментальные концентрации экстракта ягод готовили из этанольного экстракта, полученного путем разбавления в 96 % этаноле.

Экстрагирование фенольных соединений из листьев

Помол и отбор навесок. Растительные пробы, высушенные вне действия прямого солнечного света и хранившиеся в бумажных пакетах при комнатной температуре, перемалывали на кофемолке Krups (Groupe Seb, Китай) до травяной муки, проходящей через сито 0.25 мм. Из полученной муки исходного сырья отбирали среднюю пробу по 20 г с точностью до 0.0001 г в тройной повторности. Навески муки взвешивали на аналитических весах CAS MW-1200 (CAS Corporation, Корея) и переносили в конические колбы объемом 250 см^3. Анализ делали в трех повторностях.

Обезжиривание сырья. В каждую колбу с сырьем вносили по 200 мл хлороформа ($CHCl_3$). Для ускорения экстракции использовали ультразвуковую ванну УЗВ Sonics Vibra-Cell VCX 130PB (Sonics & Materials, Inc., США) в течение 1 минуты и полученную смесь в растворе хлороформа оставили настаиваться на ночь. После настаивания экстракт фильтровали на манифольде, через ватно-бумажные фильтры с использованием вакуума водоструйного насоса IR-1M (Химлаборприбор, Российская Федерация). После полученный фильтрат переносили в колбу объемом 1000 мл для рекуперации (восстановления) хлороформа. Колбы, где было сырье, ополаскивали чистым хлороформом с последующей фильтрацией суспензии на манифольде. Оставшийся на фильтре осадок третий раз экстрагировали хлороформом и настаивали в течение 1 часа и снова отфильтровали. После четвертого фильтрования экстракт оставляли на ночь для удаления паров хлороформа из растительного сырья. Высушенное сырье дополнительно сушили с применением вакуумного водоструйного насоса IR-1M (Химлаборприбор, Российская Федерация). Остатки хлороформа после четырех экстракций, слитые в общую колбу, в последующем очищали перегонкой. Далее взвешивали колбу с сырьем и определяли вес обезжиренного сырья. В стакан с сырьем добавляли 400 мл 70 % этилового спирта. Шпателем перемешивали суспензию и давали настояться в течение 30 минут.

Сверхвысокочастотная (СВЧ) экстракция флавоноидов. Колбы, содержащие суспензию сырье – экстрагент, ставили в микроволновую печь (LG Electronics Inc., Китай) и осуществляли СВЧ-экстракцию в течении 40–50 секунд при температуре +40 °С и мощности 600 Вт, затем на 60–70 секунд до температуры +70 °С. Интенсивность нагрева определяли ртутным термометром. После СВЧ-экстракции стаканы с пробами извлекали из микроволновой камеры и оставляли в вытяжном шкафу до полного остывания. Остывший экстракт фильтровали через воронку Бюхнера и сушили на манифольде потоком воздуха. К остатку растительного сырья повторно добавляли 400 мл 70 % этилового спирта. Перемешивали и повторяли СВЧ-экстракцию. Оставляли на естественное охлаждение до комнатной температуры. Полученную суспензию фильтровали в вакууме водоструйного насоса IR-1M (Химлаборприбор, Российская Федерация). Вторичный фильтрат в этаноле добавляли в колбу с первичным. Описанную экстракцию повторяли третий раз. Третичный фильтрат в этаноле добавляли в колбу с первичным. Растительный жом сырья утилизировали. Далее на роторном испарителе концентрировали суммарный экстракт с отгонкой этанола и воды, высушивали дополнительно остаток в колбе в вакууме до образования губчатого материала. Далее в делительную колбу с полученным экстрактом 10–15 мл добавляли этиловый эфир уксусной кислоты и встряхивали до образования эмульсии. Отстаивали эмульсию до полного расслоения. Верхний, этилацетатный слой экстракта сливали в отдельную колбу, нижний слой возвращали обратно в делительную воронку и повторяли экстракцию фенольных соединений этилацетатом 3 раза. Полученный сухой экстракт извлекали из отгонных колб с помощью 40 % этилового спирта, добавляли по 10 мл и трехкратно суспензировали губчатую фракцию. Переносили в отдельные стеклянные емкости объемом 30 мл из темного стекла этилацетатную фракцию с примесью хлорофилла для последующих исследований.

Условия содержания мух и вариант обработки экстрактами

В экспериментах использовали линию *D. melanogaster* дикого типа *Canton-S* (#64349, Блумингтон, США) из коллекции ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (https://ib.komisc.ru/add/drosophila/). Оптимальные условия содержания плодовых мух поддерживались с помощью камеры постоянного климата Binder

KBF720-ICH (Binder, Германия) при 25 °C и относительной влажности 60 % при режиме освещения 12 ч свет : 12 ч темнота. Контрольные и опытные мухи при проведении всех экспериментов содержались на питательной среде следующего состава, который был адаптирован из работы Xia и de Belle (Xia, de Belle, 2016): вода – 1000 мл, кукурузная мука – 92 г, сухие дрожжи – 32.1 г, агар-агар – 5.2 г, глюкоза – 136.9 г, 10 мл 10 % раствора нипагина (метил-4-гидроксибензоат, Merck, США) и 10 мл 50 % раствора пропионовой кислоты (Merck, США). Питательную среду разливали по пробиркам в объеме 4 мл на пробирку и высушивали под вентиляторами. Поверх свежей застывшей питательной среды наносили нижеописанные концентрации экстрактов в объеме 30 мкл. Плодовые мухи обоих полов содержались на питательной среде с добавлением этанольного экстракта ягод (SBE) в концентрациях 0.01, 0.1, 1, 2.5, 5 и 10 мг/мл и также с этилацетатным экстрактом листьев (SLE) аронии Мичурина в концентрациях 0.01, 0.1, 1 и 5 мг/мл. Контрольные мухи содержались на питательной среде с добавлением 96 % этанола в объеме 30 мкл. Экспериментальных мух обрабатывали экстрактами в соответствующих концентрациях в возрасте 4 недель и до конца жизни. Перед обработкой экстрактами экспериментальных мух содержали на контрольной среде с содержанием 96 % этанола.

Анализ продолжительности жизни

Перед началом эксперимента свежевылупившихся мух разделяли по полу. Для этого их подвергали кратковременной анестезии углекислым газом CO_2. Для каждого варианта эксперимента формировали группу из 150–160 особей одного пола, которых равномерно распределяли по 5 пробиркам (по 30–32 особи в каждой). Самцов и самок содержали раздельно на протяжении всего исследования. Ежедневно фиксировали количество погибших особей. Дважды в неделю оставшихся живых мух аккуратно пересаживали в новые пробирки со свежеприготовленной питательной средой, содержащей соответствующие исследуемые концентрации экстракта. Эксперименты проводились в трех независимых повторностях. Рассчитывали медианную (возраст 50 % смертности) и максимальную (возраст 90 % смертности) продолжительность жизни.

Статистический анализ

Статистический анализ данных был выполнен с использованием программного обеспечения Excel (Microsoft, США) и OASIS 2 (Online Application for Survival Analysis 2) (Han et al., 2024). Для сравнения статистических различий в функциях выживаемости и медианной продолжительности жизни (ПЖ) между контрольной и экспериментальной группами использовались модифицированный критерий Колмогорова – Смирнова и логранговый критерий соответственно (Mantel, 1966; Fleming et al., 1980). Для оценки различий в возрасте 90 % смертности использовался тест Ванг – Эллисона (Wang et al., 2004).

Результаты

Нами были проанализированы эффекты экстракта ягод (SBE) и экстракта листьев (SLE) аронии Мичурина, применяемых с 4-й недели и до конца жизни, на показатели продолжительности жизни особей обоих полов *D. melanogaster*.

Обнаружено, что у самцов применение экстракта ягод в концентрации 0.1 мг/мл вызвало статистически значимое снижение медианной ПЖ на 7 % ($p < 0.0001$) и максимальной ПЖ до 2 % ($p < 0.01$) (рис. 1А, Б, табл. 1). Также SBE в концентрациях 0.01, 1, 2.5 и 5 мг/мл снижал медианную ПЖ до 2 % ($p < 0.05$) у самцов. У самок SBE в концентрации 1 мг/мл вызвал увеличение медианной ПЖ на 5 % ($p < 0.01$), однако в концентрации 0.01 мг/мл снизил ее на 3 % ($p < 0.01$). SBE в концентрации 1 мг/мл увеличил максимальную ПЖ самок на 4 % ($p < 0.05$), а в концентрации 0.01 мг/мл SBE снизил ее на 3 % ($p < 0.05$) (рис. 1В, Г, табл. 1).

Экстракт листьев аронии Мичурина вызвал у самцов статистически значимое ($p < 0.05$) снижение медианной ПЖ на 2 % (5, 0.1 и 0.01 мг/мл SLE), а также максимальной ПЖ на 7 % (5 мг/мл SLE) и на 4 % (1 и 0.01 мг/мл SLE) ($p < 0.01$) (рис. 2А, Б, табл. 1). У самок было выявлено как увеличение медианной ПЖ на 2 % ($p < 0.05$) при концентрации SLE 0.1 мг/мл, так и снижение медианной ПЖ на 5 % ($p < 0.05$) и максимальной ПЖ на 1 % при концентрации SLE 0.01 мг/мл ($p < 0.001$) (рис. 2В, Г, табл. 1).

Обсуждение

Проведенные ранее исследования демонстрируют выраженное влияние различных биологически активных соединений на показатели продолжительности жизни. В частности, применение ацетонового экстракта плодов аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa*) в концентрации 2.5 мг/мл

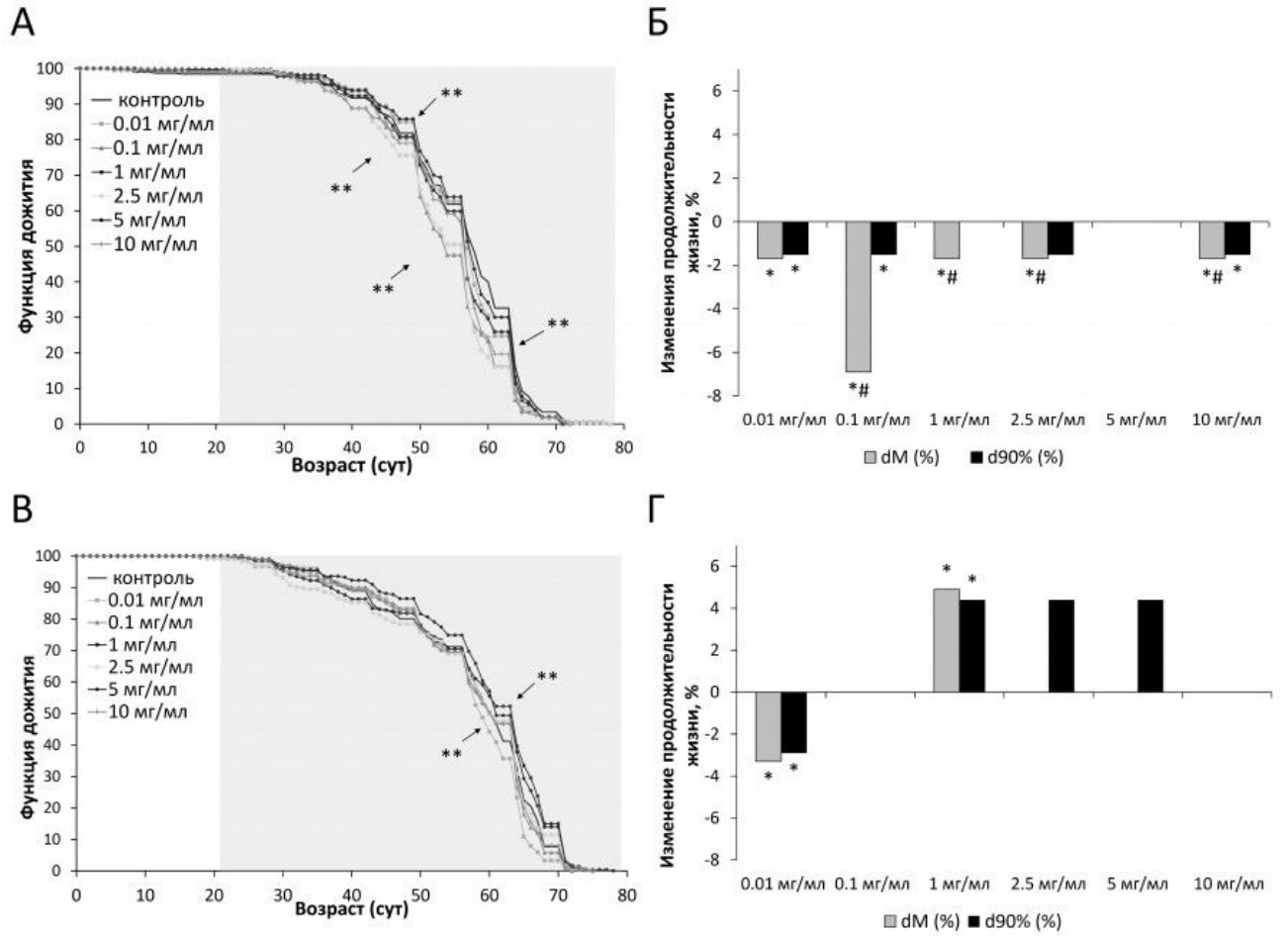


Рис. 1. Влияние SBE на продолжительность жизни *D. melanogaster*. Показаны кривые выживания (А, В), а также изменение (относительно контроля) медианной (dM) и максимальной (d90%) продолжительности жизни (Б, Г) самцов (А, Б) и самок (В, Г). Объединены результаты трех повторностей. Серый фон показывает возраст обработки SBE с 4 недели до конца жизни. *p

Fig.1. The effect of SBE on the lifespan of *D. melanogaster*. Survival curves (A, B) and the change (relative to control) in median (dM) and maximum (d90%) lifespan (Б, Г) of males (A, Б) and females (B, Г) are shown. The results of three repetitions are combined. The gray background shows the age of SBE treatment from the 4th week to the end of life. *p

приводило к увеличению средней продолжительности жизни на 18 % и улучшению двигательной активности в молодом (10-е сутки) и зрелом возрасте (40-е сутки) у самцов *Drosophila melanogaster* (Jo, Imm, 2017). При изучении флавоноидов (кверцетина и (-)-эпикатехина) было установлено, что их длительное добавление в питательную среду не изменяло продолжительность жизни, тогда как кратковременное применение в среднем возрасте (30–40-й дней) оказывало положительное влияние на продолжительность жизни самок плодовых мушек (Proshkina et al., 2016). В исследованиях на мышах показано, что введение рапамицина в возрасте 20–22 месяцев способствовало снижению риска развития возрастных нарушений, включая дегенеративные изменения печени, сердца, надпочечников и кистозную гиперплазию эндометрия у самок (Wilkinson et al., 2012). Эти данные подчеркивают важность выбора оптимальных временных рамок и режимов применения биологически активных соединений для достижения максимального геропротекторного эффекта.

Для объяснения полученных нами эффектов необходимо учитывать, что листья и плоды *A. melanocarpa* и ×*S. mitschurinii* имеют различный состав биологически активных веществ, которые по отдельности или в совокупности могут оказывать разные эффекты на продолжительность жизни *D. melanogaster.* Кроме того, определенные полифенолы являются соединениями естественной системы защиты растений и токсичны для их биологических врагов (Гелашвили и др., 2016; Leri et al., 2020). Вероятно, из-за этого экстракт листьев проявляет пре-

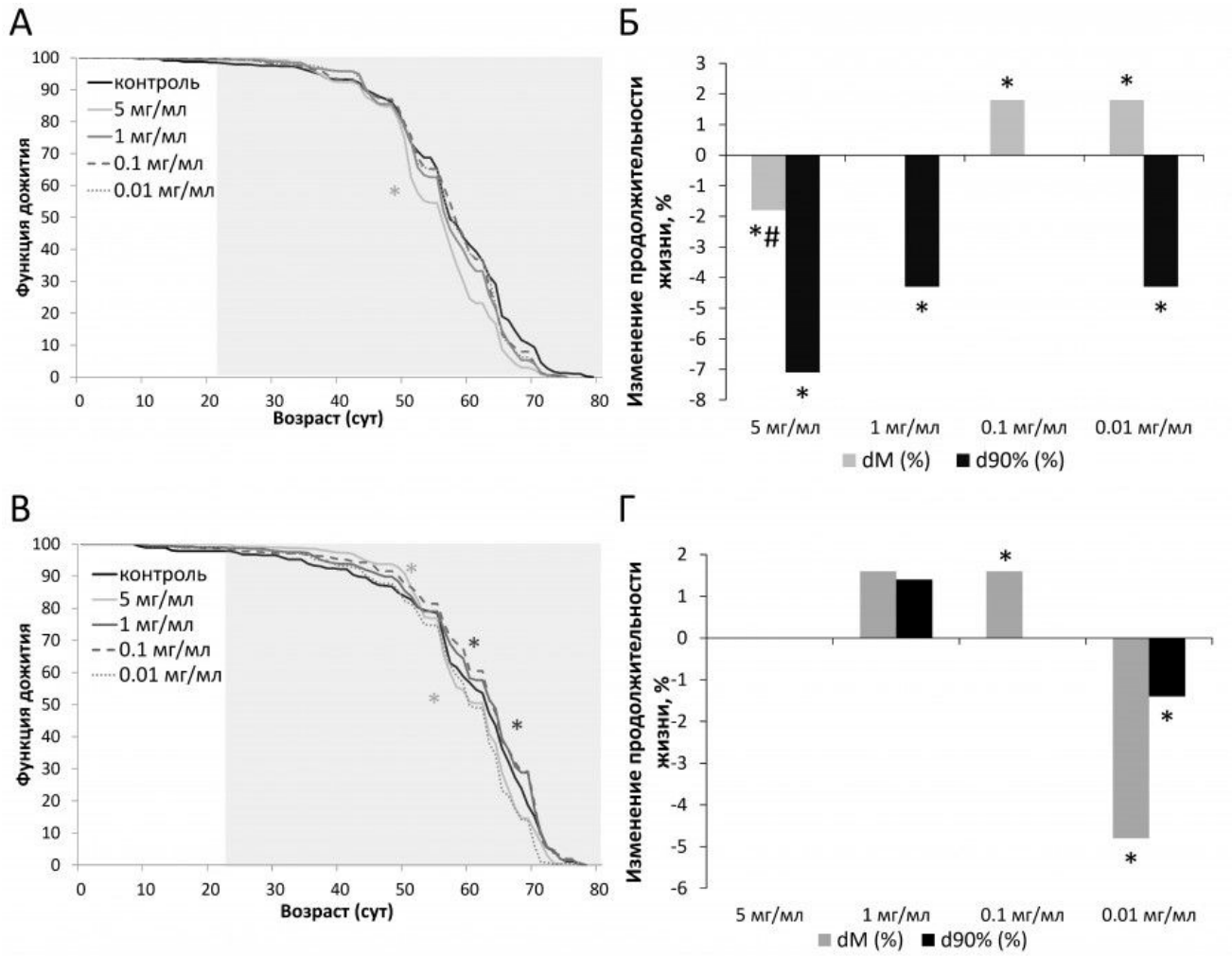


Рис. 2. Влияние SLE на продолжительность жизни *D. melanogaster*. Показаны кривые выживания (А, В), а также изменение (относительно контроля) медианной (dM) и максимальной (d90%) продолжительности жизни (Б, Г) самцов (А, Б) и самок (В, Г). Объединены результаты трех повторностей. Серый фон показывает возраст обработки SLE с 4-й недели до конца жизни. *p

Fig. 2. The effect of SLE on the lifespan of *D. melanogaster*. Survival curves (A, B) and the change (relative to control) in median (dM) and maximum (d90%) lifespan (Б, Г) of males (A, Б) and females (B, Г) are shown. Results of three repetitions are combined. The gray background shows the age of SLE treatment from the 4th week to end of life. *p

имущественно токсический эффект, снижая продолжительность жизни самцов и самок *D. melanogaster* по сравнению с экстрактом ягод.

Поскольку экстракт листьев, как установлено на примере *A. melanocarpa*, содержит в 10 раз больше фенолов (131 мг) и флавоноидов (88 мг), чем ягодный экстракт (13 и 10 мг соответственно), полученный результат может свидетельствовать об эффекте гормезиса. В этом случае более высокая концентрация биологически активных веществ оказывает снижающий эффект на продолжительность жизни, тогда как более низкие концентрации могут иметь противоположное действие (Cvetanović et al., 2018; Leri et al., 2020). При этом существуют исследования, в которых экстракты листьев оказывали положительное воздействие на продолжительность жизни модельного организма. Так, экстракт из листьев и побегов рейнутрии японской (*Reynoutria japonica* Houtt.) продемонстрировал комплексное геропротекторное действие, выражавшееся в увеличении максимальной продолжительности жизни до 23 %, повышении плодовитости и увеличении массы тела на 3 % у *Drosophila melanogaster* (Borovaya, Sobko, 2024).

Плоды аронии (*A. melanocarpa*) характеризуются высоким содержанием определенной группы флавоноидов, а именно антоцианов (цианидин, дельфинидин, пеларгонидин, пеонидин, петунидин, мальвидин), которые широко изучены и оказы-

Таблица 1. Влияние экстракта ягод и листьев аронии Мичурина, применяемого с 4-й недели и до конца жизни, на продолжительность жизни *D. melanogaster*

Концентрация	Пол	M, сут	dM, %	90%, сут	d90, %	Пол	M, сут	dM, %	90%, сут	d90, %
Экстракт ягод										
Контроль	♂	58		65		♀	61		68	
0.01	♂	57	-1.7*	64	-1.5*	♀	59	-3.3*	66	-2.9*
0.1	♂	54	-6.9*	64	-1.5*	♀	61	0	71	0
1.0	♂	57	-1.7*	65	0	♀	64	4.9*	71	4.4*
2.5	♂	57	-1.7*	64	-1.5	♀	61	0	71	4.4
5.0	♂	58	0	65	0	♀	61	0	71	4.4
10.0	♂	57	-1.7	64	-1.5*	♀	61	0	68	0
Экстракт листьев										
Контроль	♂	57		70		♀	63		71	
0.01	♂	58	1.8*	67	-4.3*	♀	60	-4.8*	70	-1.4*
0.1	♂	58	1.8*	67	-4.3	♀	64	1.6*	71	0
1.0	♂	57	0	67	-4.3*	♀	64	1.6	72	1.4
5.0	♂	56	-1.8*	65	-7.1-	♀	63	0	71	0

Примечание. M – медианная продолжительность жизни; 90 % – возраст 90 % смертности (максимальная продолжительность жизни), dM и d90 – различия между опытной и контрольной группами по медианной и максимальной продолжительности жизни соответственно, ♂ – самцы, ♀ – самки.

вают благоприятное влияние на здоровое долголетие (Jurendić, Ščetar, 2021; Liu et al., 2021). Применение дельфинидин-3-O-глюкозида в концентрации 10 мкМ оказало полоспецифичное влияние на медианную продолжительность жизни *D. melanogaster*: у самок наблюдалось увеличение показателя на 4 %, тогда как у самцов – снижение на 5 % (Платонова, 2024). Цианидин-3-глюкозид в концентрациях 10 и 100 мкМ увеличивает максимальную продолжительность жизни самцов *D. melanogaster* на 3 % и 8 % соответственно (Golubev et al., 2022). Применение пеонидин-3-глюкозида в концентрации 50 мкг/мл увеличивало продолжительность жизни *Caenorhabditis elegans* на 14 % и существенно повышало устойчивость организма к различным видам стресса. В частности, соединение обеспечивало 25 % повышение выживаемости при воздействии ультрафиолетового излучения (UVA-диапазона) и термического стресса, а также 48 % увеличение резистентности к окислительному стрессу (Nas et al., 2021).

Заключение

Наши данные демонстрируют, что экстракт плодов *×Sorbaronia mitschurinii*, применяемый в зрелом возрасте и до конца жизни на модели *D. melanogaster*, проявляет более выраженный геропротекторный эффект по сравнению с экстрактом листьев, использованным в аналогичных условиях. Это различие, вероятно, обусловлено существенными различиями в качественном составе биологически активных соединений между плодовыми и лиственными экстрактами (Cvetanović et al., 2018; Leri et al., 2020). В рамках настоящего исследования экстракты выступали в качестве умеренного стресс-фактора, поскольку представляют собой нетипичный компонент питания для плодовых мушек. Наши результаты позволяют предположить, что наблюдаемые эффекты связаны со способностью этих экстрактов модулировать процессы старения через активацию генов стресс-ответа, что способствует адаптации организма к изменяющимся условиям окружающей среды (He, Jasper, 2014).

В дальнейших исследованиях нами планируется оценить эффекты экстракта листьев аронии Мичурина на продолжительность жизни *D. melanogaster* при обработке мух на протяжении всей жизни. Мы также намерены выявить механизмы воздействия данного экстракта на стрессоустойчивость с помощью анализа уровня экспрессии генов стресс-ответа. Это позволит не только углубить понимание молекулярных механизмов, лежащих в основе различных эффектов, но и разработать новые принципы использования экстракта для различных целей с учетом оптимальных концентраций.

Библиография

Гелашвили Д. Б., Безель В. С., Романова Е. Б., Безруков М. Е., Силкин А. А., Нижегородцев А. А. Принципы и методы экологической токсикологии / Под ред. проф. Д. Б. Гелашвили. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2016. 702 с.

Платонова Е. Ю., Голубев Д. А., Патов С. А., Некрасова П. С., Шапошников М. В., Москалёв А. А. Исследование влияния природного антоциана дельфинидина на продолжительность жизни Drosophila melanogaster // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2024. № 9 (75). С. 92–97. DOI: 10.19110/1994-5655-2024-9-92-97

Скворцов А. К., Майтулина Ю. К. Об отличиях культурной черноплодной аронии от ее диких родоначальников // Бюллетень Главного ботанического сада. 1982. Вып. 126. С. 35–40.

Скворцов А. К., Майтулина Ю. К., Горбунов Ю. Н. О месте, времени и возможном механизме возникновения культурной черноплодной аронии // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 1983. Т. 88. С. 88–96.

Borovaya S., Sobko O. G. The effect of using nutrient medium enriched with Reynoutria japonica extract on the survivorship of Drosophila melanogaster Meigen, 1830 // Amurian Zoological Journal. 2024. Vol. P. 936–943. DOI: 10.33910/2686-9519-2024-16-4-936-943

Cvetanović A., Zengin G., Zeković Z., Švarc-Gajić J., Ražić S., Damjanović A., Mašković P., Mitić M. Comparative in vitro studies of the biological potential and chemical composition of stems, leaves and berries Aronia melanocarpa's extracts obtained by subcritical water extraction // Food and Chemical Toxicology. 2018. Vol. P. 458–466. DOI: 10.1016/j.fct.2018.09.045

Del Rio D., Rodriguez-Mateos A., Spencer J. P., Tognolini M., Borges G., Crozier A. Dietary (poly)phenolics in human health: structures, bioavailability, and evidence of protective effects against chronic diseases // Antioxid Redox Signal. 2013. Vol. 14. P. 1818–1992. DOI: 10.1089/ars.2012.4581

Fleming T. R., O'Fallon J. R., O'Brien P. C., Harrington D. P. Modified Kolmogorov-Smirnov Test Procedures with Application to Arbitrarily Right-Censored Data // Biometrics. 1980. Vol. 36, No 4. P. 607–625. DOI: 10.2307/2556114

Golubev D., Zemskaya N., Shevchenko O., Shaposhnikov M., Kukuman D., Patov S., Punegov V., Moskalev A. Honeysuckle extract (*Lonicera pallasii* L.) exerts antioxidant properties and extends the lifespan and healthspan of Drosophila melanogaster // Biogerontology. 2022. Vol. 2. P. 215–235. DOI: 10.1007/s10522-022-09954-1

Han S. K., Kwon H. C., Yang J.-S., Kim S., Lee S.-J. V. OASIS portable: User-friendly offline suite for secure survival analysis // Molecules and Cells. 2024. Vol. 2. P. 100011. DOI: 10.1016/j.mocell.2024.100011

He Y., Jasper H. Studying aging in Drosophila // Methods. 2014. Vol. 1. P. 129–33. DOI: 10.1016/j.ymeth.2014.04.008

Jo A. R., Imm J. Y. Effects of aronia extract on lifespan and age-related oxidative stress in Drosophila melanogaster // Food Sci Biotechnol. 2017. Vol. 5. P. 1399–1406. DOI: 10.1007/s10068-017-0180-5

Jurendić T., Ščetar M. Aronia melanocarpa products and by-Products for health and nutrition: A Review // Antioxidants (Basel). 2021. Vol. 7. P. DOI: 10.3390/antiox10071052

Kulling S. E., Rawel H. M. Chokeberry (Aronia melanocarpa) – A review on the characteristic components and potential health effects // Planta Med. 2008. Vol. 13. P. 1625–1634. DOI: 10.1055/s-0028-1088306

Leonard P. J., Brand M. H., Connolly B. A., Obae S. G. Investigation of the Origin of aronia mitschurinii using amplified fragment length polymorphism analysis // HortScience horts. 2013. Vol. 5. P. 520–524. DOI: 10.21273/hortsci.48.5.520

Leri M., Scuto M., Ontario M. L., Calabrese V., Calabrese E. J., Bucciantini M., Stefani M. Healthy effects of plant polyphenols: molecular mechanisms // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 4. P. 1250.

Mantel N. Models for complex contingency tables and polychotomous dosage response curves // Biometrics. 1966. Vol. 1. P. 83–95.

Moskalev A., Chernyagina E., Tsvetkov V., Fedintsev A., Shaposhnikov M., Krut'ko V., Zhavoronkov A., Kennedy B. K. Developing criteria for evaluation of geroprotectors as a key stage toward translation to the clinic // Aging Cell. 2016. Vol. 3. P. 407–415. DOI: 10.1111/acel.12463

Moskalev A., Chernyagina E., de Magalhaes J. P., Barardo D., Thoppil H., Shaposhnikov M., Budovsky A., Fraifeld V. E., Garazha A., Tsvetkov V., Bronovitsky E., Bogomolov V., Scerbacov A., Kuryan O., Gurinovich R., Jellen L. C., Kennedy B., Mamoshina P., Dobrovolskaya E., Aliper A., Kaminsky D., Zhavoronkov A. Geroprotectors.org: a new, structured and curated database of current therapeutic interventions in aging and age-related disease // Aging (Albany NY). 2015. Vol. 7. P. 616–628.

Nas J. S., Manalo R. V., Medina P. M. Peonidin-3-glucoside extends the lifespan of Caenorhabditis elegans and enhances its tolerance to heat, UV, and oxidative stresses // ScienceAsia. 2021. Vol. P. 457. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2021.059

Platonova E. Y., Shaposhnikov M. V., Lee H.-Y., Lee J.-H., Min K.-J., Moskalev A. Black chokeberry (Aronia melanocarpa) extracts in terms of geroprotector criteria // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. P. 570–584. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.06.020

Platonova E. Y., Zemskaya N. V., Shaposhnikov M. V., Golubev D. A., Kukuman D. V., Pakshina N. R., Ulyasheva N. S., Punegov V. V., Patov S. A., Moskalev A. Geroprotective effects of ×Sorbaronia mitschurinii fruit extract on Drosophila melanogaster // Journal of Berry Research. 2022. Vol. 1. P. 73–92. DOI: 10.3233/jbr-211502

Proshkina E., Lashmanova E., Dobrovolskaya E., Zemskaya N., Kudryavtseva A., Shaposhnikov M., Moskalev A. Geroprotective and radioprotective activity of quercetin, (-)-Epicatechin, and Ibuprofen in Drosophila melanogaster // Front Pharmacol. 2016. Vol. P. 505. DOI: 10.3389/fphar.2016.00505

Sammut Bartolo N., Azzopardi L. M., Serracino-Inglott A. Pharmaceuticals and the environment // Early Human Development. 2021. Vol. P. 105218. DOI: 10.1016/j.earlhumdev.2020.105218

Sennikov A., Phipps J. Atlas Florae Europaeae notes, 19–22. Nomenclatural changes and taxonomic adjustments in some native and introduced species of Malinae (Rosaceae) in Europe // Willdenowia. 2013. Vol. P. 33–44. DOI: 10.3372/wi.43.43104

Skupień K., Kostrzewa-Nowak D., Oszmiański J., Tarasiuk J. In vitro antileukaemic activity of extracts from chokeberry (Aronia melanocarpa Elliott) and mulberry (Morus alba L.) leaves against sensitive and multidrug resistant HL60 cells // Phytotherapy Research. 2008. Vol. 5. P. 689–694. DOI: 10.1002/ptr.2411

Stalažs A. ×Sorbaronia mitschurinii: from an artificially created species to an invasion in Europe: repeating the fate of invasive Amelanchier ×spicata, a review // J. Plant. Res. 2021. Vol. 3. P. 497–507. DOI: 10.1007/s10265-021-01278-4

Wang C., Li Q., Redden D. T., Weindruch R., Allison D. B. Statistical methods for testing effects on "maximum lifespan" // Mech Ageing Dev. 2004. Vol. 9. P. 629–632. DOI: 10.1016/j.mad.2004.07.003

Wilkinson J. E., Burmeister L., Brooks S. V., Chan C. C., Friedline S., Harrison D. E., Hejtmancik J. F., Nadon N., Strong R., Wood L. K., Woodward M. A., Miller R. A. Rapamycin slows aging in mice // Aging Cell. 2012. Vol. 4. P. 675–682. DOI: 10.1111/j.1474-9726.2012.00832.x

Xia B., de Belle J. S. Transgenerational programming of longevity and reproduction by post-eclosion dietary manipulation in Drosophila // Aging (Albany NY). 2016. Vol. 5. P. 1115–1134. DOI: 10.18632/aging.100932

Благодарности

Мы выражаем благодарность Ботаническому саду Института биологии Коми НЦ УрО РАН за возможность сбора плодов и листьев аронии Мичурина (Научная коллекция живых растений, № 507428).

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Генетические механизмы стрессоустойчивости и контроля продолжительности жизни для поиска новых мишеней для геропротекторных вмешательств на модели Drosophila melanogaster» № 125013101228-2.

Platonova, E., Golubev, D., Zemskaya, N., Mikhailova, D., Pakshina, N., Timusheva, N., Shaposhnikov, M., Moskalev, A. The effect of extracts of berries and leaves extracts of black chokeberry (*×Sorbaronia mitschurinii*) on the lifespan of *Drosophila melanogaster.* // Principy èkologii. 2025 № 2. P. 71–83. DOI: 10.15393/j1.art.2025.16042

THE EFFECT OF EXTRACTS OF BERRIES AND LEAVES EXTRACTS OF BLACK CHOKEBERRY (×*SORBARONIA MITSCHURINII*) ON THE LIFESPAN OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*

PLATONOVA Elena Yuryevna — *Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia Syktyvkar Kommunisticheskaya St. 28, Dega37@yandex.ru*

GOLUBEV Denis Anatolyevich — *Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia Syktyvkar Kommunisticheskaya St. 28, denismeatboy@gmail.com*

ZEMSKAYA Nadezhda Vladimirovna — *Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia Syktyvkar Kommunisticheskaya St. 28, zemskaya@ib.komisc.ru*

MIKHAILOVA Darya Vladimirovna — *Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia Syktyvkar Kommunisticheskaya St. 28, kukuman@ib.komisc.ru*

PAKSHINA Natalya Rishatovna — *Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia Syktyvkar Kommunisticheskaya St. 28, pakshina.n.r@ib.komisc. ru*

TIMUSHEVA Natalia Sergeevna — *Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia Syktyvkar Kommunisticheskaya St. 28, uliasheva.n.s@ib.komisc.ru*

SHAPOSHNIKOV Mikhail Vyacheslavovich — *PhD, Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Russia Syktyvkar Kommunisticheskaya St. 28, shaposhnikov@ib.komisc.ru*

MOSKALEV Aleksey Aleksandrovich — *D.Sc., Institute of Longevity with a Clinic of Rehabilitation and Preventive Medicine, Russian Scientific Centre of Surgery named after Academician B. V. Petrovsky, 119435 Russia Moscow, amoskalev@list.ru*

Keywords:
leaves
berries
chokeberry extract
life span
Drosophila melanogaster
×Sorbaronia mitschurinii

Summary: Black chokeberry (xSorbaronia mitschurinii) is a valuable fruit crop with a high content of a wide range of polyphenols and other biologically active substances. The fruits contain flavonoids (quercetin, rutin), phenolic acids (neochlorogenic, chlorogenic and caffeic acids), anthocyanins (various cyanidins), as well as vitamins (C, E, B2, B9, P, PP) and minerals (zinc, copper, iron, cobalt). The leaves are dominated by flavonoids (rutin, quercetin) and phenolic acids in the form of caffeic, chlorogenic and rosmarinic acids. It is known that these biologically active substances have geroprotective potential. Previously, we found that short-term use of chokeberry extract from the 4th to the 6th week of life had a positive effect on the lifespan of Drosophila melanogaster. Therefore, we analyzed the effect of fruit extracts (0.01, 0.1, 1, 2.5, 5 and 10 mg/ml) and leaves (0.01, 0.1, 1 and 5 mg/ml) of chokeberry on life expectancy of D.

melanogaster when imago was treated from the age of 4 weeks to the end of life It was found that the berry extract at a concentration of 0.1 mg/ml decreased the median and maximum lifespan of males by 7 % and 2 %, respectively, while in females, the extract at a concentration of 1 mg/ml increased the median and maximum lifespan by 5 % and 4 %, respectively. At the same time, the leaf extract decreased the median and maximum lifespan of males. In females, the leaf extract at a concentration of 0.1 mg/ml increased the median lifespan by 2 %, while at a concentration of 0.01 mg/ml it decreased it by 5 %. Thus, further studies of chokeberry fruit and leaf extracts are needed to identify the mechanisms of influence on the adaptive capabilities of both sexes of D. melanogaster.

Reviewer: N. B. Macishina

Received on: 03 April 2025 **Published on:** 28 May 2025

References

Borovaya S., Sobko O. G. The effect of using nutrient medium enriched with Reynoutria japonica extract on the survivorship of Drosophila melanogaster Meigen, 1830, Amurian Zoological Journal. 2024. Vol. P. 936–943. DOI: 10.33910/2686-9519-2024-16-4-936-943

Cvetanović A., Zengin G., Zeković Z., Švarc-Gajić J., Ražić S., Damjanović A., Mašković P., Mitić M. Comparative in vitro studies of the biological potential and chemical composition of stems, leaves and berries Aronia melanocarpa's extracts obtained by subcritical water extraction, Food and Chemical Toxicology. 2018. Vol. P. 458–466. DOI: 10.1016/j.fct.2018.09.045

Del Rio D., Rodriguez-Mateos A., Spencer J. P., Tognolini M., Borges G., Crozier A. Dietary (poly)phenolics in human health: structures, bioavailability, and evidence of protective effects against chronic diseases, Antioxid Redox Signal. 2013. Vol. 14. P. 1818–1992. DOI: 10.1089/ars.2012.4581

Fleming T. R., O'Fallon J. R., O'Brien P. C., Harrington D. P. Modified Kolmogorov-Smirnov Test Procedures with Application to Arbitrarily Right-Censored Data, Biometrics. 1980. Vol. 36, No 4. P. 607–625. DOI: 10.2307/2556114

Gelashvili D. B. Bezel' V. S. Romanova E. B. Bezrukov M. E. Silkin A. A. Nizhegorodcev A. A. Principles and methods of environmental toxicology, Pod red. prof. D. B. Gelashvili. N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2016. 702 p.

Golubev D., Zemskaya N., Shevchenko O., Shaposhnikov M., Kukuman D., Patov S., Punegov V., Moskalev A. Honeysuckle extract (Lonicera pallasii L.) exerts antioxidant properties and extends the lifespan and healthspan of Drosophila melanogaster, Biogerontology. 2022. Vol. 2. P. 215–235. DOI: 10.1007/s10522-022-09954-1

Han S. K., Kwon H. C., Yang J, S., Kim S., Lee S, J. V. OASIS portable: User-friendly offline suite for secure survival analysis, Molecules and Cells. 2024. Vol. 2. P. 100011. DOI: 10.1016/j.mocell.2024.100011

He Y., Jasper H. Studying aging in Drosophila, Methods. 2014. Vol. 1. P. 129–33. DOI: 10.1016/j.ymeth.2014.04.008

Jo A. R., Imm J. Y. Effects of aronia extract on lifespan and age-related oxidative stress in Drosophila melanogaster, Food Sci Biotechnol. 2017. Vol. 5. P. 1399–1406. DOI: 10.1007/s10068-017-0180-5

Jurendić T., Ščetar M. Aronia melanocarpa products and by-Products for health and nutrition: A Review, Antioxidants (Basel). 2021. Vol. 7. P. DOI: 10.3390/antiox10071052

Kulling S. E., Rawel H. M. Chokeberry (Aronia melanocarpa) – A review on the characteristic components and potential health effects, Planta Med. 2008. Vol. 13. P. 1625–1634. DOI: 10.1055/s-0028-1088306

Leonard P. J., Brand M. H., Connolly B. A., Obae S. G. Investigation of the Origin of aronia mitschurinii using amplified fragment length polymorphism analysis, HortScience horts. 2013. Vol. 5. P. 520–524. DOI: 10.21273/hortsci.48.5.520

Leri M., Scuto M., Ontario M. L., Calabrese V., Calabrese E. J., Bucciantini M., Stefani M. Healthy effects of plant polyphenols: molecular mechanisms, International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 4. P. 1250.

Mantel N. Models for complex contingency tables and polychotomous dosage response curves, Biometrics. 1966. Vol. 1. P. 83–95.

Moskalev A., Chernyagina E., Tsvetkov V., Fedintsev A., Shaposhnikov M., Krut'ko V., Zhavoronkov A., Kennedy B. K. Developing criteria for evaluation of geroprotectors as a key stage toward translation to the clinic, Aging Cell. 2016. Vol. 3. P. 407–415. DOI: 10.1111/acel.12463

Moskalev A., Chernyagina E., de Magalhaes J. P., Barardo D., Thoppil H., Shaposhnikov M., Budovsky A., Fraifeld V. E., Garazha A., Tsvetkov V., Bronovitsky E., Bogomolov V., Scerbacov A., Kuryan O., Gurinovich R., Jellen L. C., Kennedy B., Mamoshina P., Dobrovolskaya E., Aliper A., Kaminsky D., Zhavoronkov A. Geroprotectors.org: a new, structured and curated database of current therapeutic

interventions in aging and age-related disease, Aging (Albany NY). 2015. Vol. 7. P. 616–628.

Nas J. S., Manalo R. V., Medina P. M. Peonidin-3-glucoside extends the lifespan of Caenorhabditis elegans and enhances its tolerance to heat, UV, and oxidative stresses, ScienceAsia. 2021. Vol. P. 457. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2021.059

Nowak D. Tarasiuk J. MichxElliott) and mulberry (Morus alba L.) leaves against sensitive and multidrug resistant HL60 cells, Phytotherapy Research. 2008. Vol. 5. P. 689–694. DOI: 10.1002/ptr.2411

Platonova E. Y., Shaposhnikov M. V., Lee H, Y., Lee J, H., Min K, J., Moskalev A. Black chokeberry (Aronia melanocarpa) extracts in terms of geroprotector criteria, Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. P. 570–584. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.06.020

Platonova E. Y., Zemskaya N. V., Shaposhnikov M. V., Golubev D. A., Kukuman D. V., Pakshina N. R., Ulyasheva N. S., Punegov V. V., Patov S. A., Moskalev A. Geroprotective effects of ×Sorbaronia mitschurinii fruit extract on Drosophila melanogaster, Journal of Berry Research. 2022. Vol. 1. P. 73–92. DOI: 10.3233/jbr-211502

Platonova E. Yu. Golubev D. A. Patov S. A. Nekrasova P. S. Shaposhnikov M. V. Investigation of the effect of the natural anthocyanin delphinidin on the life expectancy of Drosophila melanogaster, Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN. 2024. No. 9 (75). P. 92–97. DOI: 10.19110/1994-5655-2024-9-92-97

Proshkina E., Lashmanova E., Dobrovolskaya E., Zemskaya N., Kudryavtseva A., Shaposhnikov M., Moskalev A. Geroprotective and radioprotective activity of quercetin, (-)-Epicatechin, and Ibuprofen in Drosophila melanogaster, Front Pharmacol. 2016. Vol. P. 505. DOI: 10.3389/fphar.2016.00505

Sammut Bartolo N., Azzopardi L. M., Serracino-Inglott A. Pharmaceuticals and the environment, Early Human Development. 2021. Vol. P. 105218. DOI: 10.1016/j.earlhumdev.2020.105218

Sennikov A., Phipps J. Atlas Florae Europaeae notes, 19–22. Nomenclatural changes and taxonomic adjustments in some native and introduced species of Malinae (Rosaceae) in Europe, Willdenowia. 2013. Vol. P. 33–44. DOI: 10.3372/wi.43.43104

Skvorcov A. K. Maytulina Yu. K. Gorbunov Yu. N. About the place, time and possible mechanism of the emergence of cultural aronia, Byulleten' MOIP. Otd. biol. 1983. T. 88. P. 88–96.

Skvorcov A. K. Maytulina Yu. K. About the differences between cultural aronia and its wild ancestors, Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada. 1982. Vyp. 126. P. 35–40.

Stalažs A. ×Sorbaronia mitschurinii: from an artificially created species to an invasion in Europe: repeating the fate of invasive Amelanchier ×spicata, a review, J. Plant. Res. 2021. Vol. 3. P. 497–507. DOI: 10.1007/s10265-021-01278-4

Wang C., Li Q., Redden D. T., Weindruch R., Allison D. B. Statistical methods for testing effects on «maximum lifespan», Mech Ageing Dev. 2004. Vol. 9. P. 629–632. DOI: 10.1016/j.mad.2004.07.003

Wilkinson J. E., Burmeister L., Brooks S. V., Chan C. C., Friedline S., Harrison D. E., Hejtmancik J. F., Nadon N., Strong R., Wood L. K., Woodward M. A., Miller R. A. Rapamycin slows aging in mice, Aging Cell. 2012. Vol. 4. P. 675–682. DOI: 10.1111/j.1474-9726.2012.00832.x

Xia B., de Belle J. S. Transgenerational programming of longevity and reproduction by post-eclosion dietary manipulation in Drosophila, Aging (Albany NY). 2016. Vol. 5. P. 1115–1134. DOI: 10.18632/aging.100932

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 57.044

ОЦЕНКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ РЕДИСА ПОСЕВНОГО (*RAPHANUS SATIVUS*) В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ

СИНДИРЕВА Анна Владимировна — *доктор биологических наук, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, sindireva72@mail.ru*

ЗАОСТРОВСКАЯ Вероника Владимировна — *ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, stud0000212862@utmn.ru*

ВЕШКУРЦЕВА Светлана Семеновна — *ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, s.s.veshkurceva@utmn.ru*

Ключевые слова:
тяжелые металлы
нефтепродукты
редис
пигменты фотосинтеза
оксидативный стресс
антиоксидантная активность

Аннотация: При фитотестировании загрязненных почв интегральной оценкой служат показатели роста и развития растений. В то же время представляют особый интерес биохимические маркеры, среди которых особое значение имеют продукты оксидативного стресса, вещества-антиоксиданты. В статье проведена оценка морфологических изменений и антиоксидантной активности растительного организма на примере тест-культуры редиса посевного (Raphanus sativus) в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами. Проведено пять серий опытов методом проростков по следующей схеме: 1) контроль – почвогрунт; 2) опытные образцы: с внесением в почву ацетатных солей меди (в дозах от 27.5 до 110 мг/кг), цинка (11.5–46 мг/кг), свинца (15–60 мг/кг), кадмия (0.25–1 мг/кг), нефтепродуктов (100–1000 мг/кг). Изучены лабораторная всхожесть семян, показатели роста и развития редиса посевного в условиях воздействия тяжелых металлов и нефтепродуктов. Внесение цинка (в дозах от 12.5 до 46 мг/кг) и свинца (в дозах от 15 до 60 мг/кг) способствовало увеличению лабораторной всхожести семян редиса посевного. Медь не оказала значимого влияния на начальные показатели роста и развития редиса. Кадмий и нефтепродукты в исследуемых дозах снижают лабораторную всхожесть семян редиса. Выявлено действие экотоксикантов на содержание компонентов пигментов фотосинтеза, количество фенольных и флавоноидных соединений. Оценено содержание продуктов перекисного окисления липидов (диеновых конъюгатов и оснований Шиффа) у растений в условиях загрязнения

почв Cd, Pb, Zn, Cu и нефтепродуктами. Определено состояние антиоксидантной активности у растений в ответ на стресс, вызванный дополнительным поступлением в почву экотоксикантов. Уровень прооксидантных и антиоксидантных процессов в растительном организме зависит от дозы и химических свойств вносимых тяжелых металлов и нефтепродуктов

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 10 февраля 2025 года **Подписана к печати**: 28 мая 2025 года

Введение

В настоящее время актуальными являются наблюдения за изменениями состояния окружающей среды, вызванными антропогенными причинами. Система этих наблюдений и прогнозов составляет суть экологического мониторинга. В этих целях все чаще применяются и используются достаточно эффективные и недорогие способы диагностики состояния окружающей среды – биоиндикация и биотестирование, в частности, по состоянию растений.

При фитотестировании загрязненных почв интегральной оценкой служат показатели роста и развития растений. В то же время представляют особый интерес биохимические маркеры. В частности, при неблагоприятных условиях растения испытывают окислительный стресс, при этом повышается активность внутриклеточной антиоксидантной защиты растительного организма.

Использование биодиагностики с помощью биохимических маркеров в экологическом мониторинге позволяет более точно определить воздействие антропогенных факторов на окружающую среду и способствует разработке эффективных стратегий по ее охране и восстановлению. Кроме того, такой подход к биомониторингу является относительно дешевым и доступным, что позволяет применять его на различных территориях – как фоновых, так и подверженных антропогенной нагрузке.

Использование растений тест-культур для биотестирования, где маркерами являются продукты оксидативного стресса, вещества-антиоксиданты, представляется перспективным. В качестве растений тест-культур можно использовать кресс-салат, редис, овес (Ловинецкая и др., 2015).

Показатели перекисного окисления липидов (ПОЛ) и антиоксидантная активность могут быть критериями поражения растений экотоксикантами, т. ч. тяжелыми металлами (ТМ) и нефтепродуктами (НП) (Devi Chinmayee et al., 2014; Emamverdian et al., 2015). Таким образом, необходимость оценки состояния ПОЛ и уровня антиоксидантов у растений, наиболее чувствительных к загрязнителям тест-культур, представляет теоретический и практический интерес с позиции проведения биомониторинга.

Цель работы – оценить морфологические изменения и антиоксидантную активность растительного организма на примере тест-культуры редиса посевного (*Raphanus sativus*) в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами.

Задачи:

– изучить лабораторную всхожесть семян, показатели роста и развития редиса посевного (*R. sativus*) в условиях воздействия тяжелых металлов и нефтепродуктов;

– выявить действие экотоксикантов на содержание компонентов пигментов фотосинтеза, количество фенольных и флавоноидных соединений;

– оценить содержание продуктов перекисного окисления липидов у растений в условиях загрязнения почв Cd, Pb, Zn, Cu и нефтепродуктами;

– определить состояние антиоксидантной активности у растений в ответ на стресс, вызванный дополнительным поступлением в почву тяжелых металлов и нефтепродуктов.

Материалы

Исследование проводилось на базе Лаборатории экологического мониторинга кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук Тюменского государственного университета.

Объектом исследования стал редис посевной (*R. sativus*) – однолетнее растение, которое относится к отделу Цветковые, классу Двудольные, порядку Капустоцветные, семейству Капустные. Редис посевной высоко чувствителен к загрязнению почвы, в т. ч. тяжелыми металлами, нефтепродуктами, что и обусловило выбор этот культуры в качестве тест-объекта.

Методы

Для решения поставленных задач проведена серия лабораторных опытов. В пластиковые контейнеры объемом 500 мл было помещено 200 г почвы. Высевали по 35 шт.

семян редиса. Эксперимент проводился в течение 15 дней. На третий, десятый и пятнадцатый день определяли количество проросших семян.

Проведено пять серий опытов методом проростков по следующей схеме: 1) контроль – почвогрунт (К); 2) опытные образцы (О): с внесением в почву в виде сухих ацетатных солей: меди (опыт 1), цинка (опыт 2), свинца (опыт 3), кадмия (опыт 4); нефтепродуктов (дизельное топливо) (опыт 5). Ацетатные соли традиционно хорошо растворимы в воде, благодаря чему противоионы быстро становятся доступными корням растений, легко проникая через мембраны клеток, что позволяет наблюдать результаты эксперимента в более короткие сроки.

Все опыты были заложены в шестикратной повторности. Дозы тяжелых металлов рассчитаны исходя из их ПДК в почве и составляли ориентировочно 0.5, 1, 2 ПДК в почве (по меди, свинцу и кадмию рассчитывали по валовому содержанию, по цинку – для подвижной формы). Установили три дозы нефтепродуктов – «фоновое содержание», «повышенный фон», «загрязненные почвы» согласно разработанному критерию (Пиковский и др., 2003). Схема проведения лабораторного опыта представлена в табл. 1.

Таблица 1. Схема проведения лабораторного опыта

Загрязнитель	Варианты, условное обозначение	Доза вносимых металлов, мг/кг	Загрязнитель	Варианты	Доза вносимых металлов, мг/кг
Контроль	Контроль (К)	0	Pb	O1Pb (0.5 ПДК)	15
Cu	Опыт О1 Cu	27.5		O2 Pb (1 ПДК)	30
	O2 Cu	55		O3 Pb (2 ПДК)	60
	O3 Cu	110	Нефтепродукты	O1 НП	100
Zn	O1Zn	11.5		O2 НП	200
	O2 Zn	23		O3 НП	400
	O3 Zn	46		O4 НП	1000
Cd	O1Cd (0.5 ПДК)	0.25			
	O2 Cd (1 ПДК)	0.5			
	O3 Cd (2 ПДК)	1			

По окончании эксперимента определяли начальные показатели роста и развития редиса, содержание в растительной ткани продуктов перекисного окисления липидов и показатели антиоксидантной активности. Использовали следующую методику для определение содержания пигментов фотосинтеза (Шульгин, Ничипорович, 1974). Навеску растительного материала массой 100 мг растерли с добавлением безводного сульфата натрия в фарфоровой ступке до состояния гомогенного зеленого порошка. Затем добавили 8 мл 96 % этилового спирта. В надосадочной жидкости определили концентрацию пигментов фотосинтеза с использованием спектрофотометра. Показания снимали при длине волны 662, 644, 440 нм.

Методика определения фенольных соединений (Федорова, Никольская, 2001) основана на окислении перманганатом калия гидроксильных групп растительных фенолов в карбонильные группы с образованием хинонов. Отщепляющиеся от растительных фенолов протоны присоединяются к индигокармину, что вызывает смену окраски индикатора с синей на желтую. Навеску массой 1–3 г зеленой части растения, перемолотого в фарфоровой ступке, нагревали в стаканчике на 100 мл в течение 15 минут с добавлением 40 мл дистиллированной воды на кипящей водяной бане при интенсивном перемешивании. Затем получившийся экстракт охладили, отфильтровали и довели до 100 мл. 10 мл полученного экстракта перенесли в стакан объемом 800–1000 мл, добавили 750 мл дистиллированной воды и 25 мл раствора индигокармина. Смесь титровали при энергичном перемешивании 0.1н раствора $KMnO_4$. Окончание титрования установили по появлению в растворе золотисто-желтого оттенка.

Методика определения содержания флавоноидов описана в работе Н. Н. Третьякова с соавт. (2000). Для определения взяли навеску массой 0.25 г сухого растительного материала, измельчили в фарфоровой ступке, поместили в пробирку на 30 мл с обратным холодильником, залили 15 мл 70 % спирта и

поставили на водяную баню на 30 минут. Затем содержимое пробирки отфильтровали в колбу, а остаток промыли 10 мл 70 % спирта. Объем довели до 25 мл (раствор А). Затем в опытную пробирку добавили 1 мл раствора А, 0.4 мл 2 % раствора хлорида алюминия, а через 10 минут 0.02 мл уксусной кислоты и 3.6 мл 70 % спирта. В контрольную пробирку добавили 1 мл раствора А, через 10 минут 0.02 мл уксусной кислоты и 4 мл 70 % спирта. Для определения оптической плотности стандарта в пробирку поместили 0.2 мл раствора рутина, 0.4 мл хлорида алюминия, через 10 минут 0.02 мл уксусной кислоты и 4.4 мл спирта. За контроль стандарта была взята пробирка с 0.4 мл хлорида алюминия, 0.02 мл уксусной кислоты и 4.6 мл 70 % спирта.

Оптическую плотность опыта определяли на SmartSpecPlus, BioRad напротив контроля в кювете 10 мм при длине волны 410 нм. Оптическую плотность стандарта определяли при тех же условиях напротив контроля стандарта.

Методика определение диеновых конъюгатов и оснований Шиффа состоит в следующем (Шведова, Полянский, 1992). Для определения диеновых конъюгатов к 0.2 мл экстракта растений добавили 4 мл смеси гептан – изопропанол (1:1) и встряхивали 10–15 мин. Далее в пробирку добавили 1 мл раствора HCl (pH 2) и 2 мл гептана, интенсивно встряхивали и после отстаивания и расслоения смеси на фазы отобрали верхний, гептановый слой, который использовали для определения в нем диеновых конъюгатов по степени светопоглощений вместо экстракта растений 0.2 мл воды, подвергнутый всем вышеперечисленным видам обработки. Для определения оснований Шиффа измельчили навеску растительного материала с небольшим количеством Na_2SO_4, поместили в пробирку, добавили 4 мл смеси гептан – изопропанол (1:1) и встряхивали 10 минут. Затем добавили 1 мл раствор HCl (pH 2,0) и 2 мл чистого гептана. Отстаивали в течение 20 минут. После этого отобрали верхний слой, замерили его объем (V, мл) и измерили оптическую плотность образцов (Do) и чистого гептана (Dp) при длине волны 365 нм на спектрофотометре SmartSpecPlus, BioRad по «контрольной» пробе, которую приготовили так же, как и остальные, но вместо растительного экстракта добавили гептан.

Статистическая обработка данных проводилась в программе MS EXCEL. Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (p), при этом критическим уровнем значимости принимали $p \leq 0.05$.

Результаты

Одним из важнейших показателей, позволяющих выявить первичную реакцию семян растений на дополнительное поступление экотоксикантов, является их всхожесть. Количество проросших семян редиса на разных этапах эксперимента представлено в табл. 2

При внесении меди в почву не выявлено статистически достоверных различий значений количества всхожих семян на вариантах опыта по сравнению с контролем во все сроки эксперимента (см. табл. 2). Отмечена лишь тенденция повышения всхожести семян при внесении меди в дозе 27.5 мг/кг. Микроконцентрации ионов меди являются важным компонентом для нормального метаболизма большинства клеточных организмов, однако длительное воздействие повышенных концентраций меди приводит к негативным последствиям для растений (Петухов и др., 2018).

Увеличение количества проросших семян редиса посевного по сравнению с контролем отмечалось при внесении цинка в почву в дозах от 11.5 до 46 мг/кг на протяжении всего эксперимента (см. табл. 2).

Одним из опаснейших тяжелых металлов является кадмий. Повышенное содержание кадмия в почве вызывает такие изменения для растений, как образование бурых листьев, хлороз, скручивание листьев, красноватые жилки и бурые недоразвитые корни. В результате определения количества проросших семян редиса посевного при загрязнении почвы кадмием выявлено достоверное снижение данного показателя на всех вариантах опыта (см. табл. 2).

Повышенный уровень свинца в почве может угнетать рост и продуктивность растений, произрастающих на ней, а низкая концентрация может активизировать некоторые жизненно важные процессы в растительном организме. В наших исследованиях установлено стимулирующее действие свинца на всхожесть редиса при дозах от 15 до 60 мг/кг (см. табл. 2).

У растений редиса посевного выявлена высокая чувствительность к нефтепродуктам. Так, эксперимент показал, что на варианте О3 с концентрацией нефтепродуктов 400 мг/кг всхожесть была самая низкая по отношению к контролю (см. табл. 2).

Таблица 2. Количество проросших семян редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Варианты эксперимента	Количество семян	Количество проросших семян		
		3-й день	10-й день	15-й день
Варианты с применением цинка (Zn)				
К (контроль)	100	70 ± 2.8	83 ± 0.8	83 ± 0.8
О1	100	77 ± 3.1	89 ± 1.3	89 ± 1.3
О2	100	63 ± 1	79 ± 1.2	79 ± 1.2
О3	100	49 ± 3.5	81 ± 1.5	81 ± 1.5
Варианты с применением меди (Cu)				
К (контроль)	100	81 ± 0.8	91 ± 0.8	91 ± 0.8
О1	100	86 ± 0.2	92 ± 0.6	92 ± 0.6*
О2	100	86 ± 1.4	95 ± 0.8	95 ± 0.8
О3	100	93 ± 0.8	95 ± 1.3	95 ± 1.3
Варианты с применением меди (Cd)				
К (контроль)	100	70 ± 0.6	83 ± 1.4	93 ± 1
О1	100	56 ± 0.8*	64 ± 2.9*	70 ± 2.02*
О2	100	54 ± 2.5*	60 ± 1.7*	68 ± 1.7*
О3	100	65 ± 0.3*	66 ± 0	76 ± 2.4
Варианты с применением меди (Pb)				
К (контроль)	100	67 ± 2.3	68 ± 2.1	69 ± 2.08
О1	100	74 ± 2.4*	75 ± 2.6*	78 ± 1.7*
О2	100	84 ± 0.5*	84 ± 0.5*	85 ± 0.3*
О3	100	76 ± 0.3*	76 ± 0.3*	77 ± 0.3*
Варианты с применением нефтепродуктов				
К(контроль)	100	83 ± 1.4	90 ± 0.5	92 ± 0.3
О1	100	80 ± 1.6	83 ± 1.4*	85 ± 0.8*
О2	100	65 ± 4.4*	71 ± 4.4*	72 ± 4.5*
О3	100	59 ± 5.3*	73 ± 2.8*	74 ± 2.7*
О4	100	68 ± 1.2*	80 ± 0.8*	83 ± 1.4*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

В целом действие тяжелых металлов и нефтепродуктов на прорастание семян редиса зависело от их дозы и химических свойств.

Влияние тяжелых металлов и нефтепродуктов на морфометрические показатели редиса посевного представлено в табл. 3..

Согласно данным табл. 1, медь, цинк, свинец и нефтепродукты не способствовали изменению начальных показателей роста редиса. В то же время кадмий во всех применяемых дозах стимулирует рост корня и листа. Пи этом данные показатели увеличиваются прямо пропорционально повышению концентрации металла. Необходимо отметить, что в большинстве литературных данных кадмий рассматривается как фактор, оказывающий негативное влияние на рост растений, однако имеются данные и о стимулирующем действии кадмия (Синдирева, 2011), что подтверждается и нашими исследованиями. Тем не менее токсическое действие кадмия может проявиться на более поздних этапах онтогенеза.

Для нейтрализации возникающих нарушений в случае токсического воздействия поллютантов требуются большие энергетические затраты, которые компенсируются работой фотосинтетических пигментов, отражающих энергетический статус клетки. В ходе фотосинтеза вырабатываются органические вещества, которые используются для нейтрализации токсического действия нефтепродуктов и тяжелых металлов. Содержание хлорофиллов и каротиноидов является важным показателем, который позволяет оценить функциональное состояние растений, т. к. фотосинтетический аппарат является очень чувствительным к изменяющимся условиям внешний среды. При негативном воздействии экотоксикантов на раститель-

Таблица 3. Морфометрические показатели редиса посевного (*R. sativus*) в ходе лабораторного эксперимента

Варианты эксперимента		Длина, см (*M* ± *m*)		
		гипокотиля	корня	листа
Варианты с применением меди (Zu)	К (контроль)	0.5 ± 0.2	3.0 ± 0.1	0.5 ± 0.2
	О1	0.6 ± 0.3	3.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1
	О2	0.5 ± 0.4	3.6 ± 0.3	0.3 ± 0.2
	О3	0.5 ± 0.4	3.8 ± 0.4	0.4 ± 0.3
Варианты с применением меди (Cu)	К (контроль)	0.2 ± 0.2	2.5 ± 0.1	0.3 ± 0.2
	О1	0.1 ± 0.2	2.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1
	О2	0.2 ± 0.1	2.6 ± 0.3	0.4 ± 0.2
	О3	0.3 ± 0.2	2.8 ± 0.2	0.5 ± 0.2
Варианты с применением кадмия (Cd)	К (контроль)	0.2 ± 0.2	2.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1
	О1	0.2 ± 0.1	3.2 ± 0.2*	0.4 ± 0.1
	О2	0.3 ± 0.2	3.5 ± 0.3*	0.5 ± 0.2
	О3	0.5 ± 0.2	3.8 ± 0.2*	0.8 ± 0.2*
Варианты с применением свинца (Pb)	К (контроль)	0.3 ± 0.1	2.3 ± 0.2	0.4 ± 0.1
	О1	0.2 ± 0.2	2.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1
	О2	0.2 ± 0.1	3.0 ± 0.3	0.5 ± 0.2
	О3	0.4 ± 0.2	3.6 ± 0.4	0.6 ± 0.1
Варианты с применением нефтепродуктов	К (контроль)	0.2 ± 0.1	2.5 ± 0.2	0.5 ± 0.1
	О1	0.2 ± 0.2	2.8 ± 0.3	0.3 ± 0.2
	О2	0.3 ± 0.1	3.3 ± 0.5	0.4 ± 0.3
	О3	0.2 ± 0.2	3.5 ± 0.5	0.4 ± 0.2
	О4	0.2 ± 0.2	3.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3

Примечание. *– значимые различия между контролем и вариантом опыта.

ный организм концентрация фотосинтетических пигментов уменьшается (Осипова и др., 2013). Наряду с пигментами, которые участвуют непосредственно в процессе фотосинтеза, особый интерес представляют каротиноиды, которые выполняют антиоксидантные функции. Содержание пигментов фотосинтеза у редиса посевного при внесении в почву по окончании экспериментов представлено в табл. 4.

Согласно данным табл. 4, с увеличением дозы цинка, внесенного в почву, концентрация хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в проростках редиса достоверно не изменяется. Применение меди способствовало увеличению уровня хлорофилла *a*, хлорофилла *b* в проростках редиса. При этом рост концентрации пигментов отмечен до дозы 55 мг/кг. С дальнейшим увеличением концентрации микроэлемента уровень хлорофилла *a* и хлорофилла *b* снижается. Концентрация каротиноидов в растениях редиса при внесении меди в дозах от 27.5 до 110 мг/кг достоверно не отличается от уровня контроля. При внесении кадмия отмечается снижение уровня хлорофилла *b* и каротиноидов в растениях редиса при максимальной дозе кадмия 1 мг/кг. Несмотря на доказанное токсическое действие свинца, в определенных концентрациях этот металл оказывает положительное влияние на метаболизм растений. Содержание хлорофилла *a,* хлорофилла *b* увеличивается до дозы свинца, внесенного в почву, 30 мг/кг. С повышением его дозы до 60 мг/кг уровень пигментов снижается. Аналогичная тенденция отмечается и при оценке уровня каротиноидов. Возможно, увеличение содержания каротиноидов объясняется тем, что кроме активного участия в процессе фотосинтеза они являются антиоксидантами и ликвидируют избыток образовавшихся активных форм кислорода и свободных радикалов, возможно, возрастающих с повышением дозы металла (Никитина и др., 2005). Отмечена тенденция снижения концентрации пигментов в растениях редиса с увеличением содержания нефтепродуктов в почве до 1000 мг/кг.

Одними из биохимических показателей, отражающих степень повреждения клеток растений, являются показатели перекисного окисления липидов (ПОЛ), продукты ко-

Таблица 4. Содержание пигментов фотосинтеза в растениях редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Варианты эксперимента		Содержание пигментов фотосинтеза (мг/г сырой массы), *M* ± *m*		
		хлорофилл *a*	хлорофилл *b*	каротиноиды
Варианты с применением цинка (Zn)	К (контроль)	0.009 ± 0.001	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.007
	О1	0.01 ± 0.003	0.05 ± 0.006	0.02 ± 0.001
	О2	0.01 ± 0.008	0.05 ± 0.003	0.01 ± 0.004
	О3	0.01 ± 0.001	0.04 ± 0.003	0.01 ± 0.008
Варианты с применением меди (Cu)	К (контроль)	0.009 ± 0.001	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.003
	О1	0.012 ± 0.001*	0.03 ± 0.003	0.008 ± 0.001
	О2	0.017 ± 0.003*	0.06 ± 0.004*	0.02 ± 0.001
	О3	0.005 ± 0.004*	0.027 ± 0.003	0.013 ± 0.008
Варианты с применением кадмия (Cd)	К (контроль)	0.009 ± 0.01	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.003
	О1	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.005	0.009 ± 0.001
	О2	0.01 ± 0.005	0.01 ± 0.001*	0.01 ± 0.006
	О3	0.02 ± 0.005	0.01 ± 0.0005*	0.005 ± 0.001*
Варианты с применением свинца (Pb)	К (контроль)	0.009 ± 0.001	0.03 ± 0.002	0.01 ± 0.003
	О1	0.013 ± 0.02*	0.01 ± 0.003	0.008 ± 0.001
	О2	0.018 ± 0.02*	0.04 ± 0.004	0.02 ± 0.001*
	О3	0.005 ± 0.001*	0.02 ± 0.003	0.013 ± 0.0008
Варианты с применением нефтепродуктов	К (контроль)	0.009 ± 0.002	0.07 ± 0.002	0.026 ± 0.006
	О1	0.005 ± 0.003	0.06 ± 0.007	0.023 ± 0.001
	О2	0.006 ± 0.001	0.07 ± 0.007	0.028 ± 0.001
	О3	0.006 ± 0.001	0.04 ± 0.002*	0.016 ± 0.002*
	О4	0.006 ± 0.001	0.03 ± 0.006	0.014 ± 0.001*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

торого – диеновые конъюгаты и основания Шиффа (Anjum et al., 2015). Данные о влиянии тяжелых металлов и нефтепродуктов на показатели ПОЛ представлены в табл. 5.

Перекисное окисление липидов – свободнорадикальное окисление полиненасыщенных жирных кислот. Первичным продуктом ПОЛ является гидроперекись, затем образуется гидроперекисный радикал, что, в свою очередь, ведет к формированию системы соединений, сопряженных двойной связью, – диеновых конъюгатов. Гидроперекиси неустойчивы, и при распаде образуются вторичные продукты ПОЛ: альдегиды, кетоны, спирты. При взаимодействии первичных органических веществ с альдегидами и кетонами образуются конечные продукты ПОЛ – основания Шиффа. На сегодняшний день известно большое количество данных, которые позволяют сделать вывод, что увеличение свободнорадикальных процессов и перекисного окисления липидов – многофункциональная клеточная реакция на стресс у растений. К тому же литературные данные свидетельствуют о том, что интенсивность перекисного окисления липидов и свободнорадикальных процессов во время стресса повышается из-за нарушения антиоксидантно-проксидантного гомеостаза (Ерофеева, 2016).

Анализ содержания первичных продуктов ПОЛ – диеновых конъюгатов при влиянии цинка показал, что у редиса посевного во всех вариантах опыта концентрация этих веществ была ниже ($p < 0.05$), чем у растений контрольного варианта.

При внесении в почву меди в дозах 55–110 мг/кг отмечено повышение концентрации диеновых конъюгатов относительно контроля ($p < 0.05$), что свидетельствует о негативном действии высоких концентраций меди на растительный организм, наличие повреждений клеток и их угнетенное состояние. В то же время при внесении меди в дозах 27.5 мг/кг уровень диеновых конъюгатов снижается по сравнению с контролем.

Анализ содержания продуктов ПОЛ у редиса посевного показал, что при загрязнении почв кадмием и свинцом во всех вариантах опыта концентрация диеновых конъюгатов

Таблица 5. Содержание диеновых конъюгатов у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация диеновых конъюгатов, усл. ед./мг липидов
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	0.9 ± 0.002
О1	0.6 ± 0.002*
О2	0.6 ± 0.003*
О3	0.609 ± 0.001*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	1.1 ± 0.01
О1	0.9 ± 0.002*
О2	1.5 ± 0.01*
О3	1.2 ± 0.0005*
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	1.2 ± 0.4
О1	1.02 ± 0.01*
О2	0.8 ± 0.1*
О3	0.6 ± 0.001*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	3.7 ± 0.01
О1	0.3 ± 0.005
О2	0.4 ± 0.02
О3	0.1 ± 0.002
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	0.7 ± 0.004
О1	0.4 ± 0.01*
О2	0.7 ± 0.004
О3	0.5 ± 0.0005*
О4	0.09 ± 0.005*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

была ниже ($p < 0.05$), чем у растений контрольного варианта (см. табл. 5). Наибольшее снижение установлено при применении свинца, при этом уровень метаболитов снижался от 9.5 до 19 раз. Следует отметить, что чем выше доза внесения экотоксикантов, тем ниже содержание диеновых конъюгатов. Содержание диеновых конъюгатов у редиса посевного при действии нефтепродуктов также снижается по сравнению с контролем (см. табл. 5).

Снижение содержания продуктов ПОЛ может быть обусловлено следующими причинами. По всей вероятности, антиоксидантные системы успешно активизируются в условиях стресса, ликвидируют избыток активных форм кислорода и тем самым предотвращают развитие процессов ПОЛ. Растения, произрастающие в неблагоприятных условиях, могут вырабатывать механизмы блокирования поступления токсикантов с помощью хелатирования их в клетках корня или в прикорневой среде (Петухов и др., 2018).

Противоречивые данные установлены при оценке влияния тяжелых металлов и нефтепродуктов на уровень конечных продуктов ПОЛ – оснований Шиффа (табл. 6).

При оценке содержания оснований Шиффа установлены следующие закономерности. Только самые высокие в опыте дозы цинка (46 мг/кг) и меди (110мг/кг) способствуют увеличению содержания данных продуктов ПОЛ. Кадмий и свинец способствовали увеличению содержания оснований Шиффа при внесении невысоких доз в опыте (соответственно 0.25 и 15 мг/кг). С дальнейшим увеличением доз этих металлов уровень оснований Шиффа снижается, что, возможно, объясняется активизацией процессов анти-

Таблица 6. Содержание оснований Шиффа у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация оснований Шиффа, усл. ед./мг липидов
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	0.1 ± 0.003
О1	0.1 ± 0.003*
О2	0.1 ± 0.003*
О3	0.2 ± 0.003*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	0.3 ± 0.004
О1	0.3 ± 0.005
О2	0.3 ± 0.003*
О3	0.3 ± 0.002*
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	0.1 ± 0.08
О1	0.4 ± 0.003*
О2	0.2 ± 0.002
О3	0.3 ± 0.008*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	0.03 ± 0.01
О1	0.01 ± 0.0008
О2	0.2 ± 0.01
О3	0.05 ± 0.008
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	0.3 ± 0.009
О1	0.1 ± 0.002
О2	0.3 ± 0.007
О3	0.1 ± 0.01
О4	0.009 ± 0.001

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

оксидантной защиты. Не установлено прямой зависимости между дозами нефтепродуктов и содержанием оснований Шиффа в растениях редиса. Тем не менее во всех вариантах опыта с нефтепродуктами отмечено в разной степени снижение уровня продуктов ПОЛ.

Обязательными участниками всех метаболических процессов являются вещества вторичного метаболизма – фенольные соединения. Они обеспечивают инактивацию свободных радикалов. Содержание фенольных соединений в растениях редиса посевного, выращенного при загрязнении почвы тяжелыми металлами и нефтепродуктами, представлено в табл. 7.

Содержание фенольных соединений в растительном организме зависело от химических свойств металлов. Отмечено снижение их концентрации при внесении цинка в почву. Медь не повлияла на уровень фенольных соединений. Достоверное увеличение уровня фенолов отмечено при внесении кадмия в дозе 0.5 мг/кг, а свинца – 6 мг/кг. Применение нефтепродуктов способствовало достоверному снижению этого показателя.

За защиту растений от окислительного стресса, возникающего по причине загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами, совместно с фенолами отвечают флавоноиды. Это вещества, относящиеся к полифенольным соединениям, ингибируют процессы ПОЛ, взаимодействуя со свободными радикалами и нейтрализуя их.

В нашем исследовании система флавоноидной защиты у редиса посевного отличалась в зависимости от дозы различных тяжелых металлов и нефтяного загрязнения (табл. 8).

Таблица 7. Содержание фенольных соединений у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация, усл. ед./мг
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	3.7 ± 0.05
О1	2.5 ± 0.02
О2	2.8 ± 0.06*
О3	1.9 ± 0.01*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	1.6 ± 0.1
О1	1.8 ± 0.1
О2	1.9 ± 0.1
О3	1.6 ± 0.1
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	2.1 ± 0.05
О1	1.9 ± 0.05*
О2	3.1 ± 0.08
О3	1.7 ± 0.08*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	0.8 ± 0.1
О1	1.2 ± 0.1*
О2	0.8 ± 0.1
О3	0.8 ± 0.08
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	3.03 ± 0.08
О1	1.7 ± 0.01*
О2	1.8 ± 0.08*
О3	1.5 ± 0.1*
О4	1.4 ± 0.01*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

В опытах с применением цинка наибольшее содержание флавоноидных соединений установлено при дозе микроэлемента 23 мг/кг (что соответствует ПДК его подвижной формы в почве).

В результате исследований установлено, что медь в дозах от 27.5 до 110 мг/кг способствует снижению уровня флавоноидов в растениях редиса. В то же время при внесении кадмия в дозах от 0.5 до 1 мг/кг отмечается увеличение уровня флавоноидов по сравнению с контролем, а свинец и нефтепродукты не оказали значимого влияния на концентрацию этих метаболитов.

Обсуждение

Полученные результаты позволили определить особенности реакции редиса посевного на воздействие одних из наиболее распространенных экотоксикантов – тяжелых металлов (меди, цинка, кадмия, свинца) и нефтепродуктов.

Внесение цинка в дозах от 12.5 до 46 мг/кг способствовало увеличению лабораторной всхожести семян редиса посевного. Концентрация в растениях хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов достоверно не изменяется по сравнению с контролем. Данный микроэлемент способствовал снижению в растениях продуктов ПОЛ – диеновых конъюгатов, однако при высокой дозе Zn (46 мг/кг) достоверно увеличивается уровень оснований Шиффа. Цинк способствовал снижению уровня фенольных соединений, а максимальный уровень флавоноидных соединений установлен при дозе микроэлемента 23 мг/кг.

Медь не оказала значимого влияния на начальные показатели роста и развития редиса, однако способствовала увеличению уровня хлорофилла *a*, хлорофилла *b* в про-

Таблица 8. Содержание флавоноидных соединений у редиса посевного (*R. sativus*) при действии почв, загрязненных металлами и нефтепродуктами

Вариант эксперимента	Концентрация, усл. ед./мг
Вариант с применением цинка (Zn)	
К (контроль)	1.6 ± 0.004
О1	1.5 ± 0.0005*
О2	2.3 ± 0.002*
О3	1.5 ± 0.0008*
Вариант с применением меди (Cu)	
К (контроль)	1.2 ± 0.001
О1	0.5 ± 0.0003*
О2	0.6 ± 0.0005*
О3	0.5 ± 0*
Вариант с применением кадмия (Cd)	
К (контроль)	1.2 ± 0.001
О1	1.1 ± 0.0005*
О2	1.9 ± 0.001*
О3	2.05 ± 0.001*
Вариант с применением свинца (Pb)	
К (контроль)	2.4 ± 0.005
О1	2.3 ± 0.001*
О2	2.3 ± 0.005*
О3	2.2 ± 0.003*
Вариант с применением нефтепродуктов	
К (контроль)	2.3 ± 0.0003
О1	2.3 ± 0.005*
О2	2.4 ± 0.01*
О3	2.5 ± 0.001*
О4	2.4 ± 0.02*

Примечание. * – значимые различия между контролем и вариантом опыта.

ростках редиса (до дозы 55 мг/кг). Не установлено прямой взаимосвязи между дозами меди и концентрацией диеновых конъюгатов. Только самые высокие дозы меди (110 мг/кг) способствуют увеличению содержания оснований Шиффа. Медь в дозах от 27.5 до 110 мг/кг способствует снижению уровня флавоноидов в растениях редиса, но не влияет на уровень фенольных соединений.

Кадмий снижает лабораторную всхожесть семян редиса, однако способствует начальному росту корня и листьев. При внесении кадмия отмечается снижение уровня хлорофилла *b* и каротиноидов в растениях редиса при максимальной дозе кадмия 1 мг/кг. При внесении кадмия концентрация диеновых конъюгатов была ниже, чем у растений контрольного варианта, однако отмечалось увеличение содержания оснований Шиффа при внесении невысоких доз в опыте (0.25 мг/кг). Дополнительное применение кадмия способствует активизации антиоксидантной системы, о чем свидетельствует увеличение уровня фенолов и флавоноидов.

Установлено стимулирующее действие свинца на лабораторную всхожесть редиса при дозах от 15 до 60 мг/кг. Содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов увеличивается до дозы свинца, внесенного в почву, 30 мг/кг. Чем выше доза внесения свинца в опыте, тем ниже содержание диеновых конъюгатов. Однако отмечается рост уровня оснований Шиффа при внесении невысоких доз в опыте (15 мг/кг). Достоверное увеличение уровня фенолов отмечено при внесении свинца в дозе 6 мг/кг, но значимого влияния на концентрацию флавоноидов не установлено.

У растений редиса посевного выявлена высокая чувствительность к отношению к нефтепродуктам, которые снижают всхожесть редиса. Отмечена тенденция сниже-

ния концентрации пигментов фотосинтеза в растениях редиса с увеличением содержания нефтепродуктов в почве до 1000 мг/кг. На всех вариантах опыта с нефтепродуктами отмечено снижение уровня продуктов ПОЛ. Нефтепродукты не оказали значимого влияния на концентрацию флавоноидов, однако способствовали снижению уровня фенолов.

Заключение

1. Выявлены особенности структурно-функциональных преобразований тест-культуры редиса посевного (*R. sativus*) на воздействие тяжелых металлов и нефтепродуктов. Внесение цинка (в дозах от 12.5 до 46 мг/кг), свинца (в дозах от 15 до 60 мг/кг) способствовало увеличению количества проросших семян редиса посевного. Медь не оказала значимого влияния на начальные показатели роста и развития редиса. Кадмий и нефтепродукты способствуют снижению количества проросших семян редиса, но не влияют отрицательно на его начальные показатели роста.

2. При внесении цинка в исследуемых дозировках содержание пигментов фотосинтеза достоверно не изменяется по сравнению с контролем. Медь способствовала увеличению уровня хлорофилла *a*, хлорофилла *b* в проростках редиса (до дозы 55 мг/кг). При внесении кадмия в максимальной дозе 1 мг/кг отмечается снижение уровня хлорофилла *b* и каротиноидов в растениях. Свинец до дозы 30 мг/кг способствовал увеличению содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, каротиноидов.

3. В зависимости от дозы все изученные компоненты могут проявлять как антиоксидантное, так и прооксидантное действие на растительный организм. Так, цинк способствовал снижению в растениях продуктов ПОЛ – диеновых конъюгатов, однако при высокой дозе Zn (46 мг/кг) достоверно увеличивается уровень оснований Шиффа. Не установлено прямой взаимосвязи между дозами меди и концентрацией диеновых конъюгатов, самые высокие дозы меди (110 мг/кг) способствуют увеличению содержания оснований Шиффа. Кадмий и свинец способствовали снижению содержания диеновых конъюгатов, но при высоких дозах – увеличению количества оснований Шиффа. Нефтепродукты способствовали снижению уровня продуктов ПОЛ.

4. Медь и цинк способствовали снижению уровня фенольных соединений. Максимальный уровень флавоноидных соединений установлен при дозе цинка 23 мг/кг. Медь в дозах от 27.5 до 110 мг/кг способствует снижению уровня флавоноидов в растениях редиса. Кадмий способствует активизации антиоксидантной системы, о чем свидетельствует увеличение уровня фенолов и флавоноидов. Увеличение уровня фенолов отмечено при внесении свинца в дозе 6 мг/кг, но этот элемент значимого влияния на уровень флавоноидов не оказывает. Нефтепродукты не оказали значимого влияния на концентрацию флавоноидов, однако способствовали снижению уровня фенолов.

5. Полученные закономерности можно использовать в экологическом мониторинге, при нормировании уровня кадмия, свинца, меди, цинка и нефтепродуктов в системе почва – растение с помощью фитотестирования.

Библиография

Ерофеева Е. А. Гормезис и парадоксальные эффекты у растений в условиях автотранспортного загрязнения и при действии поллютантов в эксперименте : Дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2016. 45 с.

Ловинецкая С. Б., Еремеева В. Г., Синдирева А. В. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах придорожных территорий г. Омска и Омской области и возможности их ремедиации // Омский научный вестник. 2015. № 1 (138). С. 241–245.

Никитина В. С., Шендель Г. В., Оразов О. Э. Растительные фенольные соединения-индикаторы промышленного загрязнения среды // Актуальные проблемы экологии. 2005. № 2. С. 124–127.

Осипова Е. С., Петухова Г. А., Перекупка А. Г. Активация биохимических механизмов защиты растений при действии нефтяного загрязнения и парааминобензойной кислоты // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 6. С. 41–47.

Петухов А. С., Хритохин Н. А., Петухова Г. А. Перекисное окисление липидов в клетках растений в условиях городской среды // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26, № 1. С. 82–90.

Пиковский Ю. И., Геннадиев А. Н., Чернянский С. С., Сахаров Г. Н. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140.

Синдирева А. В. Эколого-токсикологическая оценка действия кадмия, цинка, селена в условиях южной лесостепи Омской области // Вестник КрасГАУ. 2011. № 10 (61). С. 118–122.

Третьяков Н. Н., Кошкин Е. И., Макрушин Н. М. и др. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений . М.: Колос, 2000. 640 с.

Федорова А. И., Никольская А. Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды . М.: ВЛАДОС, 2001. С. 101–104.

Шведова А. А., Полянский Н. Б. Метод определения конечных продуктов перекисного окисления липидов в тканях – флуоресцирующих шиффовых оснований // Исследование синтетических и природных антиоксидантов in vitro и in vivo: Сб. науч. статей / Под ред. Е. Б. Бурлаковой. М.: Наука, 1992. С. 72–73.

Шульгин И. А., Ничипирович А. А. Расчет содержания пигментов с помощью номограмм // Хлорофилл. Минск: Наука и техника, 1974. С. 127–136.

Anjum N. A., Sofo A., Scopa A. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants // Environmental Science and Pollution Research. 2015. № 22. P. 4099–4121.

Devi Chinmayee M., Anu M. S., Mahesh B. A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in *Jatropha curcas* L. // Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology. 2014. Vol. 8, № 7. P. 58–67.

Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdoran F. Review article: Heavy metals and some mechanisms of plant defense response // The Scientific World Journal. 2015. № 4. P. 1–18.

Благодарности

Выражаем благодарность коллегам, помогавшим в осуществлении исследования, сборе материала, давшим ценные советы и консультации.

Sindireva A., Zaostrovskaya V., Veshkurtseva S. Assessment of morphological features and antioxidant activity of radish (*Raphanus sativus*) in conditions of soil pollution by heavy metals and petroleum products // Principy èkologii. 2025. № 2. P. 84–98. DOI: 10.15393/j1.art.2025.15742

ASSESSMENT OF MORPHOLOGICAL FEATURES AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF RADISH (*RAPHANUS SATIVUS*) IN CONDITIONS OF SOIL POLLUTION BY HEAVY METALS AND PETROLEUM PRODUCTS

SINDIREVA Anna Vladimirovna — *D.Sc., Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Tyumen State University, 625003 Russia Tyumen Volodarsky St. 6, sindireva72@mail.ru*

ZAOSTROVSKAYA Veronika Vladimirovna — *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Tyumen State University, 625003 Russia Tyumen Volodarsky St. 6, stud0000212862@utmn.ru*

VESHKURTSEVA Svetlana Semyonovna — *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Tyumen State University, 625003 Russia Tyumen Volodarsky St. 6, s.s.veshkurceva@utmn.ru*

Keywords:
heavy metals
petroleum products
radish
photosynthetic pigments
oxidative stress
antioxidant activity

Summary: In phytotesting polluted soils, the indicators of plant growth and development serve as an integral assessment. At the same time, biochemical markers are of particular interest, among which products of oxidative stress and antioxidant substances are of particular importance. The article evaluates the morphological changes and antioxidant activity of a plant organism using the example of a test culture of radish (Raphanus sativus) in conditions of soil contamination with heavy metals and petroleum products. Five series of experiments were conducted using the seedling method according to the following scheme: 1) control – soil; 2) experimental samples: the soil with the addition of acetate salts of copper (in doses from 27.5 to 110 mg/kg), zinc (11.5–46 mg/kg), lead (15–60 mg/kg), cadmium (0.25–1 mg/kg), as well as petroleum products (100–1000 mg/kg). The laboratory germination of seeds, growth and development indicators of radish seeds under the influence of heavy metals and petroleum products were studied. The addition of zinc (in doses from 12.5 to 46 mg/kg) and lead (in doses from 15 to 60 mg/kg) contributed to an increase in laboratory germination of radish seeds. Copper had no significant effect on the initial growth and development of radishes. Cadmium and petroleum products in the studied doses reduce the laboratory germination of radish seeds. The effect of ecotoxicants on the content of photosynthetic pigment components, the amount of phenolic and flavonoid compounds was revealed. The content of lipid peroxidation products (diene conjugates and Schiff bases) in plants under conditions of soil contamination with Cd, Pb, Zn, Cu and petroleum products was estimated. The state of antioxidant activity in plants in response to stress caused by additional intake of ecotoxicants into the soil was determined. The level of pro-oxidant and antioxidant processes in the plant body depends on the dose and chemical properties of the introduced heavy metals and petroleum products.

Received on: 10 February 2025 **Published on:** 28 May 2025

References

Anjum N. A. Sofo A. Scopa A. et al.Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants , Environmental Science and Pollution Research. 2015. No. 22. P. 4099–4121.

Chinmayee M. Anu M. S. Mahesh B. et al.A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in Jatropha curcas L. , Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology. 2014. Vol. 8, No. 7. P. 58–67.

Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdoran F. Review article: Heavy metals and some mechanisms of plant defense response, The Scientific World Journal. 2015. No. 4. P. 1–18.

Erofeeva E. A. Hormesis and paradoxical effects in plants under conditions of automobile pollution and under the action of pollutants in an experiment: Dip. ... kand. biol. nauk. N. Novgorod, 2016. 45 p.

Fedorova A. I. Nikol'skaya A. N. Practicum on ecology and environmental protection. M.: VLADOS, 2001. P. 101–104.

Lovineckaya S. B. Eremeeva V. G. Sindireva A. V. Assessment of the content of petroleum products in the soils of the roadside territories of Omsk and the Omsk region and the possibility of their remediation, Omskiy nauchnyy vestnik. 2015. No. 1 (138). P. 241–245.

Nikitina V. S. Shendel' G. V. Orazov O. E. Plant phenolic compounds as indicators of industrial environmental pollution, Aktual'nye problemy ekologii. 2005. No. 2. P. 124–127.

Osipova E. S. Petuhova G. A. Perekupka A. G. Activation of biochemical plant protection mechanisms under the influence of oil pollution and paraaminobenzoic acid, Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. No. 6. P. 41–47.

Petuhov A. S. Hritohin N. A. Petuhova G. A. Lipid peroxidation in plant cells in an urban environment, Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2018. T. 26, No. 1. P. 82–90.

Pikovskiy Yu. I. Gennadiev A. N. Chernyanskiy S. S. Saharov G. N. The problem of diagnostics and normalization of soil pollution by oil and petroleum products, Pochvovedenie. 2003. No. 9. P. 1132–1140.

Shul'gin I. A. Nichipirovich A. A. Calculation of pigment content using nomograms, Hrolofill. Minsk: Nauka i tehnika, 1974. P. 127–136.

Shvedova A. A. Polyanskiy N. B. A method for determining the end products of lipid peroxidation in tissues-fluorescent Schiff bases, Issledovanie sinteticheskih i prirodnyh antioksidantov in vitro i in vivo: Sb. nauch. statey, Pod red. E. B. Burlakovoy. M.: Nauka, 1992. P. 72–73.

Sindireva A. V. Ecological and toxicological assessment of the effects of cadmium, zinc, selenium in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk region, Vestnik KrasGAU. 2011. No. 10 (61). P. 118–122.

Tret'yakov N. N. Koshkin E. I. Makrushin N. M. Physiology and biochemistry of agricultural plants. M.: Kolos, 2000. 640 p.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 574.587

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕКОТОРЫХ МАЛЫХ РЕК ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «КОЛОГРИВСКИЙ ЛЕС» ПО ЗООБЕНТОСНЫМ СООБЩЕСТВАМ

СОКОЛОВА Татьяна Леонидовна — *кандидат биологических наук, ФГБОУ ВО Костромской государственный университет, г. Кострома, ул. Малышковская, д. 4, tl.sokol@yandex.ru*

МУРАДОВА Людмила Владимировна — *кандидат сельскохозяйственных наук, ФГБОУ ВО Костромской государственный университет, г. Кострома, ул. Малышковская, д. 4, mlv44@mail.ru*

Ключевые слова:
макрозообентос
видовой состав
экологические группы
малые реки
биотические индексы
биоиндикация
биоиндикаторы
зоогенный фактор
бобровый пруд
заповедник «Кологривский лес»
Костромская область

Аннотация: В статье приводятся результаты изучения экологического состояния некоторых водотоков Государственного природного заповедника «Кологривский лес» имени М. Г. Синицына по показателям сообществ макрозообентоса. Представлено видовое разнообразие макрозообентоса, наиболее многочисленные таксономические группы и виды зообентосных организмов, определены численность, биомасса данной группы гидробионтов, особенности трофической структуры, значения индекса видового разнообразия Шеннона и индекса выравненности по Пиелу для малых рек Сехи, Понги, Ломенги, Лондушки и Чёрной. Дана оценка состояния вод в соответствии с сапробиологической системой Пантле – Букка и Вудивисса, а также оценка качества вод с использованием биотических индексов BMWP и ASPT. Фаунистический список обнаруженных представителей макрозообентоса представлен 70 низшими определяемыми таксонами (НОТ). Наиболее многочисленны во всех исследованных реках личинки насекомых. Наибольшие показатели численности данной группы отмечены в реках с песчаным дном, в условиях большей зарастаемости берегов макрофитами, тогда как в условиях песчано-илистого и илистого грунта численность насекомых уменьшается. Наибольшее таксономическое разнообразие характерно для таких трофических групп, как хищники и собиратели-детритофаги. Выявлено, что реки Понга, Сеха, Лондушка и Чёрная, характеризующиеся достаточно богатым видовым составом зообентоса, по сапробиологической системе Пантле – Букка относятся к β-мезосапробным. По индексу Вудивисса реки Понга, Сеха и Чёрная характеризуются как водотоки с «умеренным загрязнением», реки Ломенга и Лондушка – как «загрязненные». Значение индекса BMWP свидетельствует о высоком качестве вод в реках заповедника и оценивается как «исключительное» в р. Понге, «очень хорошее» в реках Сеха и Чёрная, «хорошее» в реках Ломенга и Лондушка. Индекс ASPT варьирует в разных реках от 4.7 («очень хорошее» качество вод) до 6 («прекрасное»).

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 01 марта 2025 года **Подписана к печати**: 21 мая 2025 года

Введение

Одним из ключевых инструментов сохранения естественных экосистем и поддержания их стабильности является создание особо охраняемых природных территорий. Наиболее эффективным и доступным способом защиты природных объектов и сохранения биоразнообразия на долгосрочной основе является проведение регулярного биомониторинга водных экосистем и прогнозирование возможных изменений в них. Отечественные гидробиологи уделяют большое внимание методам и подходам, предлагаемым Европейской рамочной водной директивой, рекомендующей проводить биологический контроль состояния водных объектов (Головатюк, Зинченко, 2011; Семенченко, Разлуцкий, 2011; Андрианова, Шанько, 2022). Биологический метод оценки качества вод базируется на изучении индикаторных организмов, структурного и функционального состояния популяций и биоценозов. Методы биоиндикации, основанные на анализе состояния сообществ зообентоса, активно применяются в оценке экологического состояния естественных водоемов и водотоков.

Многие отечественные и зарубежные исследователи определяют зообентос как перспективный индикатор состояния речных экосистем, отмечая, что зообентосные сообщества чутко реагируют на любые изменения условий обитания, выступая тем самым репрезентативными биоиндикаторами (Безматерных, 2007; Яныгина, 2017; Андрианова, Шанько, 2022; Mehari et al., 2014). Для них характерна повсеместная встречаемость, достаточно высокая численность, относительно крупные размеры, удобство сбора и обработки, сочетание приуроченности к определенному биотопу с определенной подвижностью, достаточно продолжительный срок жизни, чтобы аккумулировать загрязняющие вещества за длительный период (Баканов, 2000). Ряд исследователей указывают на взаимосвязь между типом субстрата и значениями биоиндикационных индексов (Яныгина, 2017; Андрианова, Шанько, 2022; Damanik-Ambarita et al., 2016; Dickens, Graham, 2002). Отмечается также, что таксономический состав, количественные показатели и другие параметры сообществ зообентоса за продолжительный период отражают состояние гидроценоза в целом (Безматерных, 2007). Замедление течения и увеличение илистых отложений в реках, дополнительное поступление биогенов, эвтрофирование вызывают закономерную перестройку таксономической структуры зообентоса (Андрианова, Шанько, 2022).

Малые реки являются наиболее распространенными водными объектами в Костромской области. Через территорию кологривского участка заповедника «Кологривский лес» имени М. Г. Синицына протекают малые реки Понга, Кисть, Лондушка, Сеха, Вонюх, Ухта, Юрманга, Нелка, Ломенга, Чёрная, являющиеся правыми притоками разного порядка реки Унжи. Малые реки характеризуются повышенной чувствительностью к воздействиям, т. к. из-за меньшего объема, невысокой транспортирующей способности, неравномерного гидрологического режима их способность к самоочищению и саморегуляции ниже. В свою очередь, малые реки являются начальными звеньями крупных водотоков и существенно влияют на их гидробиологический и гидрохимический режимы. Поэтому изучение экосистемных процессов в бассейнах малых рек, оценка состояния их сообществ, в т. ч. зообентоса, путем комплексного анализа их биоиндикационных характеристик имеют большое значение (Пашков, Решетников, 2009).

Среди зообентосных организмов важной экологической группой является макрозообентос, представители которого имеют относительно крупные размеры, что облегчает задачу обнаружения и распознавания этих организмов. Кроме того, основу пресноводного макрозообентоса чаще всего составляют личинки насекомых, большинство из которых, по сравнению с другими гидробионтами, отличаются повышенной чувствительностью к изменениям среды. Численность организмов макрозообентоса определяется такими факторами, как тип донных отложений, гидрологические характеристики водотока, поступление аллохтонного органического вещества, температура, наличие высшей водной растительности, характеристики водосбора (Петров, Якушева, 2022).

Следует отметить также влияние зоогенных факторов на бентосные сообщества. На некоторых водотоках в пределах Государственного природного заповедника «Кологривский лес» имени М. Г. Синицына наблюдается влияние зоогенного фактора на гидробиоценозы, что связано с деятельностью обыкновенного бобра (*Castor fiber* L., 1758) (Зайцев и др., 2018). Деятельность бобра оказывает комплексное влияние на

бентос, т. к. приводит к изменению гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик водотоков, определяя, в свою очередь, изменения и в структуре зообентосных сообществ. Так, в условиях зоогенной трансформации наблюдается замедление течения, что приводит к накоплению органических веществ в воде, повышая уровень трофии водоема, заилению дна и увеличению кормовой базы детритоядных животных, снижению количества растворенного в воде кислорода. Зарегулирование бобрами водотока приводит к структурным изменениям в макрозообентосных сообществах, а именно меняется видовой состав и численное соотношение таксономических групп, возрастает число видов-индикаторов органического загрязнения, повышается индекс сапробности, снижается индекс Шеннона за счет элиминации реофильных форм (Хицова и др., 2010).

Целью исследования является оценка фонового экологического состояния малых рек на территории заповедника «Кологривский лес» имени М. Г. Синицына по таксономическому составу и количественным показателям сообществ макрозообентоса.

Материалы

Объекты исследования – некоторые водотоки на территории заповедника «Кологривский лес» имени М. Г. Синицына. Кологривский заповедник, созданный в 2006 г., площадь охранной зоны 58939.6 га, находится на территории Кологривского, Чухломского, Парфеньевского, Нейского, Мантуровского районов Костромской области. Включает в себя два участка, расположенные в подзоне европейской южной тайги. Территория Кологривского заповедника имеет обширную сеть водотоков, мелких водоемов и заболоченных участков.

По показателям макрозообентоса изучено экологическое состояние рек: Понга, Сеха, Ломенга, Лондушка, Чёрная. Все реки кологривского участка заповедника являются малыми, но имеют свои гидрологические особенности. По классификации Рохмистрова и Наумова (Рохмистров, Наумов, 1984), река Понга относится к средне-малым, реки Сеха и Лондушка – к самым малым, реки Ломенга и Чёрная – к незначительным водотокам (Сиротин, Сиротина, 2022).

Река Понга является самой широкой и глубокой рекой, имеет длину 73 км, ширину русла 10.8 м. Глубина реки составляет от 0.14 м на перекатах до 2 м на участках, подпруженных бобровыми плотинами. Скорость течения невысокая – 0.37 м/с, прозрачность – 0.72 м, песчаное дно с песчано-илистыми участками обильно зарастает макрофитами. Количество растворенного в воде кислорода на разных участках в период исследования колебалось в диапазоне 6.7–8.1 мг/дм^3, pH – 7.5–7.8.

Река Сеха впадает в реку Понгу, имеет длину 34 км, ширину 5.27 м, глубину 0.36 м на разных уровнях ее протяженности. Скорость течения составляет 0.14 м/с, прозрачность 0.62 м. Изученные участки сочетают перекаты с каменисто-песчаным грунтом и глубокие участки с небольшим течением, илисто-песчаным и илистым грунтом, поросшие макрофитами. Количество растворенного в воде кислорода на разных участках в период исследования колебалось в диапазоне 8.7–14.0 мг/ дм^3, pH – 7.5–8.3.

Река Чёрная является левым притоком реки Сехи, имеет длину 7 км, среднюю ширину русла 2.23 м, глубину 0.28 м, среднюю скорость течения 0.33 м/с. Грунт в реке илистый, прозрачность воды на момент исследования высокая. Количество растворенного в воде кислорода на разных участках в период исследования колебалось в диапазоне 8.7–13.8 мг/ дм^3, pH – 8.

Река Лондушка имеет длину 26 км, среднюю ширину 3.84 м, глубину 0.55 м, прозрачность 0.53 м. Средняя скорость течения составляла 0.04 м/с, на некоторых участках достигала 0.57 м/с. В среднем и нижнем течениях отмечается высокая степень зарастания реки макрофитами (Сиротин, Сиротина, 2022). Грунт на большинстве участков представлен иловыми или песчано-иловыми отложениями. Количество растворенного в воде кислорода на разных участках в период исследования колебалось в диапазоне 8.4–11.1 мг/ дм^3, pH – 8–8.5.

Река Ломенга является правым притоком реки Лондушки, имеет длину 14 км, среднюю ширину 4.7 м, прозрачность 0.25–0.8 м. Течение слабое и составляет 0.03 м/с. Берега реки топкие, заболоченные, плотно поросшие высшей водной растительностью. Грунт песчано-илистый, вода в реке имеет темный оттенок (Летопись природы..., 2022). Количество растворенного в воде кислорода в период исследования составило 6.9–7.4 мг/ мг/дм^3, pH – 7.4.

В целом исследованные реки характеризуются илистым и песчано-илистым характером дна, невысоким содержанием кислорода в пределах 6.7–14.0 мг/дм^3. В бобровых

прудах и на участках рек, перегороженных бобровыми плотинами, отмечается самое низкое содержание кислорода (Сиротин, Сиротина, 2022).

Исследование сообществ макрозообентоса с последующей оценкой экологического состояния некоторых малых рек на территории кологривского кластера заповедника проводились в летний период 2021–2023 гг. Материалом работы послужили качественные и количественные пробы макрозообентоса, отобранные в нескольких мониторинговых станциях речных экосистем: р. Понга – 6 станций, р. Сеха – 5 станций, Лондушка – 3 станции, р. Чёрная – 2 станции, р. Ломенга – 1 станция. На каждой станции отбирались одна качественная и две количественные пробы в каждый год исследования (рис. 1).

Методы

Сбор и обработка проб макрозообентоса проводились по общепринятым в гидробиологии методикам (Методические рекомендации..., 1984; Руководство..., 1992). Бентосные пробы отбирались при помощи гидробиологического скребка и дночерпателя Экмана – Берджа, промывались и разбирались в ситах в соответствии с рекомендациями. Донные беспозвоночные фиксировались формалином, концентрация которого доводилась до 4 %. Определение организмов проводилось с использованием микроскопа «Бимед» и бинокулярной лупы МБС-2. Для идентификации видов макрозообентоса использовались определители следующих авторов: Л. А. Кутиковой, Я. И. Старобогатова (Кутикова, 1977); В. Р. Цалолихина (Определитель пресноводных беспозвоночных..., 1994, 1997, 2000, 2001); С. Я. Цалолихина, В. Р. Алексеева (Определитель зоопланктона и зообентоса..., 2016). Для оценки качества воды исследованных водотоков по бентосу были рассчитаны показатели численности, биомассы, биотические индексы Вудивисса (Woodowiiss, 1964), Пантле – Букка в модификации Н. А. Дзюбан и С. П. Кузнецовой (Зуева, 2019), а также индекс BMWP (Biological Monitoring Working Party Index) и его производное ASPT (Average Score Per Taxon Index) (Семенченко, Разлуцкий, 2011). BMWP связан с балльной оценкой индикаторной значимости отдельных семейств макрозообентоса, ASPT уменьшает вклад случайных таксономических групп, обнаруженных в таксонах с высокой балльной оценкой (Головатюк, Зинченко, 2020). Численность организмов определялась прямым подсчетом особей в пробе, биомасса – взвешиванием объектов на электронных весах Scoutspu (Ohaus, Switzerland). Показатели численности и биомассы пересчитывались на м^2. Для оценки биоразнообразия использованы индексы видового разнообразия Шеннона и выравненности Пиелу (Шитиков и др., 2003). С целью оценки видового сходства рассчитан индекс Сёренсена – Чекановского (Sørensen, 1948; Шитиков и др., 2003). При анализе трофической структуры сообществ макрозообентоса были выделены следующие группы организмов (Яковлев, 2005): соскребатели, собиратели-детритофаги, размельчители, фильтраторы, хищники, грунтозаглатыватели.

Результаты

В составе сообществ макрозообентоса исследованных рек обнаружено 70 низших определяемых таксонов (НОТ) беспозвоночных, которые представлены пятью таксономическими группами: Oligochaeta, Hirudinea, Bivalvia, Gastropoda и Insecta. Фаунистический состав макрозообентоса исследованных водотоков представлен в табл. 1.

Класс Insecta является доминирующим по количеству видов и составляет 70 % от числа всех обнаруженных НОТ зообентоса, что типично для пресных водотоков. Среди насекомых наибольшее число видов определено для отряда Ручейников (Trichoptera) и отряда Стрекоз (Odonata). Представители отряда Trichoptera составили 30.6 % от числа всех выявленных насекомых, Odonata – 32.6 %. Субдоминантной группой выступают гастроподы (Gastropoda), которые составили 17.1 % от общего числа выявленных НОТ зообентоса. Остальные таксономические группы представлены меньшим количеством НОТ: Bivalvia – 5.7 %, Oligochaeta – 2.9 % и Hirudinea – 4.3 % от общего числа обнаруженных донных беспозвоночных. Наиболее распространенными, выявленными практически на всех станциях отбора исследованных рек, являются виды: *Pisidium amnicum* M. и *Ephemera vulgata* L., предпочитающие медленно текучие водотоки с иловатым или илистым дном. Так, в 2023 г. наибольшая количественная представленность *P. amnicum* отмечена в реке Лондушке, где численность данного вида составила в среднем 174.25 ± 0.94 экз./м^2, причем большая часть моллюсков данного вида отмечена в пробах, отобранных в бобровом пруду. Поденки вида *E. vulgata* наиболее многочисленны в реке Понге, их численность составила 29.48 ± 0.46 экз./м^2.

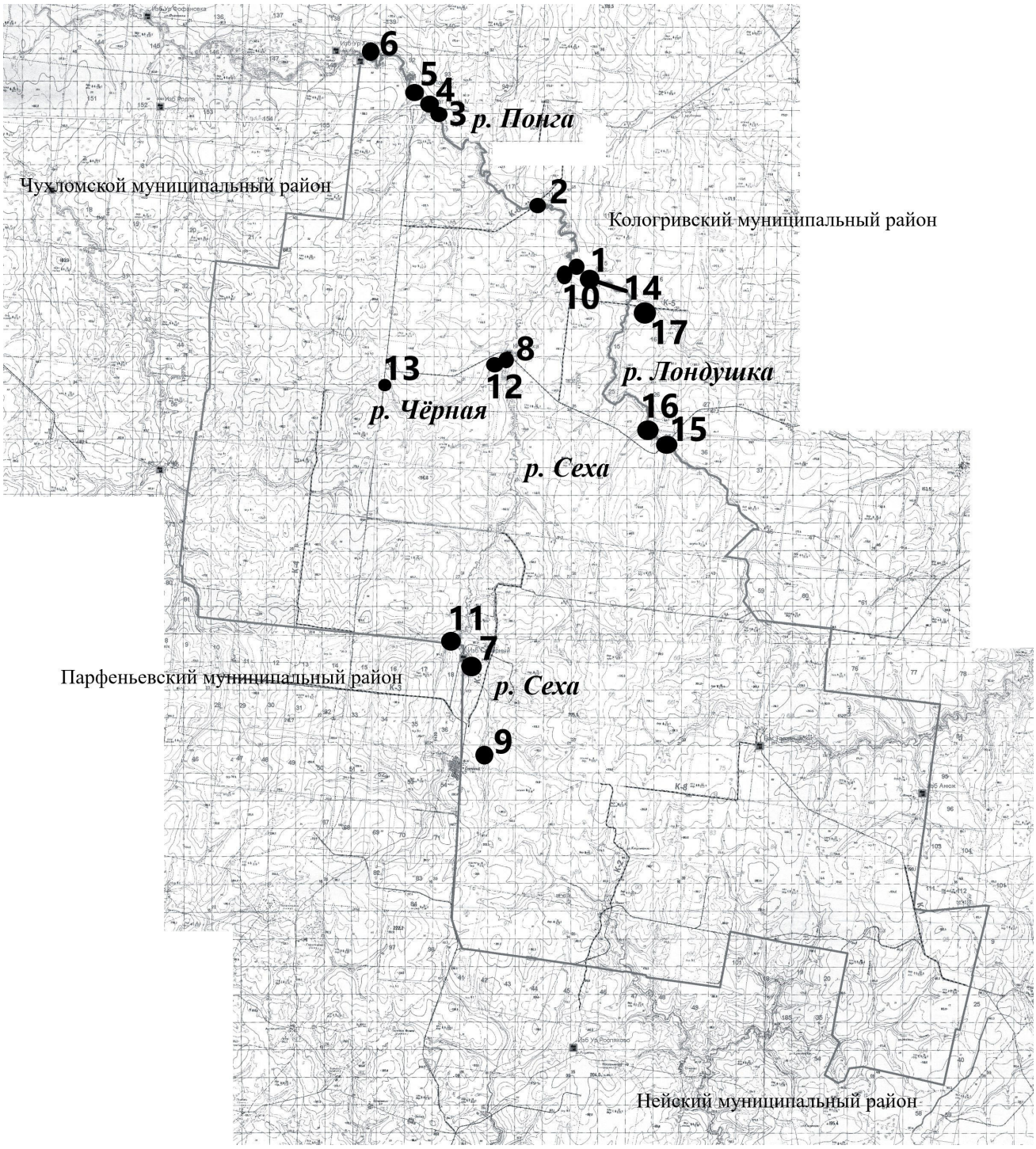


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб зообентоса на территории кологривского кластера заповедника р. Понга: 1, 2 – верхнее течение; 3 – среднее течение, бобровый пруд; 4, 5, 6 – среднее течение; р. Сеха: 7, 9 – верхнее течение; 8 – среднее течение; 10 – нижнее течение; 11 – бобровый пруд; р. Чёрная: 12 – нижнее течение; 13 – среднее течение; р. Лондушка – 14 нижнее течение; 15 – среднее течение; 16 – бобровый пруд р. Ломенга – 17.

Fig. 1. A map of the location of zoobenthos sampling stations on the territory of the Kologrivsky cluster of the reserve. Ponga river: 1, 2 – upper current; 3 – middle current, beaver pond; 4, 5, 6 – middle current; Sekha river: 7, 9 – upper current; 8 – middle current; 10 – lower current; 11 – beaver pond; Chernaya River: 12 – lower current; 13 – middle current; Londushka river – 14 lower current; 15 – middle current; 16 – beaver pond of Lomeng River – 17

Таблица 1. Фаунистический состав сообществ макрозообентоса исследованных водотоков на территории заповедника «Кологривский лес» имени М. Г. Синицына

Таксон	Реки					
	Понга	Сеха		Лондушка		Ломенга
		русло	бобровый пруд	русло	бобровый пруд	
Класс Oligochaeta						
Oligochaeta incertae sedis	+	+		+		+
Lumbricus variegatus, Muller, 1774	+					
Класс Hirudinea						
Herpobdella octoculata, Linnaeus, 1758	+	+	+			+
Haemopis sanguisuga, Linnaeus, 1758		+	+	+		
Glossiphonia complanata, Linnaeus, 1758	+			+		
Класс Gastropoda						
Lymnaea cf. ovata, Drapamaud, 1805	+					
Lymnaea cf. ampla, Hartmann, 1821	+					
Lymnaea stagnalis, Linnaeus, 1758				+	+	
Lymnaea auricularia, Linnaeus, 1758		+				
Lymnaea glutinosa, Müller, 1774		+				
Viviparus contectus, Millet, 1813				+		
Valvata piscinalis O. F. Müller, 1774				+	+	
Bathyomphalus contortus, Linnaeus, 1758	+			+	+	
Choanomphalus rossmaessleri, Auerswald, 1852	+					
Choanomphalus riparius, Westerlund, 1865	+					
Planorbis sp.						
Physa fontinalis, Linnaeus, 1758				+		
Класс Bivalvia						
Unio pictorum, Linnaeus,1758	+					
Anodonta cygnea, Linnaeus, 1758	+	+				
Pisidium amnicum Müller, 1774	+	+	+	+	+	+
Sphaerium sp.	+	+	+	+	+	
Класс Insecta						
Отряд Megaloptera						
Sialis sordida, Klingstedt, 1932	+	+				
Отряд Plecoptera						
Nemoura sp.	+					
Отряд Ephemeroptera						
Baetidae gen. sp.	+					
Baetis rhodani, Pictet, 1843			+			
Cloeon dipterum, Linnaeus, 1761	+	+				
Cloeon dipterum, Linnaeus, 1761	+	+				
Baetis tricolor, Tshernova, 1928	+					
Potamanthus luteus, Linnaeus, 1767	+	+	+			
Ephemera vulgate, Linnaeus, 1758	+	+	+	+		
Ephemera danica, Muller, 1764	+					
Habrophlebia lauta, McLachlan, 1884	+					

Таблица 1. Продолжение

Таксон	Реки					
	Понга	Сеха		Лондушка		Ломенга
		русло	бобровый пруд	русло	бобровый пруд	
Отряд Diptera						
Chironomus sp.	+	+	+			
Tabanus sp.	+	+				
Отряд Trichoptera						
Limnephilus flavicornis, Fabricius 1787	+			+		
Limnephilus rhombicus, Linnaeus, 1758	+			+		
Limnephilus vittatus, Fabricius, 1798	+	+				
Limnophilus decipiens, Kolenati, 1848						+
Limnephilus sp.	+	+	+	+	+	
Anabolia soror, McLachlan, 1875		+				+
Potamophyax sp.						+
Halesus radiates, Curtis, 1834		+				
Halesus interpunctates, Zetterstedt, 1840	+					
Halesus sp.		+				+
Goera pilosa, Fabricius, 1775						+
Molanna angustata, Curtis, 1834	+	+				
Molanna sp.	+					
Athripsodes sp.		+	+			
Phryganea grandis, Linnaeus, 1758		+	+			
Отряд Odonata						
Libellula quadrimaculata, Linnaeus, 1758						
Coenagrion hastulatum, Charpentier, 1825	+					
Platycnemis pennipes, Pallas, 1771	+	+				
Aeshna juncea, Linnaeus, 1758	+					
Aeschna grandis, Linnaeus, 1758		+				
Aeschna viridis, Eversmann, 1835		+				
Anax imperator, Leach, 1815	+					
Corduliidae gen. sp.	+					
Cordulia aenea, Linnaeus, 1758	+	+				
Cordulegaster boltonii, Donovan, 1807	+					
Somatochlora metalilica, Vander Linden, 1825	+					
Sympetrum flaveolum, Linnaeus, 1758						
Calopteryx splendens, Harris, 1780	+					
Calopteryx virgo, Linnaeus, 1758	+					
Calopteryx sp.	+					
Onychogomphus foricipatus, Linnaeus, 1758	+					

Таблица 1. Продолжение

Таксон	Реки					
	Понга	Сеха		Лондушка		Ломенга
		русло	бобровый пруд	русло	бобровый пруд	
Отряд Coleoptera						
Gyrinus sp.	+					
Laccophilus sp.	+					
Haliplus fluviatilis, Aube, 1836	+					
Noterus cf. crassicornis, O.F. Müller, 1776	+					
Hydaticus sp.						
Dytiscus marginalis, Linnaeus, 1758						+
Всего НОТ	**48**	**27**	**11**	**14**	**6**	**9**

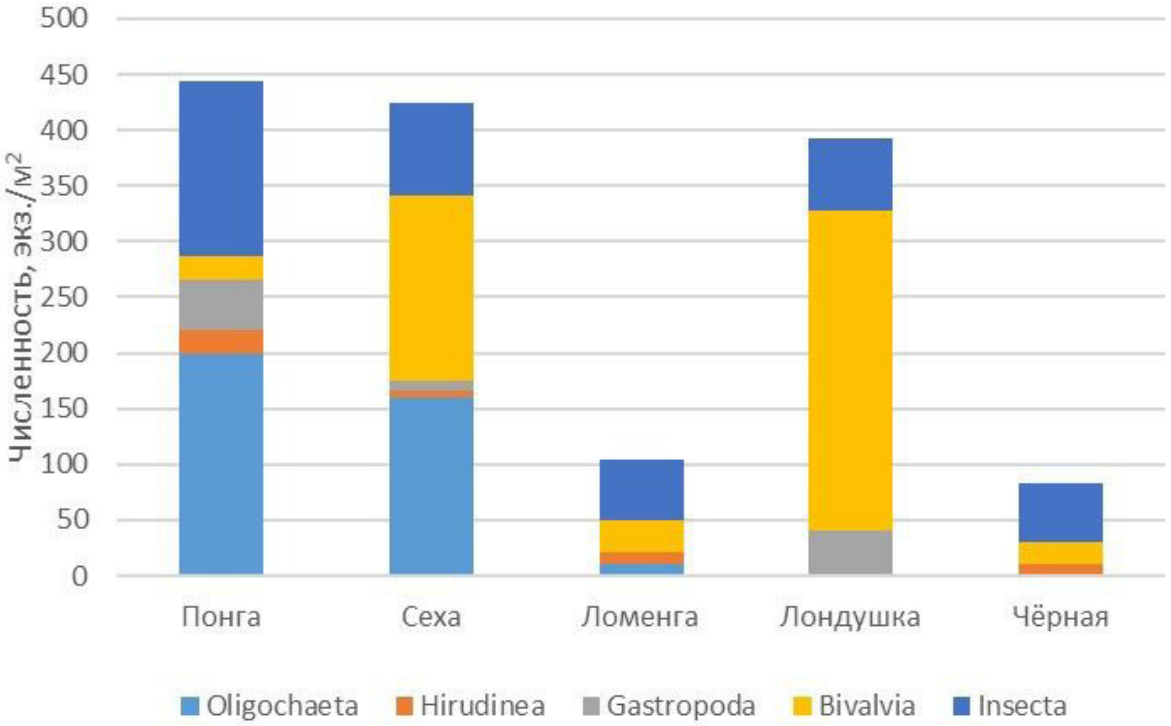
Соотношение таксономических групп по видовому разнообразию и количественным показателям варьирует в разных реках, что может быть связано с различными гидрологическими условиями, например характером дна, скоростью течения, наличием хорошо развитой прибрежной растительности и рядом других факторов (рис. 2).

Во всех исследованных водотоках наиболее многочисленны представители класса Insecta. Насекомые представлены преимущественно личиночными формами. Наибольшее разнообразие данной группы зообентоса по количеству видов отмечено для рек Понга, где обнаружено 35 видов (численность – 156.2 ± 0.068 экз./м^2), и Сеха, где зарегистрировано 28 видов насекомых (численность – 83.0 ± 0.008 экз./м^2). Исключение составляет ситуация в реке Лондушке, где наибольшее видовое богатство отмечено у гастропод. Данная группа бентосных беспозвоночных в р. Лондушке представлена 4 семействами и составила 35.7 % от числа найденных представителей макрозообентоса. Наибольшему видовому разнообразию брюхоногих моллюсков способствует зарастаемость макрофитами и заболачивание берегов, что также приводит к заиливанию дна.

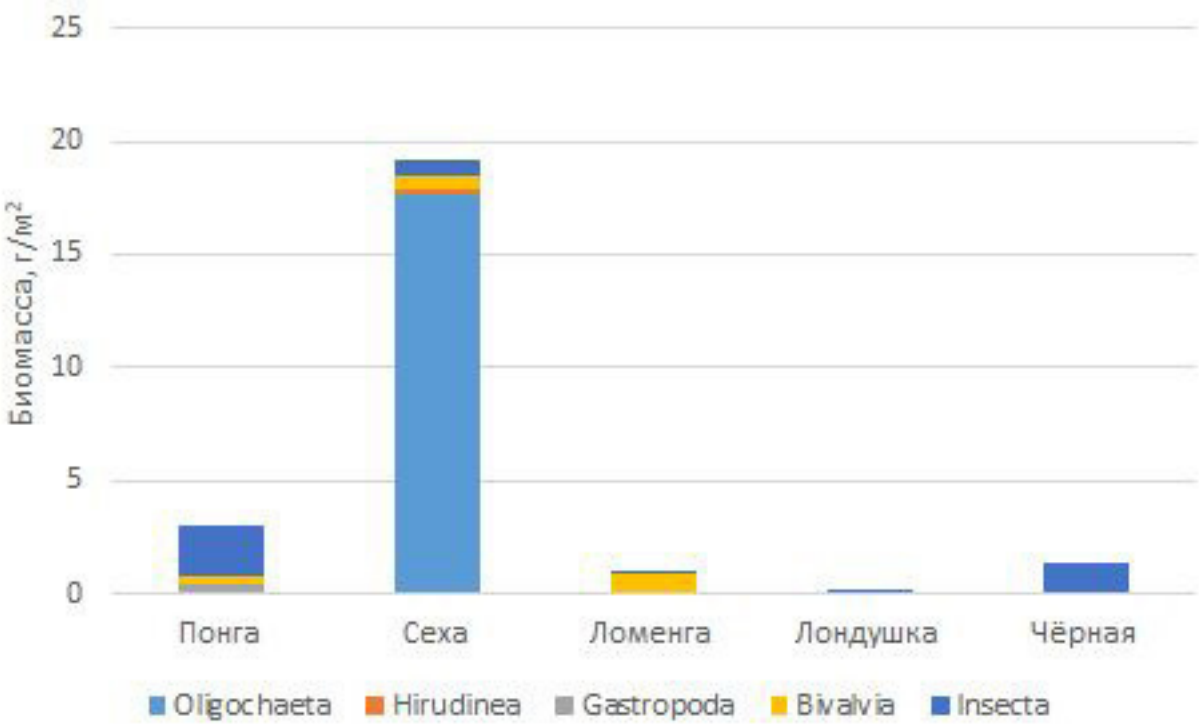
Среди брюхоногих моллюсков (Gastropoda) наибольшее количество таксономических групп и максимальные показатели численности отмечены в реке Лондушке, где гастроподы составили 35.7 % от общего числа выявленных видов донных беспозвоночных (численность – 41 ± 0.001 экз./м^2), и в реке Понге – 10.4 % (численность – 44.8 ± 0.046 экз./м^2). За период исследования водотоков Кологривского заповедника зарегистрированы представители брюхоногих моллюсков следующих семейств: Lymnaeidae (5 видов), Planorbidae (3 вида), Viviparidae (1 вид), Valvatidae (1 вид), Physidae (1 вид). Представители гастропод данных семейств в основном предпочитают медленно текучие водотоки с заросшими высшей растительностью берегами и со слабо заиленным грунтом дна, что в целом соответствует экологическим условиям, сложившимся в исследованных реках заповедника.

Двустворчатые моллюски (Bivalvia) наиболее многочисленны в реке Лондушке, где данная группа представлена Sphaerium sp. Численность этой зообентосной группы составила 287 ± 0.83 экз./м^2. Более крупные виды двустворок – *Unio pictorum* L. и *Anodonta cygnea* L. обнаружены только на станциях отбора реки Понги. *A. cygnea* занесена в Красную книгу Костромской области как восстанавливаемый и восстанавливающийся вид (Красная книга..., 2019).

Во всех исследованных реках выявлены типичные представители бентосных сообществ – олигохеты и пиявки, достаточно устойчивые к органическому загрязнению. Показатели численности и биомассы олигохет и пиявок в исследованных реках заповедника варьируют от 20.5 ± 0.026 до 210.2 ± 0.013 экз./м^2 и от 0.0002 ± 0.006 до 0.32 ± 0.01 г/м^2 соответственно. Наибольшая их численность за период исследования отмечена в реке Понге, для которой индекс разнообразия Шеннона – Уивера наибольший среди исследованных рек – 1.22, индекс выровненности Пиелу – 0.35, что говорит о большем видовом разнообразии и более равномерном распределении видов в сообществе. Индекс видового разнообразия



А.



Б.

Рис. 2. Численность (А) и биомасса (Б) макрозообентоса исследованных речных экосистем заповедника

Fig. 2. The abundance (А) and biomass (Б) of the macrozoobenthos of the studied river ecosystems of the reserve

меньше в реках Черная – 0.74 и Лондушка – 0.63, индекс выровненности составил 0.26 и 0.24 соответственно.

Для определения таксономического сходства исследованных рек рассчитан индекс Сёренсена – Чекановского (табл. 2). Наибольшие значения меры сходства Сёренсена – Чекановского отмечены для рек Понга и Чёрная, Понга и Сеха, Сеха и Лондушка.

Таблица 2. Оценка видового сходства различных гидробиоценозов

Водотоки	р. Сеха	р. Ломенга	р. Лондушка	р. Чёрная
р. Понга	0.35	0.11	0.23	0.43
р. Сеха		0.25	0.33	0.28
р. Ломенга			0.09	0.12
р. Лондушка				0.29

На период исследования в реках Сеха и Лондушка наблюдалось влияние зоогенного фактора на водные экосистемы. В бобровых прудах обнаружены представители четырех таксономических групп – Hirudinea, Bivalvia, Gastropoda и Insecta. Всего за период исследования в прудах выявлено 14 НОТ макрозообентоса (см. табл. 1). В условиях запруживания речных экосистем в результате деятельности бобра также доминируют насекомые, среди которых встречаются поденки, ручейники и двукрылые. Субдоминантной группой по числу видов являются брюхоногие моллюски, представленные такими видами, как *Lymnaea stagnalis* L., *Valvata piscinalis* M., *Bathyomphalus contortus* L. Среди двустворчатых моллюсков выявлены представители родов Sphaerium sp. и Pisidium sp., численность которых по данным 2023 г. исследования в реке Лондушке в условиях запруживания составила 164 ± 0.32 экз./м^2 для Sphaerium sp. и 338.25 ± 0.76 экз./м^2 для Pisidium sp. Оценка качества вод в бобровых прудах с использованием индексов BMWP и ASPT показала по р. Лондушке низкие показатели качества (BMWP – 22 «плохое», ASPT – 3.6 «посредственное»), по р. Сехе – более высокие показатели (BMWP – 55 «хорошее», ASPT – 5 «прекрасное»).

Одним из биоиндикационных показателей является оценка трофической структуры сообществ макрозообентоса, которая определяется по способу потребления пищи донными беспозвоночными. По типу питания выявленные в ходе исследования представители макрозообентоса относились к различным экологическим группам: соскребателям, собирателям-детритофагам, размельчителям, фильтраторам, хищникам и другим трофическим группам. Однако следует учитывать, что некоторые виды имеют смешанное питание – соскребатели-детритофаги и облигатные собиратели-фильтраторы, или соскребатели и размельчители. Соотношение трофических групп донных беспозвоночных исследованных водотоков заповедника по видовому составу представлено на рис. 3.

За период исследования в большинстве рек наибольшее таксономическое разнообразие характерно для хищников, которые составили от 32 до 38.9 % от общего числа выявленных представителей макрозообентоса. Следующей по количеству НОТ явилась группа собирателей-детритофагов, которые составили от 16.7 до 27.8 %. Исключением является трофическая структура сообществ макрозообентоса реки Лондушки, где собиратели-детритофаги имели наибольшее видовое разнообразие, их доля в сообществе составила 54.5 % от общего числа групп на станциях отбора проб, эта же трофическая группа была преобладающей в структуре макрозообентоса в данной реке и по биомассе. Активные хищники преобладали по биомассе в реках Понга и Сеха (рис. 4). В составе макрозообенотоса р. Сехи наибольшие показатели биомассы также отмечены для таких групп, как грунтозаглатыватели и собиратели – облигатные фильтраторы, в р. Понге – собиратели-детритофаги и собиратели – облигатные фильтраторы.

Оценка экологического состояния исследованных рек по индексу Вудивисса показала, что реки Сеха, Понга и Чёрная относятся к 3-му классу (значение индекса 6–7), что соответствует «умеренному загрязнению», реки Ломенга и Лондушка – к 4-му классу качества – «загрязненные». По результатам оценки качества вод малых рек заповедника по сапробиологической системе Пантле – Букка в большинстве рек не выявлены

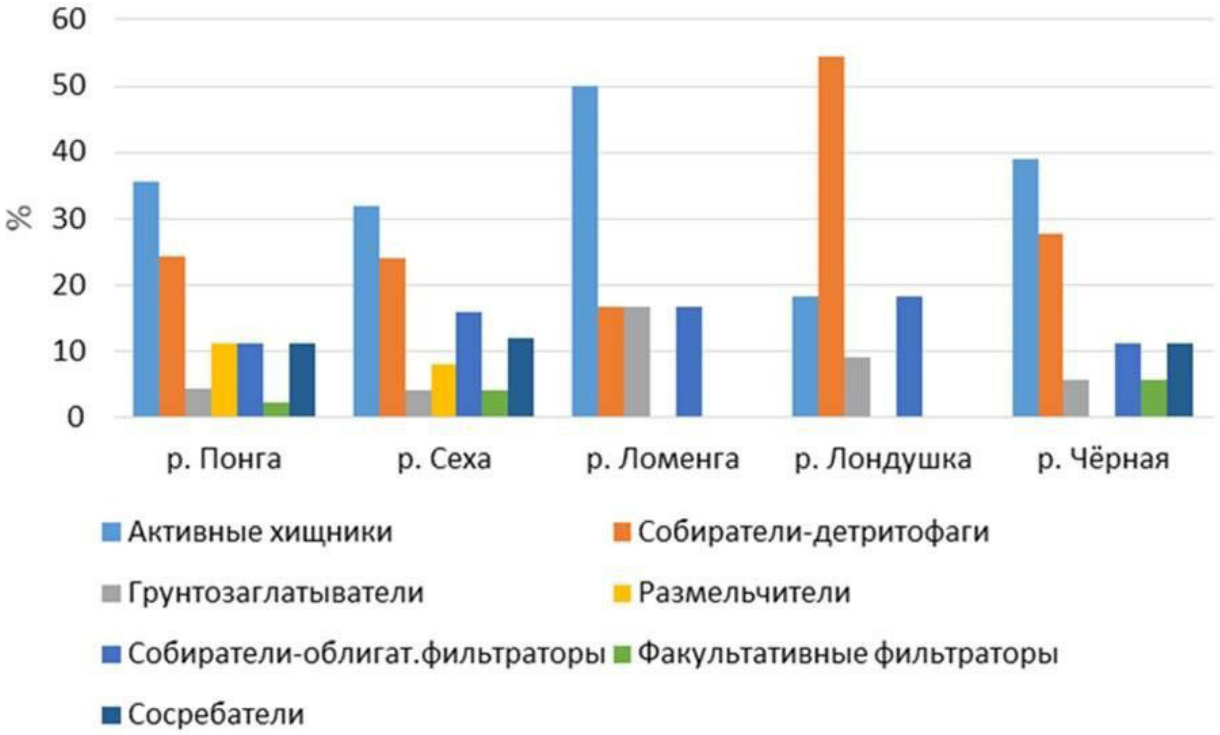


Рис. 3. Соотношение трофических групп макрозообентоса в исследованных реках
Fig. 3. The ratio of macrozoobenthos trophic groups in the studied rivers

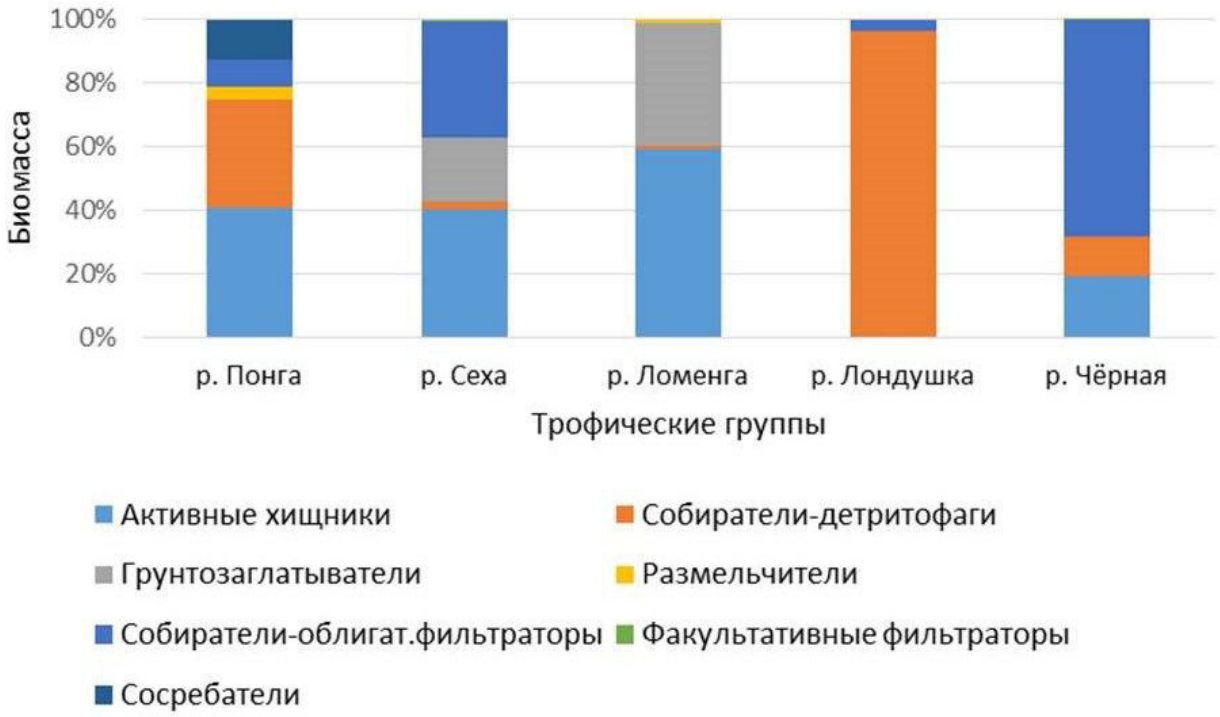


Рис. 4. Процентное соотношение таксономических групп макрозообентоса по биомассе (г/м^2) в исследованных реках
Fig. 4. Percentage of macrozoobenthos taxonomic groups by biomass (g/m^2) in the studied rivers

различия между станциями отбора проб. Реки Понга, для которой значение индекса сапробности варьирует от 1.8 до 2.4, Сеха (2.1–2.5, за исключением бобрового пруда), Лондушка (2.2–2.5) и Чёрная (2.1–2.5) относятся к β-мезосапробным (3-й класс – «умеренно загрязненные»). Река Ломенга, для которой индекс Пантле – Букка составил 2.7, относится к α-мезосапробному типу – 4-му классу «загрязненной». Индекс сапробности вод бобрового пруда реки Сехи составил 2.9, что также соответствует α-мезосапробному типу.

Расчеты индексов BMWP и ASPT, основанные на разной чувствительности макрозообентоса к органическому загрязнению, продемонстрировали в целом высокие показатели качества вод исследованных водотоков (рис. 5).

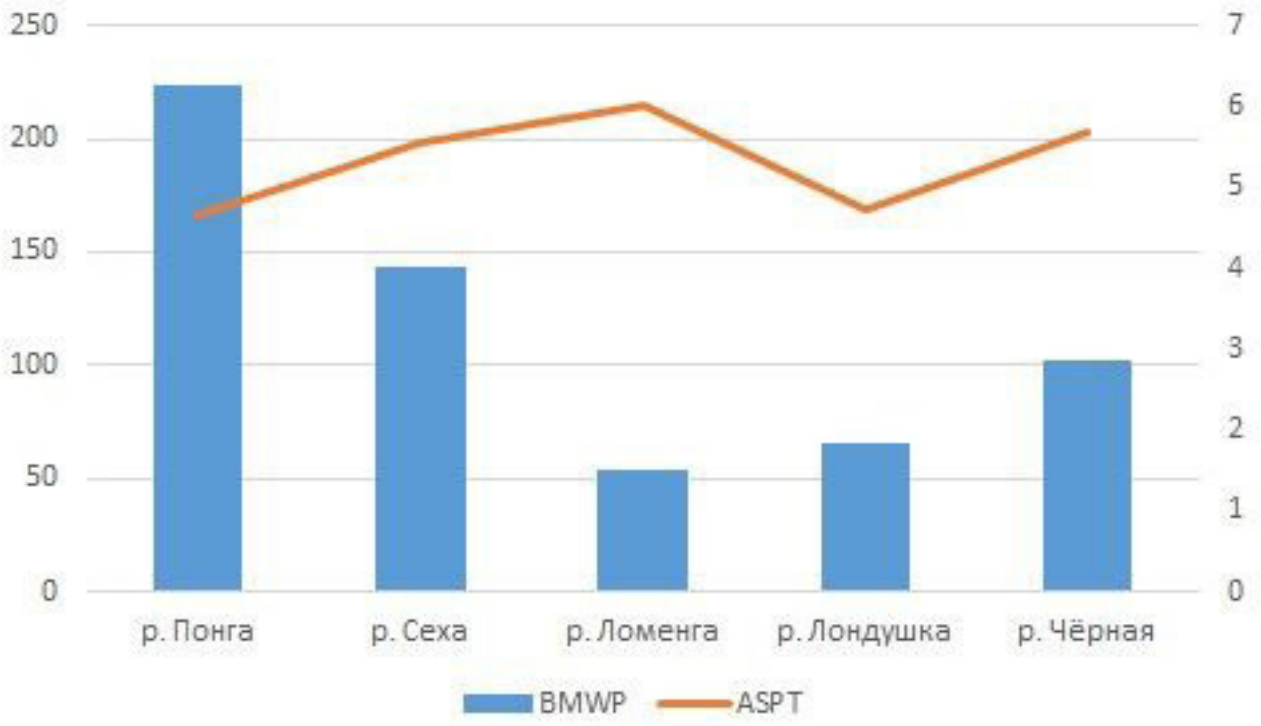


Рис. 5. Значение индексов BMWP и ASPT исследованных рек заповедника
Fig. 5. The value of the BMWP and ASPT indices of the studied rivers of the reserve

В различных реках значение индекса BMWP варьировало от 54 («хорошее» качество – реки Ломенга и Лондушка) до 224 («исключительное» качество – р. Понга), значение индекса ASPT – от 4.7 («очень хорошее» – реки Понга и Лондушка) до 6 («прекрасное» – реки Чёрная и Сеха). Однако в реке Лондушке отмечены различия качества вод по станциям отбора проб (табл. 3). Так, низкие показатели биотических индексов в реке Лондушке определены на участке впадения в водоток р. Ломенги (станция 1), для которого характерен песчано-илистый грунт, а также на станции в условиях влияния бобровой деятельности на водоток, где отмечается накопление илистых донных отложений. Обнаруженные на станции 1 в р. Лондушке представители семейства Ephemeridae имеют наибольший балл согласно расчетам индекса BMWP.

Обсуждение

Ввиду отсутствия влияния источников антропогенного загрязнения малые реки заповедника могут быть использованы в качестве фоновых (условно чистых) водотоков. Значения индексов BMWP и ASPT на основе видового состава сообществ макрозообентоса показали достаточно высокое качество вод исследованных речных экосистем. Наибольшая (10 баллов) оценка, согласно расчету индекса, была присвоена обитающим в реках видам из семейств Leptophlebidae, Potamanthidae, Molannidae, Ephemeridae (Ephemeroptera), Goeridae (Trichoptera). По сапробиологической системе Пантле – Букка большинство исследованных рек относятся к β-мезосапробным (р. Понга, Сеха, Лондушка, Чёрная), что говорит о незначительном накоплении органических веществ и доста-

Таблица 3. Значения биотических индексов исследованных водотоков по станциям отбора проб

Станции отбора проб	Биотический индекс	
	BMWP	ASPT
р. Понга		
Станция 1	138 (очень хорошее)	6 (прекрасное)
Станция 2	57 (хорошее)	6.3 (прекрасное)
Станция 3	78 (хорошее)	5.6 (прекрасное)
Станция 4	62 (хорошее)	5.2 (прекрасное)
Станция 5	37 (невысокое)	5.3 (прекрасное)
Станция 6	18 (плохое)	4.5 (хорошее)
р. Сеха		
Станция 1	84 (хорошее)	6.5 (прекрасное)
Станция 2	77 (хорошее)	5.92 (прекрасное)
Станция 3	66 (хорошее)	5.1 (прекрасное)
Станция 4	86 (хорошее)	6.6 (прекрасное)
Станция 5 (бобровый пруд)	55 (хорошее)	5 (прекрасное)
р. Ломенга	55 (хорошее)	6 (прекрасное)
р. Лондушка		
Станция 1	26 (невысокое)	3.7 (посредственное)
Станция 2	46 (невысокое)	5.1 (прекрасное)
Станция 3 (бобровый пруд)	22 (плохое)	3.6 (посредственное)
р. Чёрная		
Станция 1	52 (хорошее)	4.6 (очень хорошее)
Станция 2	90 (хорошее)	5.6 (прекрасное)

точно большом видовом разнообразии гидробионтов. Наибольшее значение индекса видового разнообразия Шеннона отмечено в реках Понга (1.21), Чёрная (0.73), Лондушка (0.63). Река Ломенга и бобровый пруд р. Сехи относятся к α-мезасапробному типу и характеризуются слабым течением, заболоченностью берегов (р. Ломенга), песчано-илистым и илистым грунтом.

Таксономический состав и количественные показатели сообществ макрозообентоса зависят от многих экологических факторов. На структуру макрозообентоса оказывают влияние такие факторы, как скорость течения, характер грунта, наличие признаков зарастаемости прибрежных участков речных экосистем макрофитами, что отмечают многие исследователи, в т. ч. исследователи зообентосных сообществ малых рек сопредельных районов (Фролова, Баянов, 2010; Ивичева, 2016). Все исследованные малые реки характеризуются зарастаемостью берегов прибрежной растительностью, в ряде случаев берега затоплены.

Значительных изменений соотношения основных таксономических и трофических групп, количественных показателей сообществ зообентоса на участках, находящихся под влиянием зоогенного фактора, за период исследования не отмечено. Во всех исследованных реках Кологривского заповедника, в т. ч. на участках, находящихся под зоогенным влиянием, наиболее представлены личинки насекомых. Высокие показатели численности насекомых характерны для рек Понга и Сеха, отличающихся песчаным характером дна. Численность насекомых уменьшалась в условиях песчано-илистого и илистого грунта, а также в условиях значительной зарастаемости прибрежной растительностью берегов рек Лондушка, Ломенга и Черная. Наибольшие показатели биомассы насекомых, за счет большой представленности личинок различных видов стрекоз (Odonata), ручейников (Trichoptera), поденок (Ephemeroptera), а также представителей семейства Dytiscidae, отмечены в реках Понга и Чёрная. В реке Сехе в условиях влияния зоогенного фактора выявлены виды таких семейств, как Potamanthidae и Ephemeridae, отмеченные наибольшим баллом по системе оценок BMWP. В бобровом пруде реки Лондушки такие биоиндикаторные виды не обнаружены.

В реках Сеха и Лондушка за период исследований отмечена высокая числен-

ность двустворчатых моллюсков (Bivalvia), представленных семействами Unionidae и Sphariidae. Набольшие показатели численности двустворок рода Pisidium sp. определены на участках влияния зоогенного фактора рек Лондушка и Сеха в условиях песчано-илистого грунта.

Наибольшие показатели численности Oligochaeta и Hirudinea зарегистрированы в реке Понге, где в районе бобровой плотины и ниже по течению были обнаружены *Lumbricus variegatus* и различные виды пиявок, предпочитающие водные экосистемы со стоячей или медленно текущей водой, обильно заросшие растительностью.

Соотношение экологических групп бентоса по типу питания в исследованных реках значительно отличается. В реках Понга и Сеха по количеству НОТ выявлено 7 экологических групп, в реке Чёрной – 6, в реках Лондушка и Ломенга – по 4 в каждой. В реках Сеха, Понга, Чёрная доминировали активные хищники и собиратели-детритофаги, в р. Лондушке значительна группа собирателей-детритофагов, которые составили 54.5 % от общего числа выявленных представителей макрозообентоса, в р. Ломенге – активные хищники (50 %). Преобладание детритофагов в сообществе зообентоса реки Лондушки может свидетельствовать о накоплении органики, чему способствует зарастаемость макрофитами и заболоченность берегов водотока.

Таким образом, исследованные малые реки отличаются достаточно большим видовым разнообразием зообентоса. Наибольшее количество видов и количественная представленность характерны для насекомых, что типично для пресных водоемов. В условиях влияния зоогенного фактора за период исследования отмечено снижение видового разнообразия и количественных показателей сообществ макрозообентоса, что, вероятно, связано с сукцессионными процессами. Однако соотношение основных таксономических и трофических групп зообентоса малых рек Кологривского заповедника, а также показателей их численности и биомассы изменяется в целом незначительно.

Заключение

Исследованные водотоки на территории Кологривского заповедника отличаются песчано-илистым и илистым дном с разной степенью зарастания берегов прибрежной растительностью. В пределах некоторых рек наблюдается деятельность речного бобра. По сапробиологической системе Пантле – Букка реки Понга, Сеха, Лондушка и Чёрная относятся к β-мезосапробным (3-й класс – «умеренно загрязненные»), река Ломенга – к α-мезасапробному типу (4-й класс – «загрязненная»). Значение индекса BMWP свидетельствует в целом о высоком качестве вод в реках заповедника и оценивается как «исключительное» – в р. Понге, «очень хорошее» – в реках Сеха и Чёрная, «хорошее» – в реках Ломенга и Лондушка. Индекс ASPT показал «прекрасное» качество вод в реках Сеха, Ломенга и Чёрная; «очень хорошее» – в реках Понга и Лондушка. В большинстве исследованных рек не выявлены различия в качестве вод по станциям отбора проб. Различия в качестве вод по станциям определены только для реки Лондушки, где выявлено по ряду станций снижение значений биотических индексов, что может быть обусловлено изменением в характере грунта в связи с накоплением илистых отложений. Также наблюдается различие значения индекса сапробности вод бобрового пруда реки Сехи в отличие от других станций отбора проб (α-мезасапробный тип).

В ходе исследования сообществ макрозообентоса некоторых малых рек Кологривского заповедника выявлено 70 низших определяемых таксонов (НОТ) беспозвоночных, которые представлены пятью таксономическими группами: Oligochaeta, Hirudinea, Bivalvia, Gastropoda и Insecta. Во всех исследованных малых реках наблюдалось доминирование насекомых, что типично для пресных водоемов и водотоков. Однако в условиях высокой зарастаемости берегов макрофитами в структуре сообществ макрозообентоса возрастает доля брюхоногих моллюсков, которые являются детритофагами, что может быть признаком накопления органических веществ. В период исследований немногочисленны чувствительные к изменению условий веснянки. Среди данной группы выявлены только представители рода Nemoura в реке Понге, которые обычны для мезотрофных водоемов. В условиях зоогенного влияния снижение разнообразия зообентоса не наблюдалось, по-прежнему доминировали насекомые, субдоминантной группой являлись брюхоногие моллюски, что связано с хорошей кормовой базой для них вследствие зарастаемости прибрежных участков, замедлением скорости водотока и накоплением органических веществ. В трофической структуре сообществ макрозообентоса во

всех исследованных реках доминировала группа активных хищников, за исключением реки Лондушки, где по количеству видов и биомассе доминировали собиратели-детритофаги, и реки Чёрной, в зообентосных сообществах которой по биомассе доминировали собиратели – облигатные фильтраторы.

Библиография

Андрианова А. В., Шанько Ю. В. Биотические индексы и метрики зообентоса в оценке экологического состояния крупной реки смешанного типа // Экология. 2022. № 2. С. 145–152.

Баканов А. И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов (обзор) // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 68–82.

Безматерных Д. М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири: Аналитический обзор / Под ред. Д. М. Безматерных. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2007. Вып. 85. 86 с.

Головатюк Л. В., Зинченко Т. Д. Биотические идентификаторы в оценке качества воды эталонной реки: сравнительный анализ биоиндикационных индексов реки Байтуган (Высокое Заволжье) // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2020. Т. 162, кн. 1. С. 134–150.

Головатюк Л. В., Зинченко Т. Д. Биотические индексы и метрики в оценке качества воды малых рек Нижнего Поволжья (на примере рек Байтуган, Камышла, Сосновка) // Особенности пресноводных экосистем малых рек Волжского бассейна / Под ред. Г. С. Розенберга, Т. Д. Зинченко. Тольятти: Кассандра, 2011. С. 160–169.

Зайцев В. А., Сиротина М. В., Мурадова Л. В., Ситникова О. Н. Бобры заповедника «Кологривский лес» // Бобры в заповедниках европейской части России / Под ред. Н. А. Завьялова, Л. А. Хляп. Великие Луки: ООО «Великолукская типография», 2018. С. 125–180.

Зуева Н. В., Алексеев Д. К., Куличенко А. Ю. Биоиндикация и биотестирование в пресноводных экосистемах: Учебное пособие для высших учебных заведений . СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. 140 с.

Ивичева К. Н. Зообентос малых рек-притоков Верхней Сухоны // Вода: химия и экология. 2016. № 8 (98). С. 53–59.

Красная книга Костромской области / В. И. Бондаренко, А. С. Дюкова, Д. Н. Зонтиков ; Науч. ред. М. В. Сиротина ; Администрация Костромской области, Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Костромской области, Костромской государственный университет. 2-е изд., перераб. и доп. Кострома: Костромской гос. ун-т, 2019. 431 с.

Кутикова Л. А. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР:] / Отв. ред. д-ра биол. наук Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР, Зоол. ин-т АН СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 511 с.

Летопись природы государственного природного заповедника «Кологривский лес» имени М. Г. Синицына / Сост. С. А. Чистяков. Кологрив: ООО «Костромской печатный дом», 2022. 138 с.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах: Зообентос и его продукция / Сост. А. А. Салазкин, А. Ф. Алимов, Н. П. Финогенова. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 52 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 1. Низшие беспозвоночные . СПб.: Наука, 1994. 400 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 3. Паукообразные. Низшие насекомые / Под ред. С. Я. Цалолихина. СПб.: Наука, 1997. 439 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Двукрылые насекомые / Под ред. С. Я. Цалолихина. СПб.: Наука, 2000. 997 с.

Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые / Под ред. С. Я. Цалолихина. СПб.: Наука, 2001. 825 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. **Т. 2.** Зообентос / Под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолихина. М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

Пашков А. Н., Решетников С. И. Сравнительная оценка состояния зообентосных и рыбных сообществ малых рек Черноморского побережья северо-западного Кавказа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 1 (2). С. 119–122.

Петров Д. С., Якушева А. М. Оценка экологического состояния малых водотоков Санкт-Петербурга по показателям зообентоса в 2019–2021 гг. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67 (3). С. 529–544.

Рохмистров В. Л., Наумов С. С. Физико-географические закономерности распределения речной сети Ярославского Нечерноземья / Под ред. А. Б. Дитмар // Географические аспекты рационального природопользования в Верхневолжском Нечерноземье: Межвузовский сборник науч-

ных трудов. Ярославль: ЯГПИ им. К. Д. Ушинского, 1984. С. 53–64.
Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Ин-т глобал. климата и экологии; Под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 317 с.
Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Экологическое качество пресных вод . 2-е изд., испр. Минск: Беларуская навука, 2011. 328 с.
Сиротин А. Л., Сиротина М. В. Структура зоопланктона разных биотопов малых рек Кологривского кластера заповедника «Кологривский лес» // Трансформация экосистем. 2022. № 5 (4). С. 112–125.
Хицова Л. Н., Силина А. Е., Мелашенко М. В. Доминантно-информационная структура донных зооценозов пойменных водоемов в местах обитания бобра в Усманском Бору // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2010. № 1. С. 127–132.
Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы современной идентификации. . Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
Фролова Е. А., Баянов Н. Г. Обзор фауны водных беспозвоночных (бентоса, мейобентоса и нейстона) Нижегородской области и сопредельных регионов // Вестник Мордовского госуниверситета. 2010. № 1. С. 33–41.
Яковлев В. А. Пресноводный зообентос северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика). Ч. 2 . Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН, 2005. 145 с.
Яныгина Л. В. Донные сообщества в оценке экологического состояния малой реки Издревой // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2017. Т. 47, № 4. С. 93–100.
Damanik-Ambarita M. N., Lock K., Boets P. et al. Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices // Limnologica. Vol. 57. P. 27–59. DOI: 10.1016/j.limno.2016.01.001
Dickens C. W. S., Graham P. M. The South African Scoring System (SASS) version 5 rapid bioassessment method for rivers // African Journal of Aquatic Science. 2002. Vol. 27. P. 1–10. DOI: 10.2989/16085914.2002.9626569
Mehari A. K., Wondie A., Mingist M., Vijverberg J. Spatial and seasonal variation in the macro-invertebrates and physico-chemical parameters of the Enfranz River, Lake Tana sub-basin (Ethiopia) // Ecohydrology & Hydrobiology. 2014. Vol. 14. P. 304–312. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2014.07.004
Sørensen T. Method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content // Biologiske skrifter. 1948. No 5 (4). P. 1–34.
Woodowiiss F. S. The biological system of stream classification used by the Trent Board // Chem. And Ind. 1964. Vol. 11. P. 443–447.

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATUS OF SOME SMALL RIVERS OF THE STATE NATURE RESERVE «KOLOGRIVSKY FOREST» BY ZOOBENTHOS COMMUNITIES

SOKOLOVA Tatyana Leonidovna *Ph.D., Kostroma State University, Russia Kostroma Malyshkovskaya St. 4, tl.sokol@yandex.ru*

MURADOVA Lyudmila Vladimirovna *Ph.D., Kostroma State University, Russia Kostroma Malyshkovskaya St. 4, mlv44@mail.ru*

Keywords:
macrozoobenthos
species composition
ecological groups
small rivers
biotic indexes
bioindication
bioindicators
zoogenic factor
beaver pond
Kologrivsky Forest Nature Reserve
Kostroma region

Summary: The article presents the results of studying the ecological state of some watercourses of the State Nature Reserve «Kologrivsky Forest» named after M. G. Sinitsyn according to the indicators of macrozoobenthos communities. The species diversity of macrozoobenthos, the most numerically represented taxonomic groups and species of zoobenthos organisms are presented. The abundance and biomass of this group of aquatic organisms, the features of the trophic structure, the values of the Shannon species diversity index and the Pyele equalization index for the small Sekha, Ponga, Lomenga, Londushka and Chernaya rivers were determined. The assessment of the water condition in accordance with the saprobiological system of Pantle – Buck and Woodiwiss, as well as the assessment of water quality using the biotic indices BMWP and ASPT is given. The faunal list of discovered representatives of macrozoobenthos is represented by 70 lower defined taxa (LDT). Insect larvae are the most numerous in all the rivers studied. The highest abundance rates of this group are noted in rivers with sandy bottoms, in conditions of greater overgrowth of the banks by macrophytes, whereas in conditions of sandy-muddy and muddy soil, the number of insects decreases. The greatest taxonomic diversity is characteristic of such trophic groups as predators and gatherers-detritophages. It was revealed that the Ponga, Sekha, Londushka and Chernaya rivers, characterized by a fairly rich species composition of zoobenthos, belong to the β-mesosaprobic according to the Pantle – Buck saprobiological system. According to the Woodywiss index, the Ponga, Sekha and Chernaya rivers are characterized as «moderately polluted» watercourses, while the Lomenga and Londushka rivers - as «polluted». The value of the BMWP index indicates the high water quality in the rivers of the reserve and is rated as «exceptional» in the Pong River, «very good» in the Sekha and Chernaya rivers, and «good» in the Lomenga and Londushka rivers. The ASPT index varies in different rivers from 4.7 («very good» water quality) to 6 («excellent»).

Received on: 01 March 2025 **Published on:** 21 June 2025

References

Andrianova A. V. Shan'ko Yu. V. Биотические индексы и метрики зообентоса в оценке экологического состояния крупной реки смешанного типа, Ekologiya. 2022. No. 2. P. 145–152.

Bakanov A. I. The use of zoobenthos for monitoring freshwater reservoirs (overview), Biologiya vnutrennih vod. 2000. No. 1. P. 68–82.

Bezmaternyh D. M. Zoobenthos as an indicator of the ecological status of aquatic ecosystems in Western Siberia: An Analytical review, Pod red. D. M. Bezmaternyh. Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2007. Vyp. 85. 86 p.

Chronicle of nature of the State Nature Reserve "Kologrivsky forest" named after M. G. Sinitsyn⁄ Sost. P. A. Chistyakov. Kologriv: OOO «Kostromskoy pechatnyy dom», 2022. 138 p.

Damanik-Ambarita M. N., Lock K., Boets P. et al. Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices, Limnologica. Vol. 57. P. 27–59. DOI: 10.1016/j.limno.2016.01.001

Dickens C. W. S., Graham P. M. The South African Scoring System (SASS) version 5 rapid bioassessment method for rivers, African Journal of Aquatic Science. 2002. Vol. 27. P. 1–10. DOI: 10.2989/16085914.2002.9626569

Frolova E. A. Bayanov N. G. Overview of the fauna of aquatic invertebrates (benthos, Meiobenthos, and Neuston) Nizhny Novgorod Region and adjacent regions, Vestnik Mordovskogo gosuniversiteta. 2010. No. 1. P. 33–41.

Golovatyuk L. V. Zinchenko T. D. Biotic identifiers in assessing the water quality of a reference river: a comparative analysis of bioindication indices of the Baytugan River (High Volga region), Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2020. T. 162, kn. 1. P. 134–150.

Golovatyuk L. V. Zinchenko T. D. Biotic indices and metrics in assessing the water quality of small rivers of the Lower Volga region (using the example of the Baytugan, Kamyshla, and Sosnovka rivers), Osobennosti presnovodnyh ekosistem malyh rek Volzhskogo basseyna, Pod red. G. P. Rozenberga, T. D. Zinchenko. Tol'yatti: Kassandra, 2011. P. 160–169.

Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems, In-t global. klimata i ekologii; Pod red. V. A. Abakumova. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 317 p.

Hicova L. N. Silina A. E. Melashenko M. V. Dominant information structure of bottom zoocenoses of floodplain reservoirs in beaver habitats in the Usmansky Forest, Vestnik VGU. Seriya: Himiya. Biologiya. Farmaciya. 2010. No. 1. P. 127–132.

Identification guide for freshwater invertebrites of Russia and adjacent territories. V. 1. Lower invertebrates. SPb.: Nauka, 1994. 400 p.

Identification guide for freshwater invertebrites of Russia and adjacent territories. V. 3. Arachnids. Lower insects⁄ Pod red. P. Ya. Calolihina. SPb.: Nauka, 1997. 439 p.

Identification guide for freshwater invertebrites of Russia and adjacent territories. V. 4. Diptera insects⁄ Pod red. P. Ya. Calolihina. SPb.: Nauka, 2000. 997 p.

Identification guide for freshwater invertebrites of Russia and adjacent territories. V. 5. Higher insects⁄ Pod red. P. Ya. Calolihina. SPb.: Nauka, 2001. 825 p.

Identification guide for zooplankton and zoobenthos in fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobenthos⁄ Pod red. V. R. Alekseeva, P. Ya. Calolihina. M.; SPb.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2016. 457 p.

Ivicheva K. N. Zoobenthos of small tributary rivers of the Upper Sukhona, Voda: himiya i ekologiya. 2016. No. 8 (98). P. 53–59.

Kutikova L. A. Планктон и бентос], Otv. red. d-ra biol. nauk L. A. Kutikova, Ya. I. Starobogatov; Gl. upr. gidrometeorol. sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR, Zool. in-t AN SSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 511 p.

Mehari A. K., Wondie A., Mingist M., Vijverberg J. Spatial and seasonal variation in the macro-invertebrates and physico-chemical parameters of the Enfranz River, Lake Tana sub-basin (Ethiopia), Ecohydrology & Hydrobiology. 2014. Vol. 14. P. 304–312. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2014.07.004

Methodological recommendations for the collection and processing of materials in hydrobiological studies in freshwater reservoirs: Zoobenthos and its products, Sost. A. A. Salazkin, A. F. Alimov, N. P. Finogenova. L.: GosNIORH, 1984. 52 p.

Pashkov A. N. Reshetnikov S. I. Comparative assessment of the state of zoobenthos and fish communities of small rivers of the Black Sea coast of the Northwest Caucasus, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2009. T. 11, No. 1 (2). P. 119–122.

Petrov D. S. Yakusheva A. M. Assessment of the ecological status of small watercourses of St. Petersburg according to zoobenthos indicators in 2019-2021., Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. 2022. T. 67 (3). P. 529–544.

Rohmistrov V. L. Naumov S. S. Physico-geographical patterns of distribution of the Yaroslavl Non-Chernozem region river network⁄ Pod red. A. B. Ditmar, Geograficheskie aspekty racional'nogo prirodopol'zovaniya v Verhnevolzhskom Nechernozem'e: Mezhvuzovskiy sbornik nauchnyh trudov. Yaroslavl': YaGPI im. K. D. Ushinskogo, 1984. P. 53–64.

Sørensen T. Method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content, Biologiske skrifter. 1948. No 5 (4). R. 1–34.

Semenchenko V. P. Razluckiy V. I. Ecological quality of fresh water. 2-e izd., ispr. Minsk: Belaruskaya navuka, 2011. 328 p.

Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: methods of modern identification. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.

Sirotin A. L. Sirotina M. V. Zooplankton structure of different biotopes of small rivers in the Kologrivsky cluster of the Kologrivsky Forest Reserve, Transformaciya ekosistem. 2022. No. 5 (4). P. 112–125.

The Red Book of the Kostroma region, V. I. Bondarenko, A. P. Dyukova, D. N. Zontikov ; Nauch. red. M. V. Sirotina ; Administraciya Kostromskoy oblasti, Departament prirodnyh resursov i ohrany okruzhayuschey sredy Kostromskoy oblasti, Kostromskoy gosudarstvennyy universitet. 2-e izd., pererab. i dop. Kostroma: Kostromskoy gop. un-t, 2019. 431 p.

Woodowiiss F. S. The biological system of stream classification used by the Trent Board, Chem. And Ind. 1964. Vol. 11. P. 443–447.

Yakovlev V. A. Freshwater zoobenthos of northern Fennoscandia (diversity, structure, and anthropogenic dynamics). Part 2. Apatity: Izd. Kol'skogo NC RAN, 2005. 145 p.

Yanygina L. V. Bottom communities in the assessment of the ecological status of the small Izdreeva river, Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obschestva. 2017. T. 47, No. 4. P. 93–100.

Zaycev V. A., Sirotina M. V., Muradova L. V., Sitnikova O. N. Bobry zapovednika «Kologrivskiy les», Bobry v zapovednikah evropeyskoy chasti Rossii, Pod red. N. A. Zav'yalova, L. A. Hlyap. Velikie Luki: OOO «Velikolukskaya tipografiya», 2018. P. 125–180.

Zueva N. V. Alekseev D. K. Kulichenko A. Yu. и др.Bioindikaciya i biotestirovanie v presnovodnyh ekosistemah: Uchebnoe posobie dlya vysshih uchebnyh zavedeniy . SPb.: Rossiyskiy gosudarstvennyy gidrometeorologicheskiy universitet, 2019. 140 p.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 502.4 574.1

ЗАПОВЕДНИКИ И СОХРАНЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ

КОЛБИН Василий Анфимович

кандидат биологических наук, ФГБУ Государственный заповедник "Вишерский", 618590, Пермский край, г. Красновишерск, ул. Гагарина, 67, kgularis@mail.ru

Ключевые слова:
заповедники
сохранение природы
сохранение биологического разнообразия

Аннотация: В очерке рассматривается значимость и соответствие деятельности заповедников России целям Конвенции по сохранению биологического разнообразия, ратифицированной РФ. Отмечено противоречие развития туризма в заповедниках с выполнением этой задачи. Подчеркивается невозможность сохранения природных комплексов без научного контроля состояния экосистем, особенно в условиях, когда наука в заповедниках утратила приоритетность. В реалиях нарастания негативных изменений в природе необходим возврат к концепциям классиков заповедного дела – Докучаева, Кожевникова, Реймерса, Штильмарка и переоценка доминирующих с 90-х годов прошлого века тенденций развития ООПТ.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 02 Мая 2025 года **Подписана к печати**: 10 Мая 2025 года

Термин «биоразнообразие» (biodiversity) был введен в США во второй половине 1980-х гг. в связи с сокращением площади экваториальных лесов, которые отличаются высочайшим видовым богатством (Гиляров, 2001).

В настоящее время сохранение биологического разнообразия декларируется как значимая задача государства, после того как конвенцию об этом в Рио-де-Жанейро в 1992 г. подписали министры иностранных дел 145 стран. США подписали этот документ, но не ратифицировали, Россия ратифицировала. Очевидно, что сохранением природы в СССР – России занимались и до этого события, во многих аспектах работа выполнялась даже лучше, чем сейчас, но не было столь раскрученного слогана, о котором знают чиновники множества стран, зачастую не особо понимая его смысл.

Важнейшим способом сохранения биоразнообразия по конвенции является сохранение in-situ через систему ООПТ, чему посвящена статья 8 Конвенции о биологическом разнообразии (1995). Многие пункты статьи можно напрямую использовать для обоснования работы российских заповедников в понимании русских классиков заповедной экологии.

Известно, что сохранение биологического разнообразия является одной из декларируемых задач заповедников, хотя в первой половине XX в. такой термин не использовался. При этом часто выпускается из виду, что сохраняться должно не просто видовое богатство, а конкретные, сложившиеся на данной местности природные комплексы – биоценозы или сообщества. Необходимо отметить, что первичные (коренные) сообщества часто проигрывают по обилию видов промежуточным или нарушенным экосистемам (Гиляров, 2001; Ивантер, 2013). Значимость биоразнообразия еще в XIX в. подчеркнул Ч. Дарвин в своем главном труде «Происхождение видов путем естественного отбора» (1939) (Дарвин, 2016), обозначив его как «закон суммы жизни», согласно которому «жизнь достигает наибольшей суммы при максимальном разнообразии». На практике такой постулат далеко не всегда верен. Хотя очевидно, что тропические многоярусные леса значительно более продуктивны, чем

ельники Вишерского Урала или, тем более, тундровые сообщества. Но в беднейших горных тундрах существует уникальный комплекс видов, который увеличивает совокупное биоразнообразие региона и нуждается в сохранении. Ежегодный мониторинг состояния природных сообществ ООПТ – насущная задача науки любого заповедника.

В большинстве национальных парков США, опыт работы которых с 1990-х годов, к сожалению, стало перенимать правительство РФ, нет собственной науки, поэтому управление природными комплексами было и остается далеким от идеала. Известный американский энтомолог Роберт Майкл Пайл писал: «...в большинстве случаев при управлении резерватами практические и экономические соображения имеют на практике больший вес, чем научные» (Пайл, 1989). Сейчас это же самое можно сказать про заповедники РФ… Как важнейшую задачу для правильного управления ООПТ Пайл выдвигал предварительное изучение биоценозов, что в идеале предполагает и постоянный контроль за их состоянием, т. е. экологический мониторинг. Он писал: «Прежде чем пытаться регулировать состояние какого-либо природного сообщества, нужно знать его основные элементы и их важнейшие взаимодействия. Данное сообщество должно быть охарактеризовано по меньшей мере в отношении видового состава, численности популяций и, где это возможно, истории флуктуаций этих двух переменных…» (Пайл, 1989). По большому счету Пайл выдвигает очевидные для сотрудников русских заповедников тезисы, но это только подтверждает то, что коллеги из США говорили в 80-е годы прошлого века при общении в кулуарах: «Мы хотим сделать как у вас, но не можем».

Сравнение ситуации в системе национальных парков США в 80-х годах прошлого века с заповедниками СССР оказывается совсем не в пользу первых, поскольку наши ООПТ существовали в рамках концепций русских экологов, разработанных в начале века. Отечественных ученых не смущало, что за рубежом на ООПТ нет собственных научных коллективов, соответственно, нет постоянных научных наблюдений. Григорий Александрович Кожевников считал такую организацию работы ООПТ на Западе крупным упущением и подчеркивал, что в заповедниках природа должна не только сохраняться, но и изучаться, причем изучаться стационарно с выходом на «прочные результаты» не через 5–10 (хотя через 10 лет тоже неплохо), а через 100–200 лет (Кожевников, 1928; Штильмарк, 1996; Матюшкин, 2005).

Специалисты в области охраны природы стремятся к поддержанию стабильности природных систем – экосистем, сообществ, местообитаний, видов и популяций. При этом основной упор делается на сохранение экосистем в целом. Вне всяких сомнений, это разумно, но не обеспечивает сохранения отдельных видов, численность которых приблизилась к нижнему пределу – *минимальной жизнеспособной популяции* (Сулей, 1989). Естественно, что заповедники не гарантируют сохранения таких популяций крупных видов, поскольку их площадь явно недостаточна, особенно в условиях, когда у администрации другие приоритеты. Однако сам факт существования заповедников, через которые возможно хотя бы отслеживать состояние локальных популяций угрожаемых видов, позволяет надеяться на длительное сохранение минимальной жизнеспособной популяции. Как писал Е. Н. Матюшкин: «...даже предельно локализованные очаги существования тех или иных видов обычно могут рассматриваться как популяционные пробы, инициирующие тенденции изменений на гораздо более обширной, чем сам заповедник, территории» (Матюшкин, 1991). Длительное сохранение жизнеспособных попляций возможно только при условии взаимодействия ООПТ друг с другом и с администрацией регионов.

Стратегическим приоритетом научных исследований в заповедниках должна быть природоохранная биология (concervation biology). Недопустимо распыление слабых сил заповедной науки на второстепенные или случайные темы (Станчинский, 1938; Матюшкин, 2005). К сожалению, в науке заповедников царят разброд и шатания, в одних работа ведется в рамках природоохранной биологии, в других могут выполняться узкие темы, которые весьма трудно связать с заповедными приоритетными направлениями, в третьих, как, например, в Нижне-Свирском, помимо заповедных задач проводятся массовые отловы и кольцевание птиц. Спору нет, это ценнейшая научная работа – фундаментальная орнитология, но при чем здесь сохранение природы? В ряде заповедников науки нет вообще с самого их появления (Ботчинский в Хабаровском крае). Достаточно очевидно, что по этому критерию мы всё более сближаемся с нацпарками Северной Америки.

Концептуальные проблемы и проблемы научной работы в заповедниках достаточно очевидны. В журнале «Природа» в качестве этакого взгляда со стороны вышла достаточно критическая статья А. В. Марченкова «Размышления о заповедной науке. Эпитафия» (2023). Автор в течение двух лет работал в качестве заместителя по науке одного из старых российских заповедников – Кандалакшского, увиденной изнутри картиной был удручен, о чем и отчитался на страницах известного академического издания. С львиной долей изложенного А. В. Марченковым я согласен, но не разделяю снобистского отношения к сотрудникам научных отделов, которое просматривается у автора: «…неудивительно, что в российской научной академической среде (которая и сама-то была озабочена только одним – как выжить) сложилось отношение к так называемой «заповедной науке» как к слегка ущербному разумом младшему брату: вроде и свое, родное, но рядом не поставишь – стыдно». С одной стороны, вроде бы написано отчасти верно и далеко ходить не надо, но негативные примеры можно найти в любых организациях. С другой стороны, во многих регионах РФ признанные специалисты в области экологии работают именно в заповедниках (Амурская область, Приморский край, регионы вокруг оз. Байкал и др.). А пренебрежительное отношение к заповедной науке от коллег может только дать лишний повод чиновникам для ее окончательной ликвидации (пока этот процесс носит неофициальный характер). Тем более, что отмеченные негативные тенденции – старение коллективов, отсутствие преемственности в работе – проявляются не только в заповедниках, но и в академических институтах. Вместо того, чтобы пытаться переломить ситуацию, вернуться к канонам Кожевникова, Штильмарка, Реймерса, мы окончательно хороним заповедную науку. Бесспорно, если существующие тенденции развития заповедников сохранятся, то в их штатах скоро исчезнут люди, которые смогут квалифицированно понимать состояние природных экосистем в целом.

Очень многое зависит от директоров заповедников, по сути здесь скрывается корень зла. Еще д. б. н. Ю. Р. Пузаченко писал о том, что «разрушение базовых идей заповедания и системы заповедников происходит, по существу, изнутри» (Штильмарк, 2005). Если к заповедной науке предъявляются весьма высокие квалификационные требования, то директором может стать кто угодно, лишь бы имелось какое-то высшее образование и главное – кандидатура должна удовлетворять местных чиновников. В результате руководителями ООПТ нередко становятся чуждые природе люди.

К сожалению, в современных условиях на первое место «де факто» выдвинулись такие несвойственные заповедникам СССР задачи, как развитие туризма и пиар территории, который подменяет экологическое просвещение. При этом главная задача – сохранение природы – уходит на задний план или вообще забывается руководством многих ООПТ России. Начиная с нулевых годов серьезное финансирование заповедникам выделялось только на развитие туризма. Естественно, что многие директора поняли современные правила игры и расставили для себя приоритеты…

Экологический туризм стал своего рода священной коровой заповедного дела, и необходимость его культивирования на вроде бы эталонной территории даже не обсуждается. Но для того, чтобы не переусердствовать в деле борьбы с природой, сотрудникам заповедников предложено рассчитывать *предельно допустимую рекреационную емкость*. Для этой цели было издано методическое пособие (Непомнящий и др., 2021). Рассмотрим определение экологического туризма, которое приводится в нем: «Экологический туризм (экотуризм) на ООПТ – вид туризма, включающий посещение ООПТ и (или) их охранных зон в познавательных целях путем ознакомления с природными и(или) связанными с природой культурными достопримечательностями, обеспечивающий минимизацию нарушений ландшафтов, экосистем и их компонентов, негативных воздействий на местную социокультурную среду, *способствующий сохранению биологического и ландшафтного разнообразия*, культурного наследия, а также вносящий вклад в социально-экономическое развитие посещаемой территории».

Хотелось бы, чтобы авторы сего определения привели хотя бы один пример туризма, способствующего сохранению биологического разнообразия! Или они вспомнили о том, что туристы заносят на своей одежде и обуви семена и другой генетический материал и тем самым способствуют появлению на ООПТ новых адвентивных (сорных) видов, не свойственных заповедным экосистемам, увеличивая видовое разнообразие… Но здесь уместно перечитать пункт h статьи 8 о предотвращении внедрения чужеродных

видов Конвенции о сохранении биологического разнообразия, которую РФ ратифицировала, значит, должна выполнять.

Однако в РФ действует федеральный проект «Сохранение биологического разнообразия и развитие экологического туризма», где объединены несовместимые направления деятельности. Получается, что правой рукой мы сохраняем природу (по крайней мере на словах), а левой разрушаем ее. Главный принцип сохранения природных экосистем – невмешательство в естественный ход процессов. Но о каком невмешательстве можно говорить, если по территории ООПТ, пусть в идеальном случае жестко ограниченной, бродят сотни и тысячи посетителей? Очевидно, что старое словосочетание, привычное для заповедников СССР, «эталон природы» сейчас уже неактуально и утрачивается из лексикона сотрудников заповедников. А классики писали: «Заповедники не только эталоны ландшафта или лаборатории в природе, но и духовная опора человечества» (Реймерс, Штильмарк, 1978). «…Именно наши отечественные государственные заповедники по замыслу своему являлись на самом деле своего рода образчиками и символами покаяния человечества перед изнасилованной природой… Заповедники были одной из немногих реальных форм ограничения тех самых «экономических похотей», о которых писал Бердяев» (Штильмарк, 2004).

По мнению д. б. н. А. А. Никольского, возглавлявшего главк заповедников России, к сожалению, недолгий период, «глобальная система охраняемых природных территорий есть вершина человеческой цивилизации и альтернатива обществу потребления» (Никольский, 1996). А другое его высказывание: «Принципиально важно, чтобы местное население знало, что на охраняемой природной территории царит дух благоговения перед жизнью», я бы помещал на входе в любой заповедник, но, к сожалению, в современных реалиях такой лозунг – мечта, далекая от реальности.

Библиография

Гиляров А. М. Связь биоразнообразия с продуктивностью – наука и политика // Природа. 2001. Т. 121, № 2. С. 20–24.

Дарвин Ч. Происхождение видов . М.: Эксмо, 2016. 480 с.

Ивантер Э. В. Проблемы биоразнообразия – мифология и реальность // Экология. 2013. № 5. С. 395–397.

Кожевников Г. А. Как вести научную работу в заповедниках? // Охрана природы. 1928. № 2. С. 12–19.

Конвенция о биологическом разнообразии. 1995 . URL: https://docs.cntd.ru/document/1900738 (дата обращения: 12.03.2025).

Матюшкин Е. Н. О приоритетах научных исследований в заповедниках России // Матюшкин Е. Н. Избранные труды. М.: Т-во научных изданий КМК, 2005. С. 641–650.

Матюшкин Е. Н. Размерный критерий и функции заповедных территорий в сохранении биотического разнообразия // Природоохранные территории и акватории Дальнего Востока и проблемы сохранения биологического разнообразия: Тезисы докл. науч. конф. Владивосток, 1991. С. 19–21.

Марченков А. В. Размышления о заповедной науке. Эпитафия // Природа. 2023. № 6. С. 55–64.

Никольский А. А. Этика благоговения перед жизнью как концепция заповедного дела // Про Эко. Бюллетень "Охрана дикой природы". 1996. № 11. С. 15–17.

Непомнящий В. В., Завадская А. В., Чижова В. П. Методические рекомендации по определению рекреационной емкости особо охраняемых природных территорий . Новосибирск: Наука, 2021. 96 с.

Пайл П. М. Управление природными резерватами // Биология охраны природы. М.: Мир, 1989. С. 357–367.

Реймерс Н. Ф., Штильмарк Ф. Р. Особо охраняемые природные территории . М.: Мысль, 1978. 295 с.

Сулей М. Е. Что нас ожидает? // Жизнеспособность популяций: Природоохранные аспекты. М.: Мир, 1989. С. 210–219.

Станчинский В. В. Задачи, содержание, организация и методы комплексных исследований в заповедниках // Научно-методические записки Комитета по заповедникам. 1938. Вып. 1. С. 28–50.

Штильмарк Ф. Р. Идея абсолютной заповедности. Помни праотцов – заповедного не тронь! . Киев: Киевский эколого-культурный центр; М.: Центр охраны дикой природы, 2005. 116 с.

Штильмарк Ф. Р. Историография российских заповедников (1895–1995) . М.: Логата, 1996. 340 с.

Штильмарк Ф. Р. О заповедниках вообще, о проблемах управления ими особо, а также о науке и просвещении в частности // Охрана дикой природы. 2004. № 4. С. 4–7.

NATURE RESERVES AND CONSERVATION OF BIODIVERSITY

KOLBIN Vasiliy Anfimovich *Vishersky nature reserve, 67 Gagarin Str, Krasnovishersk Perm region Russia 618590, kgularis@mail.ru*

Received on: 02 May 2025 **Published on:** 10 May 2025

References

Convention on Biological Diversity. 1995. URL: https://docs.cntd.ru/document/1900738 (data obrascheniya: 12.03.2025).

Darvin Ch. On the Origin of Species. M.: Eksmo, 2016. 480 p.

Gilyarov A. M. Linking Biodiversity to Productivity – Science and Policy, Priroda. 2001. T. 121, No. 2. P. 20–24.

Ivanter E. V. Biodiversity Issues – Mythology and Reality, Ekologiya. 2013. No. 5. P. 395–397.

Kozhevnikov G. A. How to conduct scientific work in nature reserves?, Ohrana prirody. 1928. No. 2. P. 12–19.

Marchenkov A. V. Reflections on Reserve Science. Epitaph, Priroda. 2023. No. 6. P. 55–64.

Matyushkin E. N. On the priorities of scientific research in Russian nature reserves, Matyushkin E. N. Izbrannye trudy. M.: T-vo nauchnyh izdaniy KMK, 2005. P. 641–650.

Matyushkin E. N. Size criterion and functions of protected areas in preserving biotic diversity, Prirodoohrannye territorii i akvatorii Dal'nego Vostoka i problemy sohraneniya biologicheskogo raznoobraziya: Tezisy dokl. nauch. konf. Vladivostok, 1991. P. 19–21.

Nepomnyaschiy V. V. Zavadskaya A. V. Chizhova V. P. Methodological recommendations for determining the recreational capacity of specially protected natural areas. Novosibirsk: Nauka, 2021. 96 p.

Nikol'skiy A. A. The Ethics of Reverence for Life as a Concept of Nature Conservation, Pro Eko. Byulleten' «Ohrana dikoy prirody». 1996. No. 11. P. 15–17.

Payl P. M. Management of nature reserves, Biologiya ohrany prirody. M.: Mir, 1989. P. 357–367.

Reymers N. F. Shtil'mark F. R. Protected nature areas. M.: Mysl', 1978. 295 p.

Shtil'mark F. R. About reserves in general, about the problems of managing them in particular, and also about science and education in particular, Ohrana dikoy prirody. 2004. No. 4. P. 4–7.

Shtil'mark F. R. Historiography of the Russian nature reserves (1895–1995). M.: Logata, 1996. 340 p.

Shtil'mark F. R. The idea of absolute inviolability of nature. Remember the forefathers – do not touch the protected!. Kiev: Kievskiy ekologo-kul'turnyy centr; M.: Centr ohrany dikoy prirody, 2005. 116 p.

Stanchinskiy V. V. Objectives, content, organization and methods of complex research in nature reserves, Nauchno-metodicheskie zapiski Komiteta po zapovednikam. 1938. Vyp. 1. P. 28–50.

Suley M. E. What awaits us?, Zhiznesposobnost' populyaciy: Prirodoohrannye aspekty. M.: Mir, 1989. P. 210–219.