

ISSN 1684-7318 (print)
ISSN 2541-8963 (online)

ПОВОЛЖСКИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Povolzhskiy Journal of Ecology

Номер 2

2023

Number 2



СОДЕРЖАНИЕ

Домбровская Я. В., Опаев А. С. Организация пения желтоспинной мухоловки (<i>Ficedula zanthopygia</i> , Muscicapidae, Aves)	131
Ерофеева Е. В., Суркова Ю. Е., Шубкина А. В. Современные родентициды и нецелевые виды	148
Nguyen T. T. N., Tong T. H. Assessment of lands for cassava (<i>Manihot esculenta</i> Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida) cultivation using the AHP-GIS-Remote Sensing technique [Нгуен Т. Т. Н., Тонг Т. Х. Оценка земель для выращивания маниоки (<i>Manihot esculenta</i> Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida) с использованием метода анализа иерархий, ГИС и дистанционного зондирования]	179
Нижельский М. С., Казеев К. Ш., Вилкова В. В., Федоренко А. Н., Колесников С. И. Токсичность дыма для биоты и биологической активности почв при моделировании пожаров	196
Рахуба А. В., Шерышева Н. Г. Влияние гидродинамических условий на распределение бактериобентоса в верхнем бьефе Жигулевской ГЭС Куйбышевского водохранилища	214
Стариков В. П., Кравченко В. Н., Володина О. Ю. Размножение и структура популяции полёвки-экономки <i>Alexandromys oeconomicus</i> Pallas, 1776 (Cricetidae, Rodentia) в Южном Зауралье	229
Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М. Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязнённой почвы	246



CONTENTS

Dombrovskaya Y. V., Opaev A. S. Organization of song of the Yellow-rumped flycatcher (<i>Ficedula zanthopygia</i> , Muscicapidae, Aves)	131
Erofeeva E. V., Surkova Ju. E., Shubkina A. V. Modern rodenticides and non-target species	148
Nguyen T. T. N., Tong T. H. Assessment of lands for cassava (<i>Manihot esculenta</i> Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida) cultivation using the AHP-GIS-Remote Sensing technique	179
Nizhelskiy M. S., Kazeev K. Sh., Vilkova V. V., Fedorenko A. N., Kolesnikov S. I. Smoke toxicity to the biota and the biological activity of soils when modeling fires	196
Rakhuba A. V., Sherysheva N. G. Influence of hydrodynamic conditions on the bacteriobenthos distribution in the upper reaches of the Zhiguli hydroelectric power station of the Kuibyshev reservoir	214
Starikov V. P., Kravchenko V. N., Volodina O. Yu. Breeding and population structure of the root vole <i>Alexandromys oeconomus</i> Pallas, 1776 (Cricetidae, Rodentia) in the Southern Trans-Urals region	229
Shchemelinina T. N., Anchugova E. M. Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup	246

Оригинальная статья

УДК 591.582.2:598.842.3

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-131-147>

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕНИЯ ЖЕЛТОСПИННОЙ МУХОЛОВКИ (*FICEDULA ZANTHOPYGIA*, MUSCICAPIDAE, AVES)

Я. В. Домбровская ✉, А. С. Опаев

Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33

Поступила в редакцию 30.03.2023 г., после доработки 26.04.2023 г., принята 26.04.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Пение птиц состоит из стереотипных акустических единиц (например, типов песен), которые чередуются по определенным правилам. Выделяют линейный и комбинаторный синтаксисы. В первом случае птица циклически повторяет все песни из своего репертуара в линейной последовательности. Комбинаторный синтаксис подразумевает наличие нескольких кластеров взаимно-ассоциированных типов песен, внутри которых возможны изменения порядка их исполнения. Структура и организация пения описаны для многих видов птиц, но всё ещё остаются неизученными для большинства из них. В настоящей работе впервые описали структуру и организацию пения, а также паттерны использования общих песен в популяции желтоспинной мухоловки *Ficedula zanthopygia* (Hay, 1845). Для изучения структуры пения каждого самца составляли каталоги типов песен. Организацию пения анализировали с применением методов теории информации и теории графов. Для анализа общих песен (идентичных или очень сходных у разных самцов) сравнивали попарно все типы песен всех самцов. Индивидуальные репертуары включали 8 – 31 типов песен. При пении самцы мухоловки избегают повторять один и тот же тип песни два и более раз подряд (непрерывная вариативность). При этом разные типы песен чередуются со значительной степенью свободы: в организации пения желтоспинной мухоловки не выявлено закономерностей, которые могли бы говорить о приверженности ее линейному либо комбинаторному синтаксису. Выяснилось, что сходство репертуаров двух наугад взятых самцов обычно невелико (мало общих песен). Самцы при пении не использовали предпочтительно общие либо индивидуальные типы песен, а близость территорий не предполагала наличия большего количества общих песен. Полученные результаты сопоставлены с материалом по трем другим видам того же рода *Ficedula*.

Ключевые слова: песня птиц, общие песни, организация пения, мухоловки

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-24-00001).

Для цитирования. Домбровская Я. В., Опаев А. С. Организация пения желтоспинной мухоловки (*Ficedula zanthopygia*, Muscicapidae, Aves) // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 131 – 147. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-131-147>

✉ Для корреспонденции. Лаборатория сравнительной этологии и биокommunikации Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН.

ORCID и e-mail адреса: Домбровская Яна Вячеславовна: <https://orcid.org/0009-0003-8587-294X>, dombrovskayaya@mail.ru; Опаев Алексей Сергеевич: <https://orcid.org/0000-0002-4594-1459>, aleksei.opaev@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Пение птиц – это полифункциональный сигнал, служащий в основном для привлечения брачного партнёра, а также обозначения и охраны территории (Catchpole, Slater, 2008). Пение состоит из стереотипных акустических единиц (например, типов песен или типов звуков), которые обычно чередуются по определенным правилам (Опаев, 2021; Kershenbaum et al., 2016). Поэтому пение птиц имеет синтаксис, т.е. набор правил, описывающий чередование акустических единиц при пении. Синтаксис, или, по-другому, организация пения, подробно описан для ряда видов птиц (обзоры см.: Иваницкий, 2015; Иваницкий, Марова, 2021). При описании исследователи часто используют марковские цепи первого (влияние данного типа песни/звука только на следующий за ним) или более высоких порядков (влияние данного типа песни/звука на несколько последующих). Выделяют линейный и комбинаторный синтаксисы. Линейный выражен, например, у сероголовой очковой пеночки *Phylloscopus tephrocephalus* (Anderson, 1871). Многие самцы этого вида циклически повторяют все песни из своего репертуара в жесткой линейной последовательности (Опаев, 2016). Комбинаторный синтаксис подразумевает наличие нескольких кластеров взаимно-ассоциированных типов песен, внутри которых возможны изменения порядка их исполнения. Такой тип синтаксиса выявлен, например, у калифорнийского кривоклювого пересмешника *Toxostoma redivivum* (Gambel, 1845) (Cody et al., 2016).

Для развития песни в онтогенезе важно вокальное обучение: молодые самцы копируют пение взрослых птиц (Catchpole, Slater, 2008). Это приводит к тому, что разные самцы одной популяции могут иметь в своих репертуарах идентичные или очень похожие песни. Это явление получило название «общие песни» (shared song types) (Slater, 1989; Beecher, Brenowitz, 2005). Считается, что наличие общих песен играет роль в территориальных взаимодействиях между самцами (Beecher, Brenowitz, 2005). Однако функциональные преимущества использования таких песен у многих видов остаются неясными (Beecher et al., 1997; Catchpole, Slater, 2008). Кроме того, доля общих песен в репертуарах существенно варьирует от вида к виду, а иногда – даже между разными популяциями одного вида (Hill et al., 1999; Kroodsma et al., 1999). Один из возможных детерминантов этих различий – степень оседлости. Имеются данные, что общие песни более свойственны оседлым видам, нежели мигрирующим (Ewert, Kroodsma, 1994; Kroodsma et al., 1999). Однако из этой возможной закономерности есть много исключений (например: Hill et al., 1999).

Не исключено, что особенности синтаксиса пения также могут влиять на паттерны распространения и использования общих песен. Ранее было показано, что самцы пеночек сероголовой очковой и голосистой *Phylloscopus schwarzi* (Radde, 1863), пение которых характеризуется линейным синтаксисом, имеют общие песенные последовательности из нескольких песен, т.е., предположительно, молодые самцы этих видов могут перенимать у более взрослых птиц не только отдельные песни, но также их последовательности (Опаев, 2022; Опаев, Kolesnikova, 2022).

Несмотря на то что как синтаксис пения, так и явление общих песен описаны для многих воробьиных птиц, большее количество видов всё ещё остаётся неизу-

ченным в этом плане. Это, очевидно, затрудняет проведение каких-либо обобщений. В данной работе изучали желтоспинную мухоловку *Ficedula zanthopygia* (Нау, 1845). Эта небольшая певчая птица обитает в лиственных, преимущественно пойменных лесах Восточной Азии. Самцы ярко окрашены в чёрный и жёлтый цвета с вкраплением белого. Самки оливково-серые, но, как и самцы, имеют жёлтое надхвостье (Пекло, 1987). Полученные материалы сравнили с данными по трём другим видам того же рода – это мухоловка-пеструшка *F. hypoleuca* (Pallas, 1764) (Вабищевич, Формозов, 2008; Горещкая и др., 2014; Гашков и др., 2022; Espmark, Lampe, 1993), мухоловка-белошейка *F. albicollis* (Temminck, 1815) (Garamszegi et al., 2012; Zsebők et al., 2021) и таяжная мухоловка *F. mugimaki* (Temminck, 1815) (Терешкина, 2018; Терешкина, Саловаров, 2018).

Цель настоящего исследования – описать структуру и организацию пения, а также паттерны использования общих песен в популяции желтоспинной мухоловки Хинганского заповедника.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полевые исследования. Материал собран в Антоновском лесничестве Хинганского заповедника (Амурская область; 49°24' с.ш., 129°43' в.д.) в период с 27 мая по 6 июня 2021 г. Мухоловки прилетают в район исследования в середине мая или немного позже (А. И. Антонов, личн. сообщ.; см. также: Пекло, 1987; Глушенко и др., 2016). Во время проведения наших работ многие самцы активно пели. Наша контрольная площадка (6 га) располагалась на берегу озера Клёшенского – в рёлке, образованной в основном различными видами берёз (*Betula* spp.) и монгольским дубом (*Quercus mongolica*, Fisch. ex Ledeb). Визуализацию распределения самцов желтоспинной мухоловки по площадке (рис. 1) и подсчёт расстояний между ними осуществляли в программе SAS.Планета (www.sasgis.ru).

Пение самцов записывали на профессиональный магнитофон Marantz PMD-660 (Marantz, Япония), оснащённый микрофоном Sennheiser ME66 с предусилителем K6 (Sennheiser, Германия). Для анализа были выбраны записи пения 11 самцов, предположительно – разных. В пользу того, что анализировали вокализацию разных особей, говорят существенные различия между ними в структуре репертуаров (наборов типов песен; см. ниже в разделе «Общие песни»). Для 8 самцов из 11 проанализировали по одной непрерывной записи, а для 3 птиц – по 2–3 разные записи. Для двух самцов они были сделаны в один день, но с коротким интервалом в несколько минут, а для третьего – в два разных дня (29 мая и 2 июня) в одной и той же точке.

Изученные птицы населяли контрольную площадку довольно плотно: расстояние между точками записи ближайших самцов варьировало от 26 м до 191 м (среднее 77 ± 44 м, $n = 11$). При этом, скорее всего, записали не всех самцов, так что реальная плотность населения могла быть ещё больше. Общая длительность изученных записей – 77 мин, для каждого самца 3 – 17 мин (в среднем 7 ± 4 мин, $n = 11$). Суммарно на всех записях было 1009 песен, по 57 – 180 для каждого самца (в среднем 92 ± 40 , $n = 11$).



Рис. 1. Карта контрольной площадки, на которой показаны точки записи самцов («ЖМ»)
Fig. 1. Map of the study plot to show recording points (“ЖМ”)

Акустический анализ. Визуализацию фонограмм пения проводили в программе Syrinx 2.5 (Burt, 2001). При построении спектрограмм использовали окно Блэкмана и длину быстрого преобразования Фурье, равную 1024 точкам. Пение желтоспинной мухоловки дискретное, т.е. состоит из отдельных песен, разделенных выраженными паузами. Непосредственно на спектрограммах измеряли длительности каждой песни (с) и паузы между последовательными песнями (с).

Все песни данного самца мухоловки делятся на отдельные типы песен. Тип песни – это стереотипная акустическая конструкция, в которой различные типы звуков исполняются в определённом порядке. На первом этапе анализа составили каталог типов песен каждого самца. Каждый тип был обозначен цифрой, а последовательность пения представлена в виде последовательности цифр.

Анализ организации пения. На следующем этапе анализировали последовательности цифр (т.е. типов песен), работая в программе Past 3 (Hammer et al., 2001) и среде программирования R 3.6.3 (R Core Team, 2020).

В работе последовательность пения рассматривали как марковскую цепь первого порядка, т.е. такую, где событие $n+1$ зависит только от события n . Известно, что марковская цепь первого порядка адекватно описывает организацию последовательности песен у ряда видов певчих птиц (Иваницкий, 2015; Иваницкий, Марова, 2021; Gill, Slater, 2000; Briefer et al., 2010; Ivanitskii et al., 2012; Okanoya, 2013; Опаев, 2016), хотя и не у всех (Markowitz et al., 2013). Для анализа закономерностей в чередовании разных типов песен при пении в программе PAST 3 строили матрицы наблюдаемых переходов и переходных вероятностей. По матрицам рассчитывали индекс линейности (S_{LIN}) и относительную энтропию первого порядка (RE_1) для каждого самца. Эти показатели характеризуют степень предсказуемости в следовании друг за другом песен разных типов.

Индекс линейности рассчитывался по формуле (Scharff, Nottebohm, 1991): S_{LIN} = размер репертуара / количество типов переходов между песнями разных типов. Этот индекс описывает количество наблюдаемых переходов. В линейной последовательности после каждого типа песни будет всегда следовать другой строго определенный тип ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \dots$). В этом случае $S_{LIN} = 1$. Если типов переходов больше, то S_{LIN} сокращается, стремясь к нулю.

Относительную энтропию первого порядка RE_1 рассчитывали по формуле: $RE_1 = E_1 / E_0$ (Briefer et al., 2010). Для расчета E_1 (энтропия первого порядка) и E_0 (энтропия нулевого порядка) использовали формулу Шеннона:

$$E_0 = -\sum 1 / K \log_2(1/K),$$

где K – размер репертуара (количество типов песен); $E_1 = -\sum P_i \log_2 P_i$, где P_i – наблюдаемая вероятность каждого типа перехода между песнями разных типов.

Таким образом, E_0 описывает гипотетическую последовательность, где все переходы равновероятны, и зависит только от размера репертуара. E_1 описывает наблюдаемые переходы. А отношение этих двух переменных (RE_1) можно использовать как показатель «свободы выбора» самцом каждого следующего типа песни. Например, в случае, если $RE_1 = 0.70$, можно считать, что самец имеет 70% «свободы» выбора (Briefer et al., 2010), или последовательность песен на 70% случайна.

Переходы между разными типами песен при пении визуализировали с помощью пакета “markovchain” в среде R (Spedicato, 2017).

Можно сказать, что S_{LIN} и RE_1 характеризуют соответствие песенной последовательности линейному синтаксису. Чтобы охарактеризовать комбинаторный синтаксис, использовали методы теории графов (Sasahara et al., 2012; Weiss et al., 2014). В пакете “igraph” в среде R (Csárdi, 2018), во-первых, визуализировали кластеры взаимно-ассоциированных типов песен и, во-вторых, рассчитали индексы модулярности Q . Индекс модулярности изменяется от 0 до 1 и показывает силу связи между песнями внутри кластера по сравнению со связями песен из разных кластеров. Таким образом, индекс модулярности в известной степени характеризует комбинаторный синтаксис. О последнем свидетельствуют значения $Q > 0.3 - 0.4$: считается, что в этом случае уже можно говорить о наличии кластерной структуры (Newman, 2004).

По матрице наблюдаемых переходов для каждого самца рассчитали также частоту смены напева – отношение суммы переходов к песне другого типа к сумме всех переходов.

Общие песни. Общими песнями (shared song types) называют такие, которые полностью или почти идентичны по структуре в репертуарах разных самцов (Бёме, Горещкая, 2013; Catchpole, Slater, 2008). Для выявления общих песен в изученной популяции сравнивали попарно все типы песен всех самцов. Далее составили популяционный каталог уникальных типов песен, каждый из которых был обозначен цифрой. Популяционный каталог включал как общие (встречены у двух и более самцов), так и индивидуальные (обнаружены только у одного самца) типы песен.

Статистический анализ. Анализ проведен в среде программирования R 3.5.2. Так как во многих случаях распределение изученных переменных не отли-

чалось от нормального (критерий Шапиро – Уилка, $p > 0.05$), для характеристики вариационных рядов использовали среднее и стандартное отклонения.

Чтобы оценить сходство репертуаров двух данных самцов, использовали коэффициент Жаккарда. Его рассчитывали при помощи пакета “betapart” в среде R (Baselga et al., 2018). Значения коэффициента варьируют от 0 (у двух самцов нет общих песен) до 1 (репертуары полностью совпадают). Для выявления потенциальной связи между коэффициентом Жаккарда и расстоянием между точками записи самцов использовали тест Мантела. Расчёт проводили в среде R с помощью пакета “ecodist” (Goslee, Urban, 2007). Уровень значимости теста оценивали на основе 1000 пермутаций (случайных перестановок).

Далее проанализировали, распределены ли общие песни между разными самцами случайно, или нет. Для этого анализа отмечали, сколько самцов имеет в своих репертуарах каждый тип песни. Если распределение этой выборки соответствует степенному распределению, то, как считается, распространение песен разных типов в популяции обусловлено случайными процессами, например культурным дрейфом (Byers et al., 2010). Иными словами, самцы не копируют друг у друга какие-то определенные типы песен или группы песен чаще, чем другие. Для оценки соответствия распределения по самцам разных типов песен степенному использовали пакет “powerlaw” в среде R (Gillespie, 2015).

Также в работе использовали корреляцию Пирсона и критерий Манна – Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура и организация песни. Желтоспинная мухоловка обладает дискретной манерой пения. Имеются чётко выраженные песни, средняя длительность которых у разных самцов составила $0.61 - 0.89$ с (среднее 0.72 ± 0.08 с, $n = 11$). Последовательные песни разделены паузой, средняя длительность которой у разных самцов $2.06 - 4.57$ с (среднее 3.37 ± 0.76 с, $n = 11$). Сама песня довольно громкая, она состоит из 3 – 5 звуков, преимущественно тоновых, многие из которых модулированы по частоте (рис. 2).

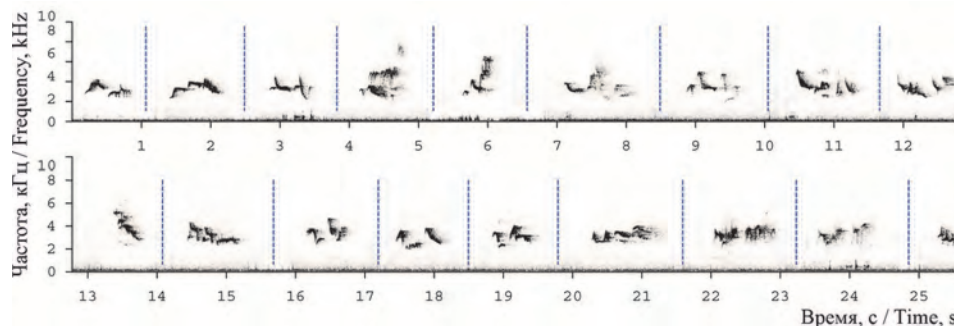


Рис. 2. Фрагмент каталога типов песен самца № 3 желтоспинной мухоловки

Fig. 2. A fragment of the song type catalog of male no. 3 of the Yellow-rumped flycatcher

Индивидуальные репертуары включали 8 – 31 типов песен, в среднем 17 ± 6 ($n = 11$). Не выявлено связи между размером репертуара данного самца и количеством записанных песен (корреляция Пирсона: $p > 0.05$). Таким образом, наша выборка позволила адекватно оценить репертуары разных птиц.

В процессе пения желтоспинная мухоловка обычно не использует один и тот же тип песни два или более раза подряд. Частота смены напева у разных самцов составила в среднем 0.98 ± 0.03 ($n = 11$). В то же время самцы имели существенную свободу выбора каждой следующей песни (рис. 3). Об этом говорят низкие значения индекса линейности и высокие – относительной энтропии. В нашей выборке S_{LIN} в среднем равнялся 0.28 ± 0.06 (разброс 0.16 – 0.35, $n = 11$), а $RE_1 = 0.40 \pm 0.12$ (разброс 0.27 – 0.64, $n = 11$). Значения индекса модулярности также были невелики и меньше 0.3, что указывает на отсутствие кластерной структуры: в среднем 0.16 ± 0.08 (разброс 0.05 – 0.32, $n = 11$). Таким образом, в организации пения желтоспинной мухоловки не выявлено закономерностей, которые могли бы говорить о приверженности её линейному либо комбинаторному синтаксису. Однако в пении ряда особей можно обнаружить короткие последовательности из 2–3 типов песен, исполняемых самцом в ассоциации друг с другом. Таковы, например, обозначенные зеленым кластеры на рис. 3: они включают типы песен 7, 13 и 38 у самца № 2, и типы песен 43 и 58 у самца № 9. Однако, как видно из рис. 3, даже названные типы могут нередко исполняться в других комбинациях.

Общие песни. Проанализировав 1008 песен 11 самцов, составили общий (популяционный) каталог. В нем было 108 типов песен. Из них 65 типов оказались индивидуальными, т.е. использовались только одним самцом. Остальные 43 типа – это общие песни (рис. 4). Каждая из них была выявлена в репертуарах 2 – 8 особей (среднее 2.9 ± 1.4 , $n = 43$). Индекс Жаккарда в среднем составил 0.09 ± 0.08 (разброс 0 – 0.43, $n = 55$). Таким образом, у самцов желтоспинной мухоловки в целом довольно много индивидуальных песен, а сходство репертуаров двух наугад взятых самцов обычно невелико. Тем не менее, доля общих песен в индивидуальных репертуарах может быть высока – в среднем $65.6 \pm 21.0\%$ (разброс 16.6 – 91.7%, $n = 11$).

Тест Мантела показал, что коэффициент Жаккарда не связан с расстоянием между точками записи двух данных самцов ($p > 0.05$), т.е. близость территорий не предполагает наличия большого количества общих песен. Затем посмотрели, соответствует ли распределение общих песен между разными самцами степенному закону. Уровень значимости в этом анализе составил $p = 0.49$. Следовательно, мы не можем на уровне значимости 5% отвергнуть нулевую гипотезу о том, что данное распределение соответствует степенному.

Самцы при пении не использовали предпочтительно общие либо индивидуальные типы песен. У 10 самцов из 11 частота использования тех и других не отличалась (критерий Манна – Уитни, $W = 5.5 - 110$, $p > 0.05$ для каждого из 10 самцов). Лишь одна особь использовала общие песни достоверно чаще, чем индивидуальные (критерий Манна – Уитни, $W = 10$, $p = 0.03$).

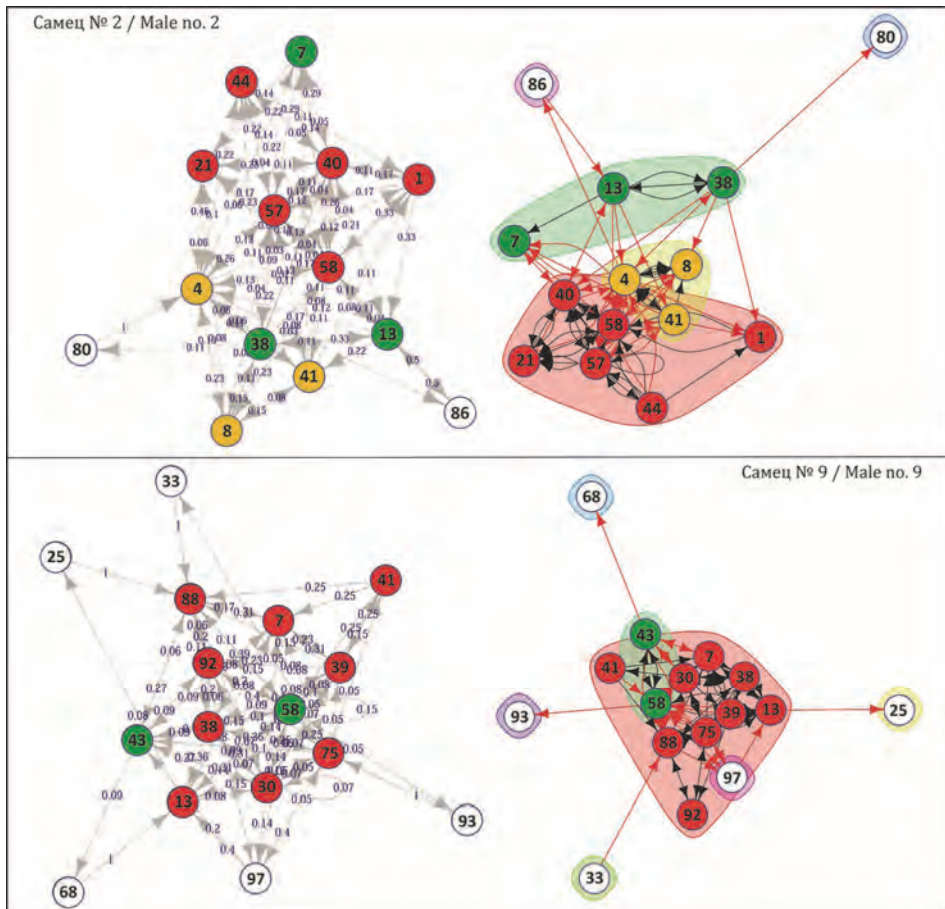


Рис. 3. Организация пения двух самцов желтоспинной мухоловки, показанная в виде марковской цепи первого порядка (*слева*) и выявленная методами теории графов (*справа*). Кружки соответствуют отдельным типам песен, цифры в них – номера этих типов в популяционном каталоге. На рисунках *слева* показаны все наблюдаемые переходы между разными типами песен при пении и приведены наблюдаемые вероятности этих переходов. *Справа* разными цветами выделены песни разных кластеров (на рисунке *слева* для наглядности приведены те же цвета); стрелки показывают наиболее частые переходы: черные внутри кластеров, а красные – между кластерами. Белые кружки – песни, не отнесенные ни к одному из кластеров

Fig. 3. All transition types between song types in two Yellow-rumped flycatcher males illustrated using the first-order Markov chain approach (*left*) and network analysis (*right*). Numbers in circles show the individual song types of each male; these numbers correspond to the numbers in the catalog of the population repertoire. On the *left* figure, each arrow represents the observed transitions between song types, and the number at the arrow shows transition probability. On the *right* figure, different clusters of song types are highlighted in different colors (the same colors are shown in the left figure for clarity); arrows show the most frequent transitions: black arrows show transitions within one cluster, and red arrows – between song types from different clusters. White circles are song types which were not assigned to any cluster

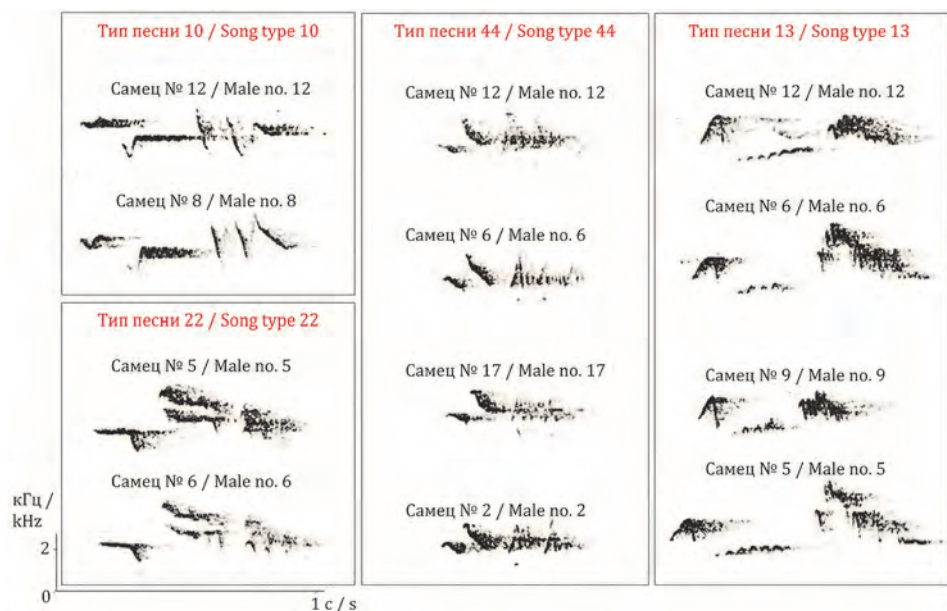


Рис. 4. Примеры общих типов песен у разных самцов желтоспинной мухоловки. Приведены номер типов песни в популяционном каталоге и номер самца, от которого данная песня была записана

Fig. 4. Spectrograms of shared song types of the Yellow-rumped flycatchers. The song type number and the individual which the song was recorded from are shown for each spectrogram

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе впервые аналитически описали основные особенности пения желтоспинной мухоловки. Репертуары самцов этого вида состоят из стереотипных типов песен. При пении самцы чередуют разные типы с высокой степенью свободы, но избегают повторять один и тот же тип песни два (или более) раза подряд. Пение других видов мухоловок рода *Ficedula* может быть организовано по-иному.

Особенно хорошо изучена вокализация двух близких видов – мухоловки-пеструшки и мухоловки-белошейки. Манера пения этих видов дискретная, однако стереотипные типы песен отсутствуют. Индивидуальные репертуары включают несколько десятков типов звуков – до 64 у мухоловки-пеструшки (Гашков и др., 2022) и около 50 – у мухоловки-белошейки (Zsebők et al., 2021). При пении самцы составляют из этих звуков песни, в той или иной степени импровизируя. Однако разные типы звуков чередуются всё же не случайно. Так, у мухоловки-белошейки за некоторыми из типов звуков всегда следует другие, строго определённые типы (Zsebők et al., 2021).

Пение таежной мухоловки описано Ю. Д. Терешкиной и В. О. Саловаровым (Терешкина, 2018; Терешкина, Саловаров, 2018). Репертуар этого вида, как и мухоловки желтоспинной, состоит из отдельных типов песен длительностью около

1.8 – 3.3 с каждая. Каждая песня состоит из трелевого вступления (продолжительность которого особенно вариабельна) и основной части. Судя по просмотренным нами нескольким фонограммам, любезно предоставленным Ю. Д. Терешкиной, разные типы песен одного самца часто (или даже всегда) имеют одинаковое вступление, но различаются основной частью. Индивидуальные репертуары, судя по всему, существенно меньше таковых у желтоспинной мухоловки и включают всего несколько типов песен. Но вот сама песня намного сложнее песни желтоспинной мухоловки. Она может состоять из более, чем десятка разных коротких тоновых звуков. Большинство их имеет резкую восходящую или нисходящую частотную модуляцию.

Таким образом, в пределах рода *Ficedula* выражена дивергенция в структуре и организации пения. Она проявляется и при сравнении близких видов. Желтоспинная мухоловка относится к комплексу видов японская мухоловка *F. narcissina* (Temminck, 1836) – желтоспинная мухоловка. Сюда относятся мухоловки желтоспинная, японская, китайская *F. elisae* (Weigold, 1922) и рюкюская *F. owstoni* (Bangs, 1901) (Dong et al., 2015). Организация пения последних трех видов в деталях не описана. Но известно, что структура отдельных песен мухоловок названного комплекса существенно различна, что легко детектируется и на слух (Dong et al., 2015; Chen et al., 2020).

Наше исследование показало, что индивидуальность репертуаров самцов желтоспинной мухоловки высока. В популяционном каталоге большую часть (58%) составляли индивидуальные типы песен (выявлены только у одного самца), а сходство репертуаров двух данных самцов обычно невелико. Сопоставить эти данные с другими мигрирующими воробьиными трудно. Дело в том, что среди них известны как виды, вообще не имеющие общих песен (например, дрозд-отшельник *Catharus guttatus* (Pallas, 1811): Roach et al., 2012), так и те, в репертуарах которых общие вокальные структуры составляют большинство (дроздовидная камышевка *Acrocephalus arundinaceus* (Linnaeus, 1758): Węgrzyn, Leniowski, 2010). Причины таких различий не ясны. Аналогично, мы не можем указать на факторы, влияющие на относительно небольшую долю общих песен в изученной популяции желтоспинной мухоловки.

Выскажем одно соображение по этому поводу. Ранее было предположено, что упорядоченная организация пения может способствовать распространению в популяции общих типов песен (Опаев, 2022). В качестве примеров можно привести два вида пеночек – голосистую *Phylloscopus schwarzi* (Radde, 1863) и сероголовую очковую (Опаев, 2022; Опаев, Kolesnikova, 2022). Пение многих самцов обоих видов упорядочено – данная песня определяет ту, что будет исполнена следующей (линейный синтаксис). Индивидуальные репертуары голосистой пеночки включали 18 – 42 типов песен, а сероголовой расписной – 29 – 42. Оказалось, что в популяциях этих видов общие песни распространены существенно шире, чем у желтоспинной мухоловки. Так, у сероголовой расписной пеночки общими были 93 типа из 118, составляющих популяционный каталог, а у голосистой – 96 из 116. Скорее, дело в том, что линейный синтаксис даёт возможность самцам перенимать друг у друга не только отдельные песни, но и короткие (до 5 типов песен) песенные по-

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕНИЯ ЖЕЛТОСПИННОЙ МУХОЛОВКИ

следовательности (Опаев, 2022). А это, при прочих равных условиях, увеличивает число типов песен, выученных данным самцом у одной конкретной особи-учителя. В конечном итоге это может приводить к широкому распространению общих песен в популяции. Таким образом, линейный синтаксис и обилие общих песен могут быть связаны. Если это так, то справедливо и обратное. У видов с неупорядоченной организацией пения доля общих песен в среднем должна быть меньше, что и наблюдается у желтоспинной мухоловки. Косвенно эту идею подтверждает также то, что распределение общих песен в изученной популяции мухоловки соответствует степенному: как считается, это говорит о влиянии случайных факторов. Таким образом, приведённые в работе данные не противоречат ранее высказанной идее о том, что распространение в популяции общих типов песен зависит в том числе от особенностей организации пения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бёме И. Р., Горещкая М. Я. Песни птиц: учебное пособие. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2013. 78 с.

Вабищевич А. П., Формозов Н. А. Изменчивость песни мухоловки-пеструшки (*Ficedula hypoleuca*) в зоне симпатрии с мухоловкой-белошейкой (*Ficedula albicollis*) // Зоологический журнал. 2008. Т. 87, № 7. С. 830 – 840.

Гашков С. И., Бастрикова А. Е., Москвитина Н. С. Структура песенных репертуаров томской популяции мухоловки-пеструшки (*Ficedula hypoleuca*) и их возрастная изменчивость // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2022. № 57. С. 46 – 66.

Горещкая М. Я., Ильина Т. А., Попова Д. В. Песня мухоловки-пеструшки (*Ficedula hypoleuca*): гипотезы и факты // Птицы-дуплогнезники как модельные объекты в решении проблем экологии и эволюции: материалы международной конференции. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2014. С. 88 – 91.

Глушенко Ю. Н., Нечаев В. А., Редькин Я. А. Птицы Приморского края: краткий фаунистический обзор. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2016. 523 с.

Иваницкий В. В. Песня птиц как микроскоп современной науки: между биоакустикой и лингвистикой // XIV Международная орнитологическая конференция Северной Евразии. II. Доклады / Мензбирское орнитологическое общество. Алматы, 2015. С. 418 – 435.

Иваницкий В. В., Марова И. М. Синтаксическая организация песни птиц // Зоологический журнал. 2021. Т. 100, № 10. С. 1145 – 1158. <https://doi.org/10.31857/S0044513421100068>

Опаев А. С. Пение певчих воробьиных птиц (Passeri): структура, эволюция и роль в коммуникации: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2021. 44 с.

Опаев А. С. Насколько длинные вокальные композиции могут запоминать птицы? Общие песенные последовательности у самцов голосистой пеночки (*Phylloscopus schwarzi*) (Passeriformes, Aves) // Поволжский экологический журнал. 2022. № 3. С. 361 – 369. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-361-369>

Пекло А. М. Мухоловки фауны СССР. Киев : Наук. думка, 1987. 180 с.

Терешкина Ю. Д. Общая характеристика песни таежной мухоловки (*Ficedula mugimaki* Temminck, 1836) // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного аграрного университета, 2018. С. 320 – 325.

Терешкина Ю. Д., Саловаров В. О. Общая характеристика вариантов песни таежной мухоловки *Ficedula mugimaki* (Temminck, 1836) // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы VII Международной научно-практической конференции. Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет, 2018. С. 185 – 190.

Baselga A., Orme D., Villeger S., De Bartoli J., Leprieux F. Betapart: Partitioning beta diversity into turnover and nestedness components. R package version 1.5.1. 2018. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=betapart> (accessed 15 September 2020).

Beecher M. D., Brenowitz E. A. Functional aspects of song learning in songbirds // Trends in Ecology and Evolution. 2005. Vol. 20, iss. 3. P. 143 – 149. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.01.004>

Beecher M. D., Nordby J. C., Campbell S. E., Burt J. M., Hill C. E., O’Loghlen A. L. What is the function of song learning in songbirds? // Communication. Perspective in Ethology. Vol. 12 / eds. D. H. Owings, M. D. Beecher, N. S. Thompson. Boston: Springer, 1997. P. 77 – 97.

Briefer E., Osiejuk T., Rybak F., Aubin T. Are bird song complexity and song sharing shaped by habitat structure? An information theory and statistical approach // Journal of Theoretical Biology. 2010. Vol. 262, iss. 1. P. 151 – 164.

Burt J. Syrinx: Real time spectrographic recording, analysis, and playback of sounds. Seattle: Department of Psychology, University of Washington, 2001. Available at: <http://www.syrinxpc.com> (accessed 1 March 2006).

Byers B. E., Belinsky K. L., Bentley R. A. Independent cultural evolution of two song traditions in the chestnut-sided warbler // American Naturalist. 2010. Vol. 176, no. 4. P. 476 – 489.

Catchpole C. K., Slater P. J. B. Bird Song: Biological Themes and Variations. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 335 p.

Chen G., Xia C., Zhang Y. Individual identification of birds with complex songs: The case of green-backed flycatchers *Ficedula elisae* // Behavioral Processes. 2020. Vol. 173. Article number 104063.

Cody M. L., Stabler E., Castellanos H. M. S., Taylor C. E. Structure, syntax and «small-world» organization in the complex songs of California Thrashers (*Toxostoma redivivum*) // Bioacoustics. 2016. Vol. 25, iss. 1. P. 41 – 54.

Csárdi G. Package ‘igraph’. R package. 2018. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/igraph> (accessed 1 October 2018).

Dong L., Wei M., Alström P., Huang X., Olsson U., Shigeta Y., Zhang Y., Zheng G. Taxonomy of the Narcissus Flycatcher *Ficedula narcissina* complex: An integrative approach using morphological, bioacoustic and multilocus DNA data // Ibis. 2015. Vol. 157, iss. 2. P. 312 – 325.

Espmark Y. O., Lampe H. M. Variations in the song of the pied flycatcher within and between breeding seasons // Bioacoustics. 1993. Vol. 5, iss. 1–2. P. 33 – 65.

Ewert D. N., Kroodsma D. E. Song sharing and repertoires among migratory and resident Rufous-sided Towhees // Condor. 1994. Vol. 96, iss. 1. P. 190 – 196.

Garamszegi L. Z., Zsebok S., Török J. The relationship between syllable repertoire similarity and pairing success in a passerine bird species with complex song // Journal of Theoretical Biology. 2012. Vol. 295. P. 68 – 76.

Gil D., Slater P. J. B. Song organization and singing patterns of the willow warbler, *Phylloscopus trochilus* // Behaviour. 2000. Vol. 137, iss. 6. P. 759 – 782.

Gillespie C. S. Fitting Heavy Tailed Distributions: The powerLaw Package // Journal of Statistical Software. 2015. Vol. 64, iss. 2. P. 1 – 16. <https://doi.org/10.18637/jss.v064.i02>

Goslee S. C., Urban D. L. The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data // Journal of Statistical Software. 2007. Vol. 22, iss. 7. P. 1 – 19.

Hammer O., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis // Paleontologia Electronica. 2001. Vol. 4, № 1. P. 1 – 9.

Hill C. E., Campbell S. E., Nordby J. C., Burt J. M., Beecher M. D. Song sharing in two populations of song sparrows (*Melospiza melodia*) // Behavioral Ecology and Sociobiology. 1999. Vol. 46, iss. 5. P. 341 – 349.

Ivanitskii V. V., Marova I. M., Malykh I. M. Between order and chaos: Contrasting syntax in the advertising song of Dusky (*Phylloscopus fuscatus*) and Radde's (*Ph. schwarzi*) Warblers // Journal of Ornithology. 2012. Vol. 153, iss. 2. P. 337 – 347.

Kershenbaum A., Blumstein D. T., Roch M. A., Akcay C., Backus G., Bee M. A., Bohn K., Cao Y., Carter G., Casar C., Coen M., DeRuiter S. L., Doyle L., Edelman S., Ferrer I. C. R., Freeberg T. M., Garland E. C., Gustison M., Harley H. E., Huetz C., Hughes M., Hyland Bruno J., Ilany A., Jin D. Z., Johnson M., Ju C., Karnowski J., Lohr B., Manser M. B., McCowan B., Mercado E., Narins P. M., Piel A., Rice M., Salmi R., Sasahara K., Sayigh L., Shiu Y., Taylor C., Vallejo E. E., Waller S., Zamora-Gutierrez V. Acoustic sequences in non-human animals: A tutorial review and prospectus // Biological Reviews of Cambridge Philosophical Society. 2016. Vol. 91, iss. 1. P. 13 – 52.

Kroodsma D. E., Sanchez J., Stemple D. W., Goodwin E., Silva M. L. D., Vielliard J. M. E. Sedentary life style of Neotropical Sedge Wrens promotes song imitation // Animal Behaviour. 1999. Vol. 7, iss. 4. P. 855 – 863.

Markowitz J. E., Ivie E., Kligler L., Gardner T. J. Long-range order in canary song // PLoS Computational Biology. 2013. Vol. 9. Article number e1003052.

Newman M. E. J. Fast algorithm for detecting community structure in network // Physical Review. 2004. Vol. 69. Article number 066133.

Okanoya K. Finite-state song syntax in Bengalese finches: Sensorimotor evidence, developmental processes, and formal procedures for syntax extraction // Birdsong, Speech, and Language. Exploring the Evolution of Mind and Brain / eds. J. Bolhuis, M. Everaert. London: MIT Press, 2013. P. 229 – 242.

Opaev A. Relationships between repertoire size and organization of song bouts in the Grey-crowned Warbler (*Seicercus tephrocephalus*) // Journal of Ornithology. 2016. Vol. 157, iss. 4. P. 949 – 960.

Opaev A. S., Kolesnikova Y. A. Song theme sharing in the Grey-crowned Warbler *Phylloscopus tephrocephalus* // Bioacoustics. 2022. Vol. 31, iss. 2. P. 191 – 207.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2020. Available at: <http://www.R-project.org> (accessed 17 December 2020).

Roach S. P., Johnson L., Phillimore L. S. Repertoire composition and singing behaviour in two eastern populations of the Hermit Thrush (*Catharus guttatus*) // Bioacoustics. 2012. Vol. 21, iss. 3. P. 239 – 252.

Sasahara K., Cody M. L., Cohen D., Taylor C. E. Structural design principles of complex bird songs: A network-based approach // PLoS ONE. 2012. Vol. 7, iss. 9. Article number e44446.

Scharff C., Nottebohm F. A comparative study of the behavioral deficits following lesions of various parts of the zebra finch song system: Implications for vocal learning // Journal of Neuroscience. 1991. Vol. 11, iss. 9. P. 2896 – 2913.

Slater P. J. B. Bird song learning: Causes and consequences // Ethology, Ecology and Evolution. 1989. Vol. 1, iss. 1. P. 19 – 46. <https://doi.org/10.1080/08927014.1989.9525529>

Spedicato G. A. Discrete time Markov chains with R // The R Journal. 2017. Vol. 9, iss. 2. P. 84 – 104.

Węgrzyn E., Leniowski K. Syllable sharing and changes in syllable repertoire size and composition within and between years in the great reed warbler, *Acrocephalus arundinaceus* // Journal of Ornithology. 2010. Vol. 151, iss. 2. P. 255 – 267.

Weiss M., Hultsch H., Adam I., Scharff C., Kipper S. The use of network analysis to study complex animal communication systems: a study on nightingale song // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2014. Vol. 281. Article number 20140460.

Zsebők S., Herczeg G., Laczi M., Nagy G., Vaskuti E., Hargitai R., Hegyi G., Herényi M., Markó G., Rosivall B., Szász E., Szöllősi E., Török J., Garamszegi L. Z. Sequential organization of birdsong: Relationships with individual quality and fitness // Behavioral Ecology. 2021. Vol. 32, iss. 1. P. 82 – 93.

Organization of song of the Yellow-rumped flycatcher (*Ficedula zanthopygia*, Muscicapidae, Aves)

Y. V. Dombrovskaya ✉, A. S. Opaev

A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences
33 Leninsky Pros., Moscow 119071, Russia

Received: 30 March 2023 / revised: 26 April 2023 / accepted: 26 April 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. Birdsong consists of stereotypical song types or syllables which follow each other according to certain rules. Based on these rules, linear and combinatorial syntaxes are identified. The former one implies a fixed sequence of song types repeated cyclically. In the combinatorial syntax, there are clusters of song types, within which song types may be performed in a varying sequence. The structure and organization of birdsong have been described for many species, but still remain unexplored for most of them. We studied for the first time the song structure and organization, as well as song sharing for the Yellow-rumped flycatcher *Ficedula zanthopygia* (Hay, 1845). First of all, we determined the repertoire of song types in each male. Then, the organization of singing was analyzed using methods of information theory and network analysis. To analyze the patterns of song sharing, we compared all song types of all males. Individual repertoires consisted from 8–31 song types. While singing, male flycatchers avoid repeating the same song type two or more times in a row (continuous variety). At the same time, different song types alternate with a much degree of freedom: we did not reveal any patterns which could indicate the presence of either linear or combinatorial syntax. Males generally shared few song types, and the similarity of the repertoires of any two males was small. Besides, males did not preferably use shared or individual (i.e., found in the only one male) song types. Song sharing was not related to the distance between males. The results were compared to what is known about the song structure and organization of the other three *Ficedula* species studied to date.

Keywords: bird song, song sharing, song organization, flycatchers

Funding. This work was supported financially by the Russian Science Foundation (project No. 22-24-00001).

For citation: Dombrovskaya Y. V., Opaev A. S. Organization of song of the Yellow-rumped flycatcher (*Ficedula zanthopygia*, Muscicapidae, Aves). *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 131–147 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-131-147>

REFERENCES

- Boeme I. R., Goretskaia M. Ya. *Pesni ptits: uchebnoe posobie* [Songs of Birds (textbook)]. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2013. 78 p. (in Russian)
- Vabishchevich A. P., Formozov N. A. Variability of the Pied flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) song in the zone of sympatry with the Collared flycatcher (*Ficedula albicollis*). *Zoologicheskii zhurnal*, 2008, vol. 87, no. 7, pp. 830–840 (in Russian).

✉ *Corresponding author.* Laboratory of Comparative Ethology and Biocommunication, A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Yana V. Dombrovskaya: <https://orcid.org/0009-0003-8587-294X>, dombrovskayaya@mail.ru; Alexey S. Opaev: <https://orcid.org/0000-0002-4594-1459>, aleksei.opaev@gmail.com.

- Gashkov S. I., Bastrikova A. E., Moskvitina N. S. The structure of song repertoires of the Tomsk population of the pied flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) and their age-related variability. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2022, no. 57, pp. 46–66 (in Russian).
- Goretskaia M. Ya., Ilyina T. A., Popova D. V. The pied flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) song: Hypothesis and facts. In: *Hole-Nesting Birds as a Model Object in Solving the Problems of Population Ecology and Evolution. Materials of the International Conference*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2014, pp. 88 – 91 (in Russian).
- Gluschenko Yu. N., Nechaev V. A., Red'kin Ya. A. *Birds of Primorsky Krai: Brief Review of the Fauna*. Moscow, KMK Scientific Press, 2016. 523 p. (in Russian).
- Ivanitskii V. V. Bird songs as a microcosm of modern science: Between bioacoustics and linguistics. *XIV International Ornithological Conference of Northern Eurasia. II. Oral presentations*. Almaty, Menzbier Ornithological Society Publ., 2015, pp. 418–435 (in Russian).
- Ivanitskii V. V., Marova I. M. Syntactic organization of bird song. *Zoologicheskii zhurnal*, 2021, vol. 100, no. 10, pp. 1145–1158 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044513421100068>
- Opaev A. S. *Song of Passerine Birds (Passeri): Structure, Evolution, and Role in Communication*. Thesis Diss. Dr. Sci. (Biol.). Moscow, 2021. 44 p. (in Russian).
- Opaev A. S. How long are the vocal sequences a passerine bird can memorize? Common song sequences of Radde's warbler males (*Phylloscopus schwarzi*) (Passeriformes, Aves). *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 3, pp. 361–369 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-361-369>
- Peklo A. M. *Mukholovki fauny SSSR* [Fauna of the Flycatchers of the USSR]. Kiev, Naukova dumka, 1987. 180 p. (in Russian).
- Tereshkina Yu. D. General characteristics of the songs of the taiga flycatcher (*Ficedula mugimaki* Temminck, 1836). In: *Nauchnye issledovaniya studentov v reshenii aktual'nykh problem APK: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Scientific Research of Students in Solving Urgent Problems of the Agroindustrial Complex: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Irkutsk, Irkutsk State Agrarian University Publ., 2018, pp. 320–325 (in Russian).
- Tereshkina Yu. D., Salovarov V. O. General characteristics of versions of the song taiga flycatcher *Ficedula mugimaki* (Temminck, 1836). *Klimat, ekologiya, sel'skoe khoziaistvo Evrazii: materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Climate, Ecology, Agriculture in Eurasia: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]. Irkutsk, Irkutsk State Agrarian University Publ., 2018, pp. 185–190 (in Russian).
- Baselga A., Orme D., Villeger S., De Bartoli J., Leprieux F. *betapart: partitioning beta diversity into turnover and nestedness components*. R package version 1.5.1. 2018. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=betapart> (accessed 15 September 2020).
- Beecher M. D., Brenowitz E. A. Functional aspects of song learning in songbirds. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, vol. 20, iss. 3, pp. 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.01.004>
- Beecher M. D., Nordby J. C., Campbell S. E., Burt J. M., Hill C. E., O'Loughlin A. L. What is the function of song learning in songbirds? In: D. H. Owings, M. D. Beecher, N. S. Thompson, eds. *Communication. Perspective in Ethology*. Vol. 12. Boston, Springer, 1997, pp. 77–97.
- Briefer E., Osiejuk T., Rybak F., Aubin T. Are bird song complexity and song sharing shaped by habitat structure? An information theory and statistical approach. *Journal of Theoretical Biology*, 2010, vol. 262, iss. 1, pp. 151–164.
- Burt J. *Syrinx: Real time spectrographic recording, analysis, and playback of sounds*. Seattle: Department of Psychology, University of Washington, 2001. Available at: <http://www.syrinxpc.com> (accessed 1 March 2006).
- Byers B. E., Belinsky K. L., Bentley R. A. Independent cultural evolution of two song traditions in the chestnut-sided warbler. *American Naturalist*, 2010, vol. 176, no. 4, pp. 476–489.

- Catchpole C. K., Slater P. J. B. *Bird Song: Biological Themes and Variations*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 335 p.
- Chen G., Xia C., Zhang Y. Individual identification of birds with complex songs: The case of green-backed flycatchers *Ficedula elisae*. *Behavioral Processes*, 2020, vol. 173, article number 104063.
- Cody M. L., Stabler E., Castellanos H. M. S., Taylor C. E. Structure, syntax and “small-world” organization in the complex songs of California Thrashers (*Toxostoma redivivum*). *Bioacoustics*, 2016, vol. 25, iss. 1, pp. 41–54.
- Gillespie C. S. Fitting heavy tailed distributions: The powerLaw Package. *Journal of Statistical Software*, 2015, vol. 64, iss. 2, pp. 1–16. <https://doi.org/10.18637/jss.v064.i02>
- Csárdi G. *Package ‘igraph’*. *R package*. 2018. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/igraph> (accessed 1 October 2018).
- Dong L., Wei M., Alström P., Huang X., Olsson U., Shigeta Y., Zhang Y., Zheng G. Taxonomy of the Narcissus Flycatcher *Ficedula narcissina* complex: An integrative approach using morphological, bioacoustic and multilocus DNA data. *Ibis*, 2015, vol. 157, iss. 2, pp. 312–325.
- Espmark Y. O., Lampe H. M. Variations in the song of the pied flycatcher within and between breeding seasons. *Bioacoustics*, 1993, vol. 5, iss. 1–2, pp. 33–65.
- Ewert D. N., Kroodsma D. E. Song sharing and repertoires among migratory and resident Rufous-sided Towhees. *Condor*, 1994, vol. 96, iss. 1, pp. 190–196.
- Garamszegi L. Z., Zsebok S., Török J. The relationship between syllable repertoire similarity and pairing success in a passerine bird species with complex song. *Journal of Theoretical Biology*, 2012, vol. 295, pp. 68–76.
- Gil D., Slater P. J. B. Song organization and singing patterns of the willow warbler, *Phylloscopus trochilus*. *Behaviour*, 2000, vol. 137, iss. 6, pp. 759–782.
- Goslee S. C., Urban D. L. The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data. *Journal of Statistical Software*, 2007, vol. 22, iss. 7, pp. 1–19.
- Hammer O., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 1–9.
- Hill C. E., Campbell S. E., Nordby J. C., Burt J. M., Beecher M. D. Song sharing in two populations of song sparrows (*Melospiza melodia*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1999, vol. 46, iss. 5, pp. 341–349.
- Ivanitskii V. V., Marova I. M., Malykh I. M. Between order and chaos: Contrasting syntax in the advertising song of Dusky (*Phylloscopus fuscatus*) and Radde’s (*Ph. schwarzi*) Warblers. *Journal of Ornithology*, 2012, vol. 153, iss. 2, pp. 337–347.
- Kershenbaum A., Blumstein D. T., Roch M. A., Akcay C., Backus G., Bee M. A., Bohn K., Cao Y., Carter G., Casar C., Coen M., DeRuiter S. L., Doyle L., Edelman S., Ferrer I. C. R., Freeberg T. M., Garland E. C., Gustison M., Harley H. E., Huetz C., Hughes M., Hyland Bruno J., Ilany A., Jin D. Z., Johnson M., Ju C., Karnowski J., Lohr B., Manser M. B., McCowan B., Mercado E., Narins P. M., Piel A., Rice M., Salmi R., Sasahara K., Sayigh L., Shiu Y., Taylor C., Vallejo E. E., Waller S., Zamora-Gutierrez V. Acoustic sequences in non-human animals: A tutorial review and prospectus. *Biological Reviews of Cambridge Philosophical Society*, 2016, vol. 91, iss. 1, pp. 13–52.
- Kroodsma D. E., Sanchez J., Stemple D. W., Goodwin E., Silva M. L. D., Vielliard J. M. E. Sedentary life style of Neotropical Sedge Wrens promotes song imitation. *Animal Behaviour*, 1999, vol. 7, iss. 4, pp. 855–863.
- Markowitz J. E., Ivie E., Kligler L., Gardner T. J. Long-range order in canary song. *PLoS Computational Biology*, 2013, vol. 9, article number e1003052.
- Newman M. E. J. Fast algorithm for detecting community structure in network. *Physical Review*, 2004, vol. 69, article number 066133.

Опаев А. Relationships between repertoire size and organization of song bouts in the Grey-crowned Warbler (*Seicercus tephrocephalus*). *Journal of Ornithology*, 2016, vol. 157, iss. 4, pp. 949–960.

Опаев А. С., Kolesnikova Y. A. Song theme sharing in the Grey-crowned Warbler *Phylloscopus tephrocephalus*. *Bioacoustics*, 2022, vol. 31, iss. 2, pp. 191–207.

Okanoya K. Finite-state song syntax in Bengalese finches: Sensorimotor evidence, developmental processes, and formal procedures for syntax extraction. In: J. Bolhuis, M. Everaert, eds. *Birdsong, Speech, and Language. Exploring the Evolution of Mind and Brain*. London, MIT Press, 2013, pp. 229–242.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2020. Available at: <http://www.R-project.org> (accessed 17 December 2020).

Roach S. P., Johnson L., Phillimore L. S. Repertoire composition and singing behaviour in two eastern populations of the Hermit Thrush (*Catharus guttatus*). *Bioacoustics*, 2012, vol. 21, iss. 3, pp. 239–252.

Sasahara K., Cody M. L., Cohen D., Taylor C. E. Structural design principles of complex bird songs: A network-based approach. *PLoS ONE*, 2012, vol. 7, iss. 9, article number e44446.

Scharff C., Nottebohm F. A comparative study of the behavioral deficits following lesions of various parts of the zebra finch song system: Implications for vocal learning. *Journal of Neuroscience*, 1991, vol. 11, iss. 9, pp. 2896–2913.

Slater P. J. B. Bird song learning: Causes and consequences. *Ethology, Ecology and Evolution*, 1989, vol. 1, iss. 1, pp. 19–46. <https://doi.org/10.1080/08927014.1989.9525529>

Spedicato G. A. Discrete time Markov chains with R. *The R Journal*, 2017, vol. 9, iss. 2, pp. 84–104.

Węgrzyn E., Leniowski K. Syllable sharing and changes in syllable repertoire size and composition within and between years in the great reed warbler, *Acrocephalus arundinaceus*. *Journal of Ornithology*, 2010, vol. 151, iss. 2, pp. 255–267.

Weiss M., Hultsch H., Adam I., Scharff C., Kipper S. The use of network analysis to study complex animal communication systems: a study on nightingale song. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, vol. 281, article number 20140460.

Zsebők S., Herczeg G., Laczi M., Nagy G., Vaskuti E., Hargitai R., Hegyi G., Herényi M., Markó G., Rosivall B., Szász E., Szöllősi E., Török J., Garamszegi L. Z. Sequential organization of birdsong: relationships with individual quality and fitness. *Behavioral Ecology*, 2021, vol. 32, iss. 1, pp. 82–93.

Обзорная статья

УДК 574.24:632.958/574.21

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-148-178>

СОВРЕМЕННЫЕ РОДЕНТИЦИДЫ И НЕЦЕЛЕВЫЕ ВИДЫ

Е. В. Ерофеева¹, Ю. Е. Суркова², А. В. Шубкина^{1✉}

¹ Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33

² Московский педагогический государственный университет
Россия, 119991, г. Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, с. 1

Поступила в редакцию 27.02.2023 г., после доработки 28.03.2023 г., принята 28.03.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Общеизвестно, что загрязнение окружающей среды химическими веществами, используемыми в агротехнических мероприятиях, является крупнейшей проблемой сохранения биологического разнообразия и пищевой безопасности человека, хотя полностью исключить их применение невозможно. Особое значение принадлежит современным родентицидам – суперварфаринам, предназначенным для сокращения численности грызунов, наносящих ущерб сельскому хозяйству, т.е. уничтожения животных. Однако эти препараты высоко токсичны и передаются по пищевым цепям. Провести грань между агроценозами в их классическом понимании и естественной или мало измененной средой практически невозможно. Отсутствие явных, физических границ агроценозов означает, что процессы, происходящие в них, влияют на биологическое разнообразие сопредельных территорий, считающихся естественными. Животные используют как поля, так и пространства, прилегающие к ним. Помимо того, происходит водообмен между обрабатываемыми полями и прилегающими к ним естественными территориями и водоемами. Современные изменения структуры агроценозов (повышение доли полей, на которых проводят обработку родентицидами) и распахка приовражий (благодаря улучшению качества техники) облегчают попадание родентицидов в водоемы. Представлены данные о последствиях применения суперварфарина в некоторых антропогенных биоценозах южных регионов РФ. Приведены факты массовой гибели консументов 1 и 2 порядка (так называемые нецелевые виды), прямо связанные с их применением. Впервые в РФ выполнены комплексные патоморфологические и токсикологические исследования животных, погибших в природе. Подтверждено наличие бромадиолона в пробах тканей, сделан анализ описаний вскрытий погибших птиц. Подготовлены рекомендации по особенностям сбора и хранения материалов, направляемых для исследований.

Ключевые слова: родентициды, антикоагулянты, нецелевые виды, дикие животные, природные системы

Для цитирования. Ерофеева Е. В., Суркова Ю. Е., Шубкина А. В. Современные родентициды и нецелевые виды // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 148 – 178. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-148-178>

✉ Для корреспонденции. Лаборатория поведения и поведенческой экологии млекопитающих Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН.

ORCID и e-mail адреса: Ерофеева Екатерина Владимировна: <https://orcid.org/0009-0006-0062-2119>, canis92@mail.ru; Суркова Юлия Евгеньевна: u.sura@sura@yandex.ru; Шубкина Анна Владимировна: <https://orcid.org/0000-0002-6857-3812>, annashubkina@rambler.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Химические обработки лежат в основе современной агрокультуры. Они включают уничтожение нежелательной растительности, стимуляцию развития растений, сокращение численности животных, признаваемых нежелательными производителями сельхозпродукции. Вещества, применяемые для химической обработки, присутствуют не только в продукции агроценозов, но и в дикорастущей растительности, грунте и водоемах (Yadav et al., 2015). Ни одна часть человеческой популяции не защищена полностью от влияния агрохимических препаратов, воздействующих на общее состояние и развитие заболеваний (Aktar et al., 2009; Thomson, Darwish, 2019).

Особое значение принадлежит препаратам для уничтожения грызунов. Как описано нами ранее (Ерофеева и др., 2021), при их использовании в некоторых случаях происходят массовые отравления диких животных, обусловленные передачей токсикантов по пищевым цепям.

Родентициды – препараты для уничтожения грызунов, остальные животные, на которых они могут влиять, называются нецелевыми объектами. В список нецелевых объектов входят млекопитающие, птицы, рептилии и амфибии, рыбы и, конечно, человек. Отравления людей родентицидами происходят обычно случайно и не всегда бывают зарегистрированы; отравления диких и домашних животных часто сопровождаются их гибелью (Berny et al., 2010).

Наблюдения, лежащие в основе данной работы, сделаны преимущественно в Волгоградской области, одном из регионов Нижнего Поволжья. Поволжье включает несколько физико-географических зон: границу зоны широколиственных лесов — лесостепь на севере региона, обширные степные пространства с оврагами и лесополосами в центральной части, сухие степи и полупустыни на юге. Это один из крупнейших сельскохозяйственных регионов России, включающий более 48 млн га сельскохозяйственных угодий, составляющих более 70% территории. Агротехническая нагрузка здесь неодинакова: на юге преобладает мясное скотоводство, в центральной части и на севере – зерновые и масличные культуры. Типичный ландшафт – поля, ограниченные оврагами и лесополосами. Соотношение зон сельского хозяйства и «условно нетронутых» показывает, что воздействие веществ, применяемых при агротехнических мероприятиях, не ограничено пределами собственно агроценозов. Поэтому особенности агротехники стали доминирующим антропогенным воздействием.

В последние 20 лет произошло существенное (более чем на 10%) увеличение площадей зерновых и масличных за счет снижения доли кормовых культур (Российский рынок сельхозсырья..., 2021). Возросла доля площадей зерновых, зернобобовых и масличных (мы объединяем эту группу культур, так как при севообороте неизбежно их чередование), а доля иных полей снижается. Обработка полей кормовых культур, естественных и обновляемых сенокосов, залежей, пастбищ и пр.¹ родентицидами не проводится, в отличие от зерновых и масличных, поэтому

¹ Типы полей приведены по «Неугодья земель сельскохозяйственного назначения» (<https://freespravochnik.net/info/neugodja-zemel-selskohozjajstvennogo-naznachenija/>).

такие изменения ведут к повышению доли угодий, в которые вносят родентициды. Исследования в Краснодарском крае показывают, что в 1999 – 2007 гг. площади родентицидных обработок более чем удвоились (Яковлев и др., 2007), пропорционально снижению доли полей с кормовыми культурами. По Волгоградской и Саратовской областям таких данных нет, но, по личным наблюдениям, существует такая же тенденция.

По данным ИКАР (Института конъюнктуры аграрного рынка), к 2020 г. доли обрабатываемых полей в южных регионах возросли почти четырехкратно по сравнению с 2000 г. (http://www.agrospeaker.ru/var/fck/image/RUS_GO-2019-01-2.jpg). Это позволяет полагать, что к настоящему времени интенсивной обработке агрохимикатами и родентицидами подвергается большая часть зон интенсивного земледелия. Таким образом, количество вносимых препаратов разного состава существенно возросло.

Следует учитывать, что количество вносимых препаратов не только возросло – изменилась структура водосборных зон. Зона водосбора – водосборный бассейн и надпойменные террасы – включает распахиваемые поля, традиционно называемые агроценозами, и прилегающие к ним территории (участки леса, лесополосы, приовражья). Благодаря повышению качества техники происходит распашка склонов оврагов, снижающая площадь участков, отделявших ранее обрабатываемые поля от зон водостока. Исторически прилегающие территории отделяли зоны водосбора от зон водостока, выполняя функцию естественных фильтров как для плодородного грунта, так и вносимых химикатов. Они выполняли буферную функцию, задерживая смывы с полей, т.е. производя частичную фильтрацию и пролонгируя период от внесения токсикантов до их попадания в водоемы. Изменение структуры посевов и зон распашки приводит к тому, что в припойменной зоне возрастает загрязнение продуктами агрохимии, попадающими в водоемы.

Существуют две формы воздействия родентицидов: прямое отравление и передача по пищевым цепям. Прямое отравление направлено на грызунов, но обработки нередко проводятся с грубыми нарушениями регламента пользования, которые, иногда, удается выявить. Как биологов, нас больше всего интересует возможность передачи токсикантов по пищевым цепям, т.е. их воздействие при переходах между трофическими уровнями. Такой эффект находится вне поля зрения Минсельхоз и Минприроды РФ и, тем более, не может контролироваться сельхозпроизводителями. Однако его значение для поддержания биоразнообразия, полевых зоологических и экологических исследований, охотничьего хозяйства и безопасности населения переоценить невозможно.

В массовом сознании преобладает ошибочное убеждение о безвредности современных родентицидов. Цель этой статьи – привлечь внимание биологов к реальным последствиям их применения для диких животных и человека.

Проблема применения

Регламенты использования родентицидов вне населенных пунктов весьма размыты (Иваницкая и др., 2011), а неоднозначные эффекты накопления и передачи изучены недостаточно (Morgan, 2006; Berny et al., 2010).

Принято подразделять родентициды на две группы: короткоживущие и длительного действия, преимущественно антикоагулянты, называемые в англоязычной литературе LAAR (longacting anticoagulant rodenticides) (Рыльников и др., 2011; Caravati et al., 2007). Особенностью антикоагулянтов длительного действия является способность к накоплению в организме – кумуляции (Галлямова, 2013; Войцеховский и др., 2020). Даже если оно не приводит к летальному исходу, происходит снижение сопротивляемости к иным повреждающим факторам.

Родентициды-антикоагулянты вошли в обиход в середине прошлого века, а в наши дни стали общеприняты. Они включают антикоагулянты первого поколения (кумариновый ряд: наиболее известен зоокумарин; индандионовый ряд: этилфенацин, дифацинон, трифенацин, хлорфцинон, тетрафенацин и др.), называемые часто варфаринами.

С конца XX в. все шире применяют антикоагулянты второго поколения, называемыми суперварфаринами (дифенакум, бромадиолон, флокумафен, бродифакум, дифетиалон). Определение их присутствия методически сложно и требует специальной аппаратуры² и квалифицированного персонала. При хранении в тепле и на воздухе они распадаются. Период полуразложения (ДТ) бромадиолона при температуре +20°C составляет в среднем 14 суток. В зависимости от условий ДТ₅₀ (период распада 50%) колеблется от 3 до 269 дней, ДТ₉₀ от 14 до 658 дней (Бромадиолон, 2021).

Инструкции по применению противоречивы: отмечена кумуляция и возможность отравления через кожу и дыхательные пути, но основой принято считать пищевое отравление – для которого и рассчитывается летальная доза (например, Березовский, 1998). Признана особая опасность суперварфарина для домашних кроликов и птиц, поэтому приманки рекомендуют размещать в емкостях, что также должно снижать загрязнение почвы и смыв в водоемы (Иваницкая и др., 2011). В последние годы нередки сообщения о случаях массовой гибели рыбы в прудах и крупных реках, но тесты на присутствие антикоагулянтов никогда не проводили. Однако есть данные, свидетельствующие о загрязнении родентицидами не только рек и озер, но и морских экосистем (Masuda et al., 2015).

Согласно принятым в РФ правилам обращения ядохимикатов и пестицидов государство регулирует их оборот и применение, используя названия производителей. Единый, ежегодно обновляемый реестр (Государственный каталог, 2020, 2021) включает коммерческие названия, но не действующие вещества, их концентрации, уровни очистки; поэтому оценка соответствия концентраций и состава заявленному не проводится. Способы применения на местах различны, далеко не всегда соответствуют инструкциям, часто проходят с грубыми нарушениями регламента. Торговое название выбирает фирма-производитель, поэтому не исключено неумышленное превышение вносимой дозы токсикантов за счет использования разных препаратов разных фирм и разного состава. Некоторые препараты исключают из применения и возвращают вновь. Например, фосфид цинка (как и его

² Определение присутствия суперварфарина основано на измерении массовой доли методом обращенно-фазной жидкостной хроматографии с УФ-детектированием, с количественной оценкой методом внешнего стандарта (Андреев и др., 2019).

аналоги, фосфид магния и фосфид алюминия) несколько лет был запрещен по некоторым данным³ (Яковлев, Бабич, 2011). В настоящее время вещество входит в Каталог разрешенных препаратов РФ с различными коммерческими названиями. Последние десятилетия в России никак не отслеживается производство, реализация, хранение и применение агрохимикатов при обработке полей.

Комплекс сведений о возможностях и результатах применения современных родентицидов позволяет утверждать, что в свободной продаже находятся отравляющие вещества, вероятность диагностики которых крайне ограничена.

Наблюдения за применением родентицидов в некоторых природных системах РФ

Отравления нецелевых видов возможны во всех регионах, но опыт показывает, что наибольшую угрозу их применение представляет в лесостепных и степных зонах, превосходящих прочие по агроклиматическим ресурсам.

Ранее (Ерофеева и др., 2021; Erofeeva et al., 2022) мы подробно описали результаты применения родентицидов в Новониколаевском районе Волгоградской области в 2019 г. Совместные действия местного населения (сообщения о гибели животных в полях), дирекции унитарного предприятия «Новониколаевский охотник», администрации района и охотинспекции позволили собрать образцы (тушки мертвых зайцев-русаков) и передать их в районную Станцию по борьбе с болезнями животных (СББЖ). Вскрытие показало наличие черно-красного экссудата в грудной полости, при нормальной упитанности павших животных и отсутствии как внешних повреждений, так и повреждений желудочно-кишечного тракта. Инфекционные заболевания домашних кроликов, спектр которых пересекается с таковым у зайцев, летом и осенью 2019 г. в Новониколаевском районе не зарегистрированы, что подтверждало предположение о токсической природе причин падежа. Трупы зайцев находили в разных местах, но в полях, граничащих с зонами их обнаружения, численность животных этого вида не сократилась и примерно соответствовала наблюдавшемуся ранее, что также свидетельствует об отсутствии инфекционного заболевания.

Было установлено, что дератизацию проводили путем разбрасывания обработанного препаратом зерна с помощью самодельных устройств в конце сентября – начале октября. Название препарата и график обработок не был предоставлен агрофирмой, на полях которой был отмечен падеж, со ссылкой на коммерческую тайну. Использовали самодельные механические приспособления для рассыпания в поле зерна красноватого цвета, протравленного водным раствором, что нарушает регламент применения данной группы препаратов. Под давлением администрации района агрофирма прекратила использование самодельных механических устройств для разбрасывания зерна в 2019 г. и не применяла их в 2020 – 2022 гг.

³ Фосфид цинка, (Zn_3P_2) – по некоторым данным, был официально запрещен в нашей стране, но активно используется в производстве других пестицидов (<https://fb.ru/article/277941/fosfid-tsinka-opisanie-deystvie-simptomyi-otravleniya-mojno-li-primenyat-fosfid-tsinka>; <https://geradez.ru/5-insekticidov-zapreshhennyx-v-evrope>).

СОВРЕМЕННЫЕ РОДЕНТИЦИДЫ И НЕЦЕЛЕВЫЕ ВИДЫ

Обследование полей с собаками через 40 – 60 дней после обработки позволило найти более двадцати мацерированных тушек зайцев и 1 барсука. Подсчет числа следов на обработанных полях воспроизводственного участка зайца-русака, проведенный в декабре по пороше, показал, что на значительной части участка признаки активности зайца отсутствовали.

В январе 2020 г. в нескольких районах Краснодарского края специалисты Министерства природных ресурсов Краснодарского края установили массовые (собрано более 3000 тушек на маршруте 7 км) падежи птиц и зайцев-русов на отдельных участках. Это было и остается единственным полным сбором отравленных животных до настоящего времени. Часть собранных тушек отправили на исследование в Кропоткинскую краевую ветеринарную лабораторию, исключившую инфекционные заболевания представленных птиц.

Из собранных животных зерноядными (консументами 1-го порядка) являются голуби и зайцы, сорока и сойка – всеядные, а еще 6 видов птиц (№ 6 – 11) – хищные (табл. 1). Отравление консументов 1-го порядка могло происходить при поедании животными отравленного зерна либо при контакте с ним. Однако хищные птицы – консументы 2-го порядка – могли получить токсиканты только при поедании зерноядных птиц и мышевидных грызунов – консументов 1-го порядка, либо при вдыхании препарата, рассыпанного по растениям и по земле.

Таблица 1. Возможность перорального отравления птиц и млекопитающих, собранных в Краснодарском крае 24 – 25 января 2020 г.

Table 1. Possibility of oral poisoning of birds and mammals collected in the Krasnodar region, 24–25 January, 2020

№ п/п / No.	Вид / Species	Кол-во / Amount	Порядок консумента / Level of the consumer	Возможность отравления при поедании зерна / Poisoning possibility when eating grain
1	Вяхрь <i>Columba palumbus</i>	2998	1	Высокая / High
2	Клинтух <i>Columba oenas</i>	35	1	Высокая / High
3	Заяц-русак <i>Lepus europaeus</i>	5	1	Высокая / High
4	Сорока <i>Pica pica</i>	5	1 – 2	Низкая / Low
5	Сойка <i>Garrulus glandarius</i>	3	1 – 2	Низкая / Low
6	Канюк <i>Buteo buteo</i>	11	2	Отсутствует / Absent
7	Зимняк <i>Buteo lagopus</i>	4	2	Отсутствует / Absent
8	Курганник <i>Buteo rufinus</i>	2	2	Отсутствует / Absent
9	Обыкновенная пустельга <i>Falco tinnunculus</i>	2	2	Отсутствует / Absent
10	Болотная сова <i>Asio flammeus</i>	3	2	Отсутствует / Absent
11	Ушастая сова <i>Asio otus</i>	2	2	Отсутствует / Absent

Примечание. Данные по сбору тушек в местах массовой гибели представлены Мин-природы (МНПР) и полицией Краснодарского края.

Note. Data on the collection of carcasses in the places of mass death were presented by the Ministry of Natural Resources and the police of the Krasnodar region.

Как и в Волгоградской области, агрофирмы рассыпали протравленное зерно с помощью самодельных устройств (сообщение сотрудников МПР). Отличие в том, что с самого начала заявление о массовом падеже поступило в МЧС. Специалисты МПР обратились в полицию, возбуждено уголовное дело. Для патологоанатомического вскрытия и исследования на токсиканты в местах массового падежа собраны тушки животных 11 видов, преимущественно птиц (см. табл. 1). Повторных обследований местности не проводили, т.е. факты отсроченной гибели не оценивали.

Результаты патологоанатомических и токсикологических исследований

Для патологоанатомического обследования была собрана комиссия ветеринарных врачей и биологов в соответствии с приказом по Институту проблем экологии и эволюции Российской академии наук (ИПЭЭ РАН). Тушки всех птиц, представленных для вскрытия, принадлежали животным хорошей упитанности, без признаков истощения и дегидратации. В табл. 2 представлены визуально различимые отклонения состояния и подтверждающий их патологоанатомический диагноз, выполненный с использованием гистологических исследований.

Таблица 2. Краткая сводка результатов патологоанатомического исследования

Table 2. A brief summary of the results of our pathoanatomical research

Визуальные нарушения / Visual deviations	Патанатомический диагноз / Pathanatomical diagnosis	Зона поражения / Damage zone
1	2	3
1. Вяхирь, ♂, 291 г / <i>Columba palumbus</i> , ♂, 291 g		
Слизистая ротовой полости красного цвета, киль грудины бордового цвета, легкие кровенаполнены, равномерно бордового цвета / The mucous membrane of the oral cavity is red, the carina of the sternum is burgundy, the lungs are blood-filled, uniformly burgundy	Массированные кровоизлияния в легких, киле грудины. Системное расстройство гемодинамики по типу неравномерного кровенаполнения внутренних органов с явлениями стазов и тромбообразования, нарушением проницаемости сосудистых стенок и наличием диapedических кровоизлияний, очаговых некробиотических изменений в паренхиматозных органах. Очаговая эмфизема, очаговый геморрагический отек легкого. Очаговый некронефроз. Отек, геморрагии мягких мозговых оболочек, отек вещества головного мозга. Морфологические признаки постгипоксической энцефалопатии / Massive hemorrhages in the lungs, hernia of the sternum. Systemic disorder of hemodynamics by the type of uneven blood filling of internal organs with the phenomena of stasis and thrombosis, violation of the permeability of vascular walls and the presence of diapedic hemorrhages, focal necrobiotic changes in parenchymal organs. Focal emphysema, focal hemorrhagic pulmonary edema. Focal necronephrosis. Edema, hemorrhages of soft meninges, swelling of the brain substance. Morphological signs of posthypoxic encephalopathy	Система кровообращения и гемостаза; дыхательная система; головной мозг; костные ткани / Circulatory system and hemostasis; respiratory system; brain; bone tissue
2. Вяхирь, ♀, 418 г / <i>Columba palumbus</i> , ♀, 418 g		
В ротовой полости кровь, киль грудины бордового цвета. Кости черепа с кровоизлияниями округлой формы. Мышечная стенка справа снизу локально пропитана кровью. В просвете трахеи сгусток крови. С вентральной поверхности легкие темно-вишневые	Множественные кровоизлияния в легких, трахее, ротовой полости, тонком кишечнике, киле грудины, костной ткани черепа / Multiple hemorrhages in the lungs, trachea, oral cavity, small intestine, sternal hernia, bone tissue of the skull	Система кровообращения и гемостаза; дыхательная система; пищеварительная система; костные ткани / Circulatory system and hemostasis; respiratory system; digestive system; bone tissue

Продолжение табл. 2
Table 2. Continuation

1	2	3
вого цвета. В ротовой полости – кровь. В просвете тонкого кишечника жидкое содержимое бордового цвета. / There is blood in the oral cavity, burgundy sternum carina. Bones of the skull with hemorrhages of a rounded shape. The muscular wall on the lower right is locally soaked with blood. A blood clot in the lumen of the trachea. From the ventral surface, the lungs are dark cherry in color. There is blood in the oral cavity. In the lumen of the small intestine, the liquid content is burgundy		
3. Вяхирь, самец, 304 г / <i>Columba palumbus</i> , ♂, 304 g		
На шее с дорсальной стороны кровоизлияние на коже. На центральной части и полностью с правой стороны гематома бордового цвета. Киль грудины бордового цвета. В полости тела небольшое количество замороженной кровянистой жидкости. Легкие темно-вишневого цвета, краевая часть – розового цвета. Гематома в левом воздухоносном мешке, на шее частично затронула зоб / Hemorrhage on the skin on the dorsal side of the neck. Hematoma of burgundy color in the central part and completely on the right side. The keel of the sternum is burgundy. There is a small amount of frozen bloody fluid in the body cavity. The lungs are dark cherry in color, the marginal part is pink in color. Hematoma in the left air sac, the neck was partially affected by the goiter	Множественные кровоизлияния: кожа дорсальной стороны шеи, грудные мышцы, киль грудины, легкие, воздухоносный мешок, частично зоб; жидкость в полости тела. Системное расстройство гемодинамики по типу неравномерного кровенаполнения внутренних органов с явлениями стазов и тромбообразования, нарушением проницаемости сосудистых стенок и наличием диапедзных кровоизлияний, очаговых некробиотических изменений в паренхиматозных органах. Очаговая эмфизема, очаговый геморрагический отек легкого. Очаговый некронефроз. Отек, геморрагии мягких мозговых оболочек, отек вещества головного мозга. Морфологические признаки постгипоксической энцефалопатии. Кровоизлияния в легких, киле грудины / Multiple hemorrhages: Skin of the dorsal side of the neck, pectoral muscles, sternal carina, lungs, air sac, partial goiter; liquid in the body cavity. Systemic disorder of hemodynamics by the type of uneven blood filling of internal organs with the phenomena of stasis and thrombosis, violation of the permeability of vascular walls and the presence of diapedic hemorrhages, focal necrobiotic changes in parenchymal organs. Focal emphysema, focal hemorrhagic pulmonary edema. Focal necronephrosis. Edema, hemorrhages of soft meninges, swelling of the brain substance. Morphological signs of posthypoxic encephalopathy. Hemorrhages in the lungs, hernia of the sternum	Система кровообращения и гемостаза; дыхательная система; головной мозг / Circulatory system and hemostasis; respiratory system; brain
4. Сойка, пол не определен, 218 г / <i>Garrulus glandarius</i> , gender not specified, 218 g		
Киль грудины бордового цвета. С дорсальной стороны легкие розового цвета, краевые участки – темно-вишневого цвета / The keel of the sternum is burgundy. The dorsal side is light pink, the marginal areas are dark cherry	Кровоизлияния в легких, киле грудины / Hemorrhages in the lungs, hernia of the sternum	Система кровообращения и гемостаза; дыхательная система; костные ткани / Circulatory system and hemostasis; respiratory system; bone tissue
5. Обыкновенная пустельга, самка, 232 г / <i>Falco tinnunculus</i> , ♀, 232 g		
Киль грудины бордового цвета. Легкие с ventральной стороны – с участками темно-вишневого цвета / The keel of the sternum is burgundy. Lungs from the ventral side – with areas of dark cherry color	Кровоизлияния в легких, киле грудины / Hemorrhages in the lungs, hernia of the sternum	Система кровообращения и гемостаза; дыхательная система; костные ткани / Circulatory system and hemostasis; respiratory system; bone tissue

Продолжение табл. 2
Table 2. Continuation

1	2	3
6. Канюк, самка, 874 г / <i>Buteo buteo</i> , ♀, 874 g		
В ротовой полости кровь. Киль грудины бордового цвета. В полости тела – жидкость, сгустки и лед темно-вишневого цвета. Стенка воздухоносных мешков красная. Трахея пропитана кровью, просвет свободен. В хоанах жидкая кровь. Легкие вишневого цвета, левые доли окрашены более интенсивно. Практически лишены участков воздухоносной ткани. В ротовой полости жидкая кровь / There is blood in the mouth. The keel of the sternum is burgundy. In the body cavity – liquid, clots and dark cherry-colored ice. The wall of the air bags is red. The trachea is saturated with blood, the lumen is free. There is liquid blood in the choanae. The lungs are cherry-colored, the left lobes are more intensely colored. They are practically devoid of areas of vesic-breathing tissue. Liquid blood in the oral cavity	Множественные кровоизлияния в ротовой полости, трахеях, киле грудины, легких, воздушных мешках, сосудах костей черепа, в полости тела. Токсический шок в виде системного расстройства гемодинамики по типу неравномерного кровенаполнения внутренних органов с явлениями микротромбообразования и сладжа эритроцитов, нарушения проницаемости сосудистых стенок с крупно- и мелкоочаговыми кровоизлияниями во внутренних органах, дистрофии и некробиотических изменений паренхиматозных органов / Multiple hemorrhages in the oral cavity, trachea, sternal hernia, lungs, air sacs, vessels of the bones of the skull, in the body cavity. Toxic shock in the form of a systemic disorder of hemodynamics in the form of uneven blood filling of internal organs with microthromboformation and erythrocyte sludge, vascular wall permeability disorders with large- and small-focal hemorrhages in internal organs, dystrophy and necrobiotic changes in parenchymal organs	Система кровообращения и гемостаза; дыхательная система; костные ткани / Circulatory system and hemostasis; respiratory system; bone tissue
7. Зимняк, самец, 977 г / <i>Buteo lagopus</i> , ♂, 977 g		
На брюшной стенке локальное кровоизлияние вишневого цвета. На киле очаговые кровоизлияния бордового цвета. В полости тела содержится жидкая кровь, сгустки и лед темно-вишневого цвета. Под жиром в полости тела обнаружен крупный сгусток крови вишневого цвета, заполняющий всю полость тела в каудальной части. Стенка воздухоносных мешков прозрачная, часть, прилегающая к ЖКТ, пропитана кровью). Желудок пуст, на разрезе серозный и мышечный слои пропитаны кровью. Кутикула не снимается. Слизистая тонкого кишечника гиперемирована. Участки печени, прилегающие к желудку, пропитаны кровью / Local cherry-colored hemorrhage on the abdominal wall. On the hernia, focal hemorrhages of burgundy color. The body cavity contains liquid blood, clots and dark cherry-colored ice. Under the fat in the body cavity, a large cherry-colored blood clot was found, filling the entire body cavity in the caudal part. The wall of the air sacs is transparent, the part adjacent to the gastrointestinal tract	Системное расстройство гемодинамики по типу неравномерного кровенаполнения внутренних органов с явлениями стазов и тромбообразования, нарушением проницаемости сосудистых стенок и наличием диapedических кровоизлияний и развитием дистрофических изменений в паренхиматозных органах. Кровоизлияния инфильтрирующего характера в сердце, слизистой и серозной оболочках желудка, жировой клетчатке средостения / Systemic disorder of hemodynamics by the type of uneven blood filling of internal organs with the phenomena of stasis and thrombosis, violation of the permeability of vascular walls and the presence of diapedic hemorrhages and the development of dystrophic changes in parenchymal organs. Hemorrhages of an infiltrative nature in the heart, mucous and serous membranes of the stomach, fatty tissue of the mediastinum	Система кровообращения и гемостаза; дыхательная система; пищеварительная система; костные ткани / Circulatory system and hemostasis; respiratory system; digestive system; bone tissue

Окончание табл. 2
Table 2. Continuation

1	2	3
is soaked with blood). The stomach is empty, on cross-section the serous and muscular layers are soaked with blood. The cuticle is not removed. The mucous membrane of the small intestine is hyperemic. The areas of the liver adjacent to the stomach are soaked with blood		
8. Курганник, самец, данные по весу утраты / <i>Buteo rufinus</i> , ♂, weight data is lost		
Желудок. Очагово-диффузный некроз, кровоизлияние слизистой, отёк всех слоев желудка, инфильтрирующее кровоизлияние в мышечном и серозном слоях. Легкое полнокровие сосудов различных калибров, ... сепарация крови. Мелкоочаговые множественные кровоизлияния... Массы жидкости в просветах отдельных бронхов / Stomach Focal-diffuse necrosis, mucosal hemorrhage, edema of all layers of the stomach, infiltrating hemorrhage in the muscular and serous layers. Light full-blooded vessels of various calibers, ... separation of blood. Small focal multiple hemorrhages... Liquid masses in the lumens of individual bronchi	Токсический шок – некроз слизистой оболочки желудка, кровоизлияния в слизистый, мышечный и серозный слой желудка, кровоизлияния по ходу мочеточника, малокровие миокарда, очаги некротического нефроза в почках, моноцеллюлярные некрозы паренхимы печени / Toxic shock – necrosis of the mucous membrane of the stomach, hemorrhages in the mucous, muscular, and serous layers of the stomach, hemorrhages along the course of the ureter, anemic myocardium, foci of necrotic nephrosis in the kidneys, monocellular necrosis of the liver parenchyma	Система кровообращения и гемостаза; пищеварительная система; дыхательная система / Circulatory system and hemostasis; digestive system; respiratory system

Представленные в табл. 2 данные свидетельствуют, что установлены изменения: 8/8 – системы кровообращения и гемостаза; 8/8 – дыхательной системы; 7/8 – костных тканей; 3/8 – пищеварительной системы; 2/8 – головного мозга.

Соотношение (см. табл. 2) частот поражения разных систем органов позволяет утверждать, что признаки реакции на токсикант присутствуют не только в кровеносной, но и в дыхательной системе: у всех 8 животных отмечены отклонения ее состояния, на фоне нарушений системы кровообращения и гемостаза и, у 7 особей, кровоизлияний в костные ткани. Поражения органов желудочно-кишечного тракта отмечены только у 3 особей (как зерноядных, так и хищных), т.е. в большинстве случаев яд не достигал желудка и кишечника до наступления смерти. Совокупность данных позволяет полагать, что для гибели птиц необходимо и достаточно поступление препарата в носовую и ротовую полости, а попадание в желудок и кишечник не обязательно. Таким образом, у птиц основным путем воздействия токсиканта является дыхательная система, но не пищеварительная. Число вскрытых зайцев недостаточно велико, но, напомним, что у 4 особей, исследованных в СББЖ Новониколаевского района, отмечено наличие черно-красного экссудата в грудной полости при отсутствии геморрагий желудка и кишечника, т.е. также через дыхательную систему (ротовая и носовая полость с поступлением в кровеносную систему). Разумеется, нельзя исключить попадание некоторых количеств яда при прикосновении языком с последующей абсорбцией и попаданием в кровенос-

ную систему. Но такой путь отравления не объясняет присутствие нарушений именно в дыхательной системе у всех животных.

Механизмом появления такого эффекта является общий для диких животных стереотип кормового поведения: как звери, так и птицы едят не все подряд (не как однородную пищу из кормушки), а прикасаются, перебирают, выбирая подходящее. Разумеется, при этом они многократно вдыхают препараты, попавшие на зерно и/или траву и/или тушки мышевидных. Из анализа результатов вскрытия следует, что расчет LD_{50} для диких животных нужно производить исходя из преобладания поступления токсиканта через дыхательную систему, а не пищеварительную.

Мы убеждены, что важнейшим фактом, который удалось установить благодаря многочисленным вскрытиям погибших животных, является недостаточная изученность путей поступления токсиканта. Результаты патанатомических вскрытий доказывают возможность отравления диких животных и собак (см. ниже) именно при вдыхании и слизывании токсиканта – при этом дозы, получаемые животными, намного ниже тех, которые могут поступить при поедании приманки.

Наличие бромациолона подтверждено химическим анализом в Лаборатории химических исследований дезинфекционных средств ФБУН НИИ Дезинфектологии Роспотребнадзора (табл. 3). Его присутствие установлено в тканях внутренних органов погибших птиц (курганник, ушастая сова, канюк, клинтух, полёвка из зоба совы). Средние значения (0.005 – 0.05 мг/г, что соответствует 0.005 – 0.05 мг/кг) у птиц очень малы и вдвое ниже наблюдавшегося у полёвки из той же выборки (0.09 мг/г, соответствует 0.09 мг/кг). Учитывая, что до химического анализа трупы более 6 месяцев хранили в замороженном состоянии (карантин 2020 г.), нельзя исключить частичный распад токсиканта. В то же время исследования кабанов, поедавших отравленные приманки (Morriss et al., 2005), показало, что концентрации токсикантов в тканях печени варьировали от 0.005 до 0.46 мг/кг. Однако при специальном отравлении кабанов варфариноподобными соединениями (вещество не указано) в составе твердых приманок их содержание в тканях (не указано каких) погибших животных было существенно выше и варьировало от 0.93 до 8.06 мг/кг (Poché et al., 2018).

Немногочисленные данные о количестве антикоагулянтов в тканях погибших животных соответствуют полученным нами или превосходят их. Разумеется, распределение токсикантов в тканях разных органов не может быть одинаково даже у представителей одного вида и, тем более, должно зависеть от типа приманок (твердые или порошкообразные) и вида токсиканта.

При исследовании варфариноподобных соединений в крови человека (Захарова и др., 2019) предел обнаружения составлял 0.2 мг/л при диапазоне концентраций 0.5 – 2.0 мг/л. В целом тот факт, что полученные для птиц значения оказываются ниже, чем для человека, можно объяснить более высокой чувствительностью некоторых представителей авифауны к наличию токсикантов. Так, например, исследования отравлений хищных птиц (американская или воробьиная пустельга, *Falco sparverius*) позволяет говорить об их большей чувствительности к дифацинону, чем у краковых уток (*Anas platyrhynchos*) (Rattner et al., 2011).

СОВРЕМЕННЫЕ РОДЕНТИЦИДЫ И НЕЦЕЛЕВЫЕ ВИДЫ

Таблица 3. Концентрация бромадиолона в тканях, отобранных для химического исследования при вскрытии

Table 3. Bromadiolone concentration in tissues selected for chemical analysis at autopsy

№ / No.	Вид / Species	Концентрация / Concentration			Место в пищевых цепях / Place in food chains
		Измерения C, mg/l / Measured C, mg/L	Среднее C ср, mg/l / Mean C, mg/L	X, мкг/г / X, µg/g	
1	Курганник <i>Buteo rufinus</i>	0.04758	0.05120	0.015	
		0.04859			
		0.05208			
		0.04859			
		0.05916			
2	Канюк <i>Buteo buteo</i>	0.02286	0.02006	0.012	Консументы 2-го порядка нецелевые виды / Consumers 2nd order non-target species
		0.01339			
		0.01750			
		0.02315			
		0.02338			
3	Ушастая сова <i>Asio otus</i>	0.08001	0.07644	0.047	
		0.06968			
		0.07814			
		0.08005			
		0.07431			
4	Полёвка из желудка совы / Vole from the stomach of an owl	0.10430	0.08470	0.093	Консумент 1-го порядка целевой вид / Consumer of the 1st order target species
		0.10621			
		0.10100			
		0.00072			
		0.09311			
5	Клинтух <i>Columba oenas</i>	0.10286	0.01043	0.005	Консумент 1-го порядка нецелевой вид / Consumer of the 1st order non-target species
		0.01071			
		0.01052			
		0.01086			
		0.01396			
		0.00923			
		0.00727			

Таким образом, (1) факт отравления бромадиолоном был подтвержден на птицах двух трофических уровней, (2) полученные данные позволяют предполагать, что летальные дозы для птиц существенно ниже описанных для грызунов, что, согласно приведенному выше анализу протоколов вскрытий, может быть связано с поступлением препарата через дыхательную систему.

Еще в 2006 – 2011 гг. на территории Ботанического сада Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова ИПЭЭ РАН зафиксировал факты нерегламентного применения родентицидов (Ерофеева и др., 2021). В протоколах вскрытий 8 погибших собак из коллекции Института не упомянуты кровоизлияния в пищевод, желудке, кишечнике, но описаны геморрагии в легких, крованистая жидкость в легочной полости, обширные сосудистые изменения, иногда отек мозга. Это позволяет утверждать, что, как и у части птиц и зайцев, поступление токсиканта происходило либо прямо в систему кровообращения (всасывание через слизистую ротовой и носовой полостей), либо в дыхательные пути. Ответ-

ственность⁴ за не соответствующее правилам применение препаратов на основе бромадиолона приняла на себя государственная дератизационная станция. Однако запрета на обращение ядов не было, разъяснительную работу с сотрудниками не вели, и еще три года происходило нерегламентное применение ядов (сыпали их на грунт) для сокращения поголовья мышевидных грызунов. После гибели еще 4 собак удалось добиться прекращения применения ядов, благодаря ссылке на действовавший тогда Сан-Пин (СП 3.5.3.1129-02)⁵ – подозрение на отравление почвы рассматривалось как чрезвычайная ситуация. В современном Сан-Пин (СП 1.2.2584-10) (Гигиенические требования..., 2010) такие определения и нормы действий отсутствуют.

Таким образом, результаты патологоанатомических исследований требуют особого внимания к изучению путей поступления антикоагулянтов в организмы животных и, что не исключено, ревизии современных представлений об оценке летальных доз.

Обсуждение – история и современность применения родентицидов

До начала широкого применения антикоагулянтов наиболее распространенным родентицидом был фосфид цинка (магния, алюминия) – при смачивании выделяется фосфин, опасный для всех животных, включая насекомых. Фосфиды ведут к быстрой гибели животных, но они обладают резким вкусом и запахом, что делает возможным адаптацию к их применению: грызуны, получившие малые дозы, могут выжить и начинают избегать приманки. Помимо того, работа с ними требует профессионализма и строгого соблюдения правил техники безопасности при хранении и использовании (они легко активируются при увлажнении и портятся), в отличие от антикоагулянтов, поэтому в настоящее время применяются реже.

Детальный анализ результатов применения разных видов родентицидов сделан почти два десятилетия назад Эриксоном и Урбаном (Erickson, Urban, 2004). В работе «Потенциальный риск 9 родентицидов для птиц и нецелевых млекопитающих», выполненной по заказу Агентства охраны природы США, проведен анализ первичного (прямое поедание) и вторичного (поедание добычи или падали) рисков применения токсикантов. Изучали антикоагулянты разных поколений и иные препараты. Использовали птиц (более 80 видов) и млекопитающих (более 50 видов). Проведено сравнение смертности в зависимости от способа потребления, дозы, концентрации в приманках. Как и следовало ожидать, максимальный первичный риск и у птиц, и у млекопитающих наблюдался для фосфида цинка. А вот с позиций вторичного риска фосфид цинка оказался менее опасен (быстрый распад), в отличие от бродифакума и дифетиалона (Erickson, Urban, 2004). Сравнение пер-

⁴ В 2008 г. для государственной дератизационной станции было достаточно описаний вскрытий животных, погибших в зоне применения токсиканта.

⁵ В случаях возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с отравлением (подозрением на отравление) людей, загрязнением помещений, атмосферного воздуха, почвы, немедленно извещается орган, уполномоченный осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор.

вичного и вторичного риска оказалось весьма интересным и требует особого подхода при анализе биологического эффекта родентицидов.

Токсиканты различаются по выраженности первичных и вторичных рисков. Эти различия необходимо учитывать при планировании и проведении обработок от грызунов. Представляется весьма вероятным, что для сохранения естественных экосистем более важным является не прямая токсичность препаратов, а скорость их распада, т.е. снижение рисков вторичных отравлений. Нельзя забывать, что еще двадцать лет назад были работы, доказывавшие преимущество фосфидов по сравнению с суперварфаринами (Staples et al., 2003). Таким образом, первичный риск, особенно для млекопитающих, достаточно высок во всей линейке перечисленных веществ. Но риски вторичного отравления несопоставимо выше при применении антикоагулянтов 2-го поколения.

На территории США и Европейского Союза введены ограничения по применению родентицидов, чтобы снизить риск для нецелевых видов (Risk Mitigation Decision for Ten Rodenticides, 2008). Обсуждается полный запрет на применение антикоагулянтов второго поколения в Великобритании (Wade, 2021).

В 2011 г. в РФ были разрешены 18 препаратов – антикоагулянтов 2-го поколения на основе производных оксикумарина (бродифакума, бромадиолона и флумафена), производных и изомеров фенацина (Яковлев, Бабич, 2011). Антикоагулянты 1-го поколения также находятся в свободной продаже. В настоящее время список разрешенных дополнен препаратами на основе фосфидов цинка, алюминия и магния, относящимися к препаратам быстрого действия.

Напомним, что подтверждение наличия антикоагулянтов 2-го поколения требует специального оборудования, отсутствующего в большинстве клиник и токсикологических лабораторий РФ. Химико-аналитические исследования в нашей стране до настоящего времени посвящены оценке соотношения различных суперварфаринов в приманках (Андреев и др., 2019). Отечественных работ по изучению содержания этих препаратов у человека и животных в WoS (Web of Science) не найдено, хотя Г. М. Галстян с соавторами (2020) упоминают о токсикологическом исследовании больных при массовом отравлении. Присутствие суперварфаринов в пробах крови человека обсуждается Г. В. Захаровой с соавторами (2019).

Наиболее распространены препараты на основе бромадиолона и бродифакума. Их принято считать препаратами кишечного действия, сочетающимися комбинированный механизм с острым эффектом. По острой токсичности при введении в желудок относятся к чрезвычайно опасным веществам. Как и у варфарины, отмечено кожно-резорбтивное действие (Иваницкая и др., 2011). ЛД₅₀ (летальная доза) бромадиолона у млекопитающих варьирует на порядки: для кабана составляет 3 мг/кг, а для крыс 150 мг/кг (Poché et al., 2018). В последние годы принято учитывать хроническое ЛД₅₀: оно составляет для кролика – 1 мг/кг, для домашней свиньи – 3 мг/кг, для цыплят – 5 мг/кг, а для домашней кошки 25 мг/кг (Галлямова, 2022; Бромадиолон, 2021).

Последние данные свидетельствуют о возможности воздействия на ЦНС при отсутствии выраженного гемолитического синдрома (Feinstein et al., 2017; Wang et al., 2017; Zuo et al., 2019), что соответствует нашим наблюдениям при гибели собак

питомника в 2006 – 2011 гг. и результатам вскрытий – в двух случаях были установлены патоморфологические признаки поражения головного мозга.

Что еще известно про практику и следствия применения антикоагулянтов 2-го поколения?

Еще в девяностых годах (с расширением применения этих родентицидов) описаны отравления голубей и куропаток, серых цапель, водоплавающих и хищных птиц (Lamarque et al., 1999; цит. по: Guitart et al., 2009), лисиц и расклевывающих их орлов (Antoniou et al., 1996; цит. по: Guitart et al., 2009). Отравление признано причиной гибели половины (52.6%) диких птиц, поступивших на токсикологический анализ в Греции за 6 лет (Antoniou et al., 2005; цит. по: Guitart et al., 2009). Второй по распространению группой животных, систематически гибнущих при применении родентицидов, принято считать зайцеобразных (Edwards et al., 2000; цит. по: Guitart et al., 2009).

Передачу антикоагулянтов в пищевых цепях упоминали неоднократно, в разных странах и на разных континентах (Morris et al., 2005). Наиболее емкой представляется работа G. Joermann (1998), включающая собственные данные и обзор работ в разных странах за 40-летний период (1955 – 1995 гг.). Сравнивали летальность родентицидов для хищников и падальщиков при поедании грызунов, получавших отравленные приманки. Результаты исследования оказались парадоксальны. Наименее опасным для хищников и падальщиков оказался фосфид цинка: не было выявлено гибели подопытных животных при поедании ими грызунов, отравленных этим родентицидом, хотя и регистрировались случаи интоксикации, что подтверждают и современные работы (Hinds et al., 2023). Напротив, антикоагулянты 2-го поколения (бродифакум, бромадиолон, дифенакум и флокумафен) вызывали гибель подопытных птиц после их питания отравленными грызунами в течение всего нескольких дней, в исключительных случаях – 1 дня, а млекопитающих спустя 3 дня (Joermann, 1998).

Современные исследования подтверждают факты передачи родентицидов по пищевым цепям. Антикоагулянты, преимущественно второго поколения, обнаружены у 68% из 344 исследованных хищных птиц и млекопитающих в Испании (López-Perea et al., 2015), найденных мертвыми или агонизирующими. Бромадиолон и бромадифакум, использовавшиеся для борьбы с грызунами, определены как причина гибели койотов (*Canis latrans*), рысей (*Lynx rufus*) и пумы (*Puma concolor*) (Riley et al., 2007; Uzal et al., 2007; Serieys et al., 2013; цит. по: Poessel et al., 2015).

Многолетние исследования куных на содержание антикоагулянтов-родентицидов 2-го поколения проведены в Дании (Elmeros et al., 2018). Изучали ткани животных, сбитых автомашинами и уничтоженных при защите домашней птицы (внутри помещений и в радиусе 25 м от них). Установлено, что следы этих веществ присутствуют в тканях у 99% каменных куниц (*Martes foina*, $n = 71$) и 90% лесных хорьков (*Mustela putorius*, $n = 69$). В Испании встречаемость суперварфарина в тканях диких животных – консументов 2-го порядка, положительно коррелирует с урбанизацией (López-Perea et al., 2019), т.е. с их использованием городскими жителями и фермерами.

Таким образом, опасность антикоагулянтов для нецелевых видов тесно связана со сложившейся практикой их применения и отсутствием профессионального контроля. Это также означает, что находящиеся в открытой продаже широкодоступные токсиканты поступают в продукты питания и переходят к человеку.

Суперварфарины и человек

Прямое токсическое воздействие суперварфарина на человека менее выражено, чем на собак (Ruiz-Suárez et al., 2015), что не исключает кумуляции и отложенных эффектов. Существует передача бромадиолона в пищевые продукты человека – они могут присутствовать в молоке. В Швейцарии разрабатываются методы их детекции в культурах йогурта путем подбора бактериальных культур, прекращающих рост в присутствии бромадиолонов (Nathurusinghe, Ibrahim, 2012, 2016).

В 2000 – 2003 гг. Центры отравления США сообщили о 65891 случае различных отравлений антикоагулянтами – родентицидами длительного действия, 96% из которых были случайными. Преобладали отравления детей – в 89% (Caravati et al., 2007). В других странах зарегистрированы прямые отравления людей родентицидами – но, до последних двух-трех лет, анализ был ограничен случаями суицидов и случайных отравлений, при которых установление токсиканта не требуется и не проводится. Анализ изменения частоты использования родентицидов в качестве яда при суициде в провинции Хубей показал возрастание числа случаев от 5.6% в 1957 – 1982 до 19.7% в 1999 – 2008 гг. Отравления людей родентицидами составляют существенную долю причин смерти не только в Китае, но и в Северной Индии (Liu et al., 2009). Подробно описаны клинические симптомы в период пребывания в стационаре, лечение (Зобнин и др., 2013). Сделано патологоанатомическое описание изменений головного мозга при отравлении родентицидами (Ивлева и др., 2018), есть описание методами магнитно-резонансной томографии (Wang et al., 2017). Правильное определение отравления родентицидами-антикоагулянтами осложняется как отсутствием легкого доступа к необходимому высокоточному оборудованию, так и недостаточной осведомленностью медиков о возможности отравления (Chong, Mak, 2019).

Отравления родентицидами зарегистрированы на всех континентах. Центр отравлений в Иллинойсе описывает резкое возрастание числа пациентов с кровоточивостью разной этиологии: у всех обследованных отмечены сублетальные дозы бродифакума, и/или дифенакума, и/или бромадиолона (Devgun et al., 2020). В Самарской и Ульяновской областях произошло массовое (80 установленных пациентов в 2019 г.) отравление подсолнечным маслом (Галстян и др., 2020). Масло было изготовлено с использованием семян подсолнечника, обработанных родентицидами. У всех пациентов наблюдался геморрагический синдром разной выраженности. Анализы, сделанные у части пациентов, подтвердили наличие антикоагулянтов в крови и использованном масле.

Сравнительный анализ отравлений показывает, что препараты, кажущиеся не остро действующими – антикоагулянты второго поколения, в практике применения гораздо опаснее. Это связано со способностью к накоплению и длительностью их выведения. Так, например, полувыведение варфарина у крысы происходит за

40 часов, а бродифакума достигает 180 дней – 4320 часов (Erickson, Urban, 2004). У человека период полувыведения бродифакума колеблется от 10 до 69 суток (243 – 1656 часов) (Галстян и др., 2020).

Современные данные показывают высокую опасность суперварфаринов: по лимитирующему показателю токсичности опасности родентицидов – кумулятивному эффекту – средства относятся к 1-му классу чрезвычайно опасных по действующей классификации токсичности и опасности родентицидов. Бромационон остро токсичен в низких дозах (<https://biopax.ru/articles/bromdialon/>). Однако системные исследования присутствия этих препаратов не проводятся – Госстандарт (ГОСТ Р 58481-2019) предназначен для определения физико-химических показателей препаратов на основе бромациононов, но не для оценки отравления ими животных и человека.

Представленный краткий обзор показывает сочетание высокой опасности антикоагулянтов второго поколения с крайне низкой вероятностью их своевременного обнаружения. Особые опасения вызывает отсутствие научно обоснованных тактик, стратегии и контроля применения токсикантов, включая родентициды и другие химически активные вещества, влияющие на представителей животного мира и человека.

Практические аспекты

Использование родентицидов в природных системах включает два основных направления: обработку полей от мышевидных грызунов и контроль численности носителей возбудителей особо опасных инфекций (чумы, туляремии и др.) и зоонозов (сальмонеллез, лептоспироз, геморрагических лихорадок и др.). Проблема в том, что контролем численности видов-носителей занимаются специалисты противочумных учреждений Роспотребнадзора, а обработки полей проводят сельхозпроизводители по своему усмотрению. Деятельность специалистов направлена на предотвращение вспышек особо опасных природных заболеваний, включает «организацию и проведение санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий при возникновении чумы и других особо опасных (ООИ), природно-очаговых и зоонозных инфекционных заболеваний, их лабораторную диагностику; соблюдение требований специальной техники безопасности работ с микроорганизмами I – II групп патогенности (опасности)» (Положение об организации..., 2015)). В РФ существует 19 Федеральных противочумных учреждений, чьи задачи включают противоэпидемические мероприятия, но отнюдь не сбор и доставку материалов для установления токсикантов. Важной частью мероприятий, препятствующих возникновению ООИ, является контроль и ограничение численности грызунов. Его выполняют как государственные предприятия, так и частные фирмы и индивидуальные предприниматели. Современный регламент изложен в новых «Санитарных правилах по профилактике инфекционных болезней» (СанПиН 3.3686-21). Однако объектом нового СанПиНа являются зоны рекреации, лесопарки, прилегающие к населенным пунктам и собственно населенные места (п. 112), где формируются и функционируют природные, природно-антропогенные и антропогенные очаги инфекций (пп. 112 – 124). Не упомя-

нуты миллионы гектаров полей зерновых и масличных культур, составляющие основную площадь зон водосбора. Завершающее положение современного регламента о дератизационных мероприятиях – «трупы отловленных животных утилизируются в соответствии с законодательством в области ветеринарии» (с. 37) в принципе не выполнимо в лесопарках, агроценозах и сопредельных с ними территориях.

Деятельность сельхозпроизводителей направлена на повышение рентабельности и получение прибыли. Работу с токсикантами выполняют наемные работники, не имеющие специального образования и, в лучшем случае, прошедшие лишь общий инструктаж. Специализированные обследования и мониторинг состояния их здоровья отсутствуют.

Возможности исследователей, прежде всего дикой природы и естественных биосистем, крайне ограничены: сельхозпроизводители наиболее активно используют родентициды после уборки, до наступления холодов. Это приводит к тому, что обнаружение, сбор и доставка для исследований погибших животных затруднительны (мало реальны). При случайном сборе приходится выполнять анализ частично разложившихся тканей, в которых концентрация токсикантов снижена за счет естественного распада.

Токсикологические лаборатории не лицензированы для вскрытий и изъятия проб – это должны делать иные организации. Поэтому даже при оперативной работе охотнадзора, охотников, местного населения не ясно, куда следует отправлять собранный материал. При привлечении органов внутренних дел ситуация не улучшается – у них отсутствуют условия и оборудование для хранения, нормативы и разрешения. Станции по борьбе с болезнями животных не обязаны принимать и обеспечивать сохранность материалов, даже если они не поддадутся давлению местных агропроизводителей, не заинтересованных в установлении нарушений регламента применения токсикантов. Для перевозки биоматериалов в другие регионы требуется заключение об отсутствии их инфицированности (Об утверждении Правил транспортировки..., 2017) – следовательно, количество собираемых образцов (тушек) должно быть достаточно для проведения первичных исследований в пределах района и для передачи на исследования и изъятие проб для анализов. Наконец, не установлено, какие именно организации могут производить анализы и устанавливать конкретные токсиканты – если не считать единичные коммерческие фирмы, обеспечивающие сопровождение материалов при судебных спорах по очень высоким ценам, недоступным для сельских районов.

За время подготовки этой статьи поступили новые данные: в ноябре – декабре 2021 г. в Крыму установлен падеж дрофы после обработки полей родентицидами. По некоторым данным, речь идет о десятках найденных и захороненных птиц, по другим – об отдельных особях (Шакирова, 2021; Росохотрыболовсоюз..., 2022). Установлено отсутствие фосфида цинка в остатках мацерированных тушек (впрочем, там уже ни его, ни антикоагулянтов и быть не могло), но сбор погибших животных, вскрытия и токсикологический анализ не проводили. В 2022 г. в Ростовской области, установив факты падежа, Общество охотников смогло организовать токсикологические исследования, доказавшие наличие суперварфарина в тканях

погибших животных. В 2022 г. в Ставропольском крае зарегистрировали многочисленные факты гибели зайцев-русаков и лисицы обыкновенной, но нам не известны результаты токсикологических исследований.

Приведенные факты показывают, что в РФ не контролируется практическое использование родентицидов в природных системах, сопряженных с агроценозами. Вследствие этого происходит прямое воздействие на фауну диких и домашних животных, а население не защищено от случайных отравлений. К сожалению, даже быстрое обнаружение отравлений людей и животных не гарантирует своевременного и правильного определения причин этих событий.

Рекомендации по сбору и хранению материалов, направляемых для исследования

1. Учитывая вероятность проникновения варфаринов и суперварфаринов через кожу, сбор погибших животных следует проводить в перчатках, заходя со стороны ветра, с обильным умыванием перед отдыхом и приемами воды, с обязательной стиркой одежды после завершения.

2. Все пробы (тушки животных, зерно и грунт) следует сразу складывать в отдельные пластиковые пакеты, лучше вакуумные.

3. Пробы необходимо как можно быстрее замораживать, хранить и перевозить без оттаивания.

4. Вскрытия могут проводить СББЖ – макропатологические изменения, указывающие на отравления антикоагулянтами, достаточно характерны. Следует обращать внимание на гемorragии внутренних органов и наличие крови или кровянистой жидкости в полостях тела, при отсутствии внешних повреждений. Локализация кровоизлияний наблюдается чаще в дыхательной системе, в киле грудины и костях черепа, нередко сопровождается отеком мозга, реже в желудочно-кишечном тракте.

5. Для химического анализа отбирать пробы внутренних органов с признаками макропатологических изменений. Пробы для химического анализа (допустимая масса от 30 – 50 г) надо замораживать в пробирках. Перевозить без размораживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В российских законах о применении родентицидов до 2021 г. применялась устаревшая классификация животных – их подразделение на полезных и вредных. В последнем СанПин (3.3686-21) эти понятия убраны. Однако в нем четко определено, что действия с агрохимикатами и прямыми ядами – родентицидами никак не регулируются на огромных территориях водосбора, включающих агроценозы, примыкающие к ним участки неугодий и водоемы. Применение готовых приманок (парафиновые блоки, гранулы и т.п.), возможно, может снижать величину ущерба для нецелевых видов, но не прерывает передачу по пищевым цепям. Поэтому отравление различными дозами агрохимикатов и родентицидов является фактором системного воздействия на популяции диких животных и, несомненно, ждет своих исследователей.

Гибель хищных птиц (консументов 2-го порядка) свидетельствует о сохранении токсических доз веществ в организмах травоядных (консументов 1-го порядка), то есть о передаче по пищевым цепям. Человек также является консументом 2-го порядка. Таким образом, отравление хищных (летающих и наземных) доказывает возможность поступления токсикантов в организм человека с пищей. Отравления птиц, связанных с водоемами, свидетельствует о поступлении токсикантов в воду – и о риске отравления человека. Передача ядов по трофическим цепям среди животных доказывает их способность поступать в пищу человека. Факты, упомянутые выше (присутствие в молоке, растительном масле), подтверждают, что эта перспектива реализована на практике. Реакция хищников – гибель – означает недопустимый уровень использования, нарушение регламента либо непригодность применяемых препаратов.

Таким образом, применение современных родентицидов в Российской Федерации контролируется лишь отчасти. Изучение литературы и практики применения доказывает существование угрозы биологической безопасности в области, сочетающей воздействие химических и биологических факторов.

Необходима организация системы полевого мониторинга и лабораторных исследований применения родентицидов. Они должны включать несколько тесно взаимосвязанных направлений:

- 1) целенаправленный сбор данных о результатах применения родентицидов в природных системах, включающих агроценозы и природные биоценозы;
- 2) доступную государственную экспертизу на современном оборудовании для определения/исключения фактов поступления токсикантов в организмы диких и домашних животных, людей и сельскохозяйственной продукции;
- 3) программы лабораторных и полевых исследований влияния сублетальных доз родентицидов разного типа на животных и человека;
- 4) подтверждение либо опровержение факта отравления суперварфаринами до поступления в желудок и кишечник, что может потребовать изменения подхода к применению и системы оценки летальных доз варфаринов и суперварфаринов;
- 5) апробацию и внедрение химических маркеров присутствия родентицидов и других агрохимикатов;
- 6) разработку и внедрение системы информирования специалистов и населения о фактах применения и долговременных следствиях родентицидов;
- 7) особое внимание следует уделять антикоагулянтам второго поколения, необходима жесткая регуляция их оборота, вплоть до полного запрещения.

Первичный сбор материала организован администрацией Новониколаевского района Волгоградской области и сотрудниками Министерства природных ресурсов Краснодарского края. Патологоанатомические исследования выполнены в Институте проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН при участии специалистов: патоморфолога Е. В. Барановой, ветеринарных врачей М. В. Токуновой, Э. Г. Вольф. Токсикологический анализ выполнен под руководством С. В. Андреева в лаборатории химических исследований дезинфекционных средств ФБУН НИИ Дезинфектологии Роспотребнадзора. При подготовке статьи неоценимую помощь оказали замечания и рекомендации Д. Б. Вержужского.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев С. В., Беляев Е. С., Ищенко А. А. Новый универсальный метод для определения антикоагулянтов второго поколения в родентицидах // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2019. Т. 62, № 1. С. 85 – 90. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5719>

Березовский О. И. Санитарно-токсикологическая оценка родентицидных средств из группы антикоагулянтов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1998. 19 с.

Бромадиолон // RuPest.ru. 2021. URL: <http://rupest.ru/ppdb/bromadiolone.html> (дата обращения: 17.01.2023).

Войцеховский В. В., Пивник А. В., Филатова Е. А., Есенина Т. В., Мишкурова К. М., Федорова Н. А. Коагулопатия при интоксикации родентицидами – антагонистами витамина К // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2020. Вып. 78. С. 161 – 177. <https://doi.org/10.36604/1998-5029-2020-78-161-177>

Галлямова О. В. Антикоагулянты крови // Пестициды.ru. 2013. URL: https://www.pesticide.ru/group_substances/anticoagulants (дата обращения: 17.01.2023).

Галлямова О. В. Бромадиолон // Пестициды.ru. 2022. URL: https://www.pesticide.ru/active_substance/bromadiolon (дата обращения 18.04.2023).

Галстян Г. М., Давыдкин И. Л., Николаева А. С., Вехова Н. И., Павлова Ж. Е., Пономаренко И. С., Клебанова Е. Е., Савченко В. Г. Случай массового отравления антикоагулянтными родентицидами // Гематология и трансфузиология. 2020. Т. 65, № 2. С. 174 – 189. <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2020-65-2-174-189>

Гигиенические требования к безопасности процессов испытаний, хранения, перевозки, реализации, применения, обезвреживания и утилизации пестицидов и агрохимикатов: Санитарные правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 71 с.

Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации 2020, 2021 // Минсельхоз России. М., 2022. URL: <http://mcx.ru/ministry/departments/departament-rastenievodstva-mekhanizatsii-khimizatsii-i-za-shchity-rasteniy/industry-information/info-gosudarstvennaya-usluga-po-gosudarstvennoy-registratsii-pestitsidov-i-agrokhimikatov/> (дата обращения: 12.02.2022).

ГОСТ Р 58481-2019. Средства родентицидные. Методы определения физико-химических показателей. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.

Ерофеева Е. В., Суркова Ю. Е., Шубкина А. В. Родентициды и гибель диких животных // Успехи современной биологии. 2021. Т. 141, № 5. С. 496 – 507. <https://doi.org/10.31857/S0042132421050021>

Захарова Г. В., Пашиовкина Р. Н., Краснова Р. Р. Варфарин и его аналоги – антикоагулянты кумаринового ряда в судебно-химическом и химико-токсикологическом анализе // Судебная медицина. 2019. Т. 5, № 1. С. 120 – 121.

Зобнин Ю. В., Кутателадзе Р. Г., Малых А. Ф., Пазюков Е. А., Провало И. П., Тетерина И. П. Острые отравления антикоагулянтами по данным Иркутского токсикологического центра // Сибирский медицинский журнал. 2013. Т. 120, № 5. С. 131 – 134.

Ивлева Е. А., Богомолов Д. В., Путинцев В. А., Букешов М. К. Особенности морфологических проявлений переживания отравления родентицидом // Декабрьские чтения по судебной медицине: сборник материалов международной научно-практической конференции / под ред. Д. В. Сундукова. М.: Российский ун-т дружбы народов, 2018. С. 38 – 41.

Иваницкая Е. Г., Кочергина-Никитская Е. В., Шастова Л. А. Инструкция № 45-11 от 21.02.2011 г. по применению средства родентицидного «Бромоцид-Флюид» / ЗАО «Научно-коммерческая фирма «РЭТ», Россия: М.: НЧНОУ «Институт пест-менеджмента», 2011. 8 с. URL: https://dez-sredstva.com/svidet_instruct/rodent_concentr/bromocid-fljuidin.pdf (дата обращения: 18.01.2022).

СОВРЕМЕННЫЕ РОДЕНТИЦИДЫ И НЕЦЕЛЕВЫЕ ВИДЫ

Об утверждении Правил транспортировки биологического материала, клеток для приготовления клеточных линий, клеточных линий, предназначенных для производства биомедицинских клеточных продуктов, и биомедицинских клеточных продуктов (Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 28.08.2017 № 564н). М., 2017. 5 с. URL: <https://cdnstatic.rg.ru/uploads/attachments/149/21/10/49385.pdf> (дата обращения: 22.12.2021).

Положение об организации деятельности системы противочумных учреждений Роспотребнадзора (утв. приказом Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 1 апреля 2015 г. № 274). М., 2015 24 с. URL: https://www.rosпотребнадзор.ru/upload/iblock/dd0/prikaz-pchu-ot-01.04.15-n-274_-zaregistr.-minyustom-26.06.15.pdf (дата обращения: 22.12.2021).

Росохотрыболовсоюз пытается найти виновных в гибели дроф в Крыму // Охотники.ру. М., 2022. URL: <https://www.ohotniki.ru/hunting/societys/societys/article/2022/02/20/660116-rosohotryibolovsoyuz-pytaetsya-nayti-vinovnyih-v-gibeli-drof-v-kryimu.html> (дата обращения: 22.02.2022).

Российский рынок сельхозсырья и продовольствия в 2001 – 2020 гг. (обновление на декабрь 2020) / Экспертно-аналитический центр агробизнеса «АБ-Центр». 2021. URL: <https://ab-centre.ru/dbase/rossiyskiy-rynok-selhozsyrya-i-prodovolstviya-v-2001-2020-gg-obnovlenie-na-dekabr-2020?ysclid=lgmhrqznpv779126512> (дата обращения 15.02.2022).

Рыльников В. А., Матросов А. Н., Кузнецов А. А., Яковлев А. А., Бабич Н. В., Слудский А. А., Тарасов М. А., Тоцигин Ю. В., Кадиров А. Ф. Управление численностью проблемных биологических видов. Т. 3. Дератизация: учебное пособие / под ред. В. А. Рыльникова. М.: Институт пест-менеджмента, 2011. 220 с.

СанПиН 3.5.3.1129-02. СП 3.5.3.1129-02. Санитарно-эпидемиологические требования к проведению дератизации (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 12.07.2002). М., 2002. 20 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/9e2/4294845736.pdf> (дата обращения: 22.12.2021).

Шакирова Г. На западе Крыма погибли около 70 краснокнижных дроф // Российская газета. М., 2021 URL: https://rg.ru/2021/12/20/reg-ufo/na-zapade-kryma-pogibli-okolo-70-krasnoknizhnyh-drof.html?fbclid=IwAR0IwxXucT7cYUoE4E3YW-o7_hRBxcdO7jYnapJU8Fz_-X2Qm2yAmzg0 (дата обращения: 22.12.2021).

Яковлев А. А., Бабич Н. В., Драгомиров К. А. Как защитить урожай от мышевидных грызунов? // Защита и карантин растений. 2007. №. 9. С. 9 – 10.

Яковлев А. А., Бабич Н. В. Родентициды // Защита и карантин растений. 2011. № 10. С. 42 – 44.

Aktar M. W., Sengupta D., Chowdhury A. Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards // Interdisciplinary Toxicology. 2009. Vol. 2, № 1. P. 1 – 12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>

Antoniou V., Zantopoulos N., Skartsi D., Tsoukali-Papadopoulou H. Pesticide poisoning of animals of wild fauna // Veterinary and Human Toxicology. 1996. Vol. 38, iss. 3. P. 212 – 213.

Antoniou V., Zantopoulos N., Samouris G., Ioannidou M. Impacts of toxic substances in animals of wild fauna in Northern Greece // Proceedings of the 2nd Environmental Conference of Macedonia. Thessaloniki, 2005. P. 1 – 6.

Berry Ph., Velardo J., Pulce C., D'amico A., Kammerer M., Lasseur R. Prevalence of anticoagulant rodenticide poisoning in humans and animals in France and substances involved // Clinical Toxicology. 2010. Vol. 48, iss. 9. P. 935 – 941. <https://doi.org/10.3109/15563650.2010.533678>

Caravati E. M., Erdman A. R., Scharman E. J., Woolf A. D., Chyka P. A., Cobaugh D. G., Wax P. M., Manoguerra A. S., Christianson G., Nelson L. S., Olson K. R., Booze L. L., Troutman W. G. Long-acting anticoagulant rodenticide poisoning: An evidence-based consensus guide-

line for out-of-hospital management // *Clinical Toxicology*. 2007. Vol. 45, iss. 1. P. 1 – 22. <https://doi.org/10.1080/15563650600795487>

Chong Y.-K., Mak T. W.-L. Superwarfarin (long-acting anticoagulant rodenticides) poisoning: from pathophysiology to laboratory-guided clinical management // *Clinical Biochemical Review*. 2019. Vol. 40, № 4. P. 175 – 185. <http://doi.org/10.33176/AACB-19-00029>

Devgun J. M., Rasin A., Kim T., Mycyk M. B., Bryant S. M., Wahl M. S., Lauriers C. D., Navon L., Moritz E. D., Thompson T. M., Swoboda H. D., Lu J., Aks S. E. An outbreak of severe coagulopathy from synthetic cannabinoids tainted with long-acting anticoagulant rodenticides // *Clinical Toxicology*. 2020. Vol. 58, iss. 8. P. 821 – 828. <https://doi.org/10.1080/15563650.2019.1690149>

Edwards P. J., Fletcher M. R., Berny P. Review of the factors influencing the decline of the European brown hare, *Lepus europaeus* (Pallas, 1778) and the use of wildlife incident data to evaluate the significance of paraquat // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2000. Vol. 79, iss. 2 – 3. P. 95 – 103. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00153-X)

Elmeros M., Lassen P., Bossi R., Topping C. J. Exposure of stone marten (*Martes foina*) and polecat (*Mustela putorius*) to anticoagulant rodenticides: Effects of regulatory restrictions of rodenticide use // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 612. P. 1358 – 1364. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.0340048-969>

Erofeeva E. V., Surkova Ju. E., Shubkina A. V. Rodenticides and wildlife extermination // *Biology Bulletin Reviews*. 2022. Vol. 12, № 2. P. 178 – 188. <https://doi.org/10.1134/S2079086422020025>

Erickson W., Urban D. Potential Risks of Nine Rodenticides to Birds and Nontarget Mammals: A Comparative Approach. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2004. 225 p.

Feinstein D. L., Akpa B. S., Ayee M. A., Boullerne A. I., Braun D., Brodsky S. V., Gidalevitz D., Hauck Z., Kalinin S., Kowal K., Kuzmenko I., Lis K., Marangoni N., Martynowycz M. W., Rubinstein I., Breemen R. van, Ware K., Weinberg G. The emerging threat of superwarfarins: History, detection, mechanisms, and countermeasures // *Annals of New-York Academy of Sciences*. 2017. Vol. 1374, iss. 1. P. 111 – 122. <https://doi.org/10.1111/nyas.13085>

Guiart R., Sachana M., Caloni F., Croubels S., Vandenbroucke V., Berny Ph. Animal poisoning in Europe. Part 3: Wildlife // *Veterinary Journal*. 2009. Vol. 183, iss. 3. P. 260 – 265. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2009.03.033>

Hathurusinghe M. H., Ibrahim S. A. Survival and growth of yogurt culture in MRS broth in the presence of selected rodenticides // *Milchwissenschaft*. 2012. Vol. 67, № 1. P. 51 – 54.

Hathurusinghe M. H., Ibrahim S. A. Influence of brodifacoum and bromadiolone on growth of yoghurt cultures in milk // *International Journal of Dairy Technology*. 2016. Vol. 69, iss. 1. P. 51 – 56. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12205>

Hinds L. A., Henry Y. S., Van De Weyer N., Robinson F., Ruscoe W. A., Brown P. R. Acute oral toxicity of zinc phosphide: an assessment for wild house mice (*Mus musculus*) // *Integrative Zoology*. 2023. Vol. 18, iss. 1. P. 63 – 75. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12666>

Joermann G. A review of secondary-poisoning studies with rodenticides // *OEPP EPPO Bulletin*. 1998. Vol. 28, iss. 1/2. P. 157 – 176. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1998.tb00717.x>

Lamarque F., Artois M., Berny P., Hatier C. Le réseau SAGIR, réseau national de suivi sanitaire de la faune sauvage Française // *Bulletin Mensuel Office National de la Chasse*. 1999. Vol. 246. P. 18 – 26.

Liu Q., Zhou L., Zheng N., Zhuo Luo, Liu Y., Liu L. Poisoning deaths in China: Type and prevalence detected at the Tongji Forensic Medical Center in Hubei // *Forensic Science International*. 2009. Vol. 193. P. 88 – 94. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.09.013>

López-Perea J. J., Camarero P. R., Molina-Lopez R. A., Parpal L., Obon E., Sola J., Mateo R. Interspecific and geographical differences in anticoagulant rodenticide residues of predatory wild-

life from the Mediterranean region of Spain // *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 511. P. 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.042>

López-Perea J. J., Camarero P. R., Sanchez-Barbudo I. S., Mateo R. Urbanization and cattle density are determinants in the exposure to anticoagulant rodenticides of non-target wildlife // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 244. P. 801 – 808. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.101>

Masuda B. M., Fisher P., Beaven B. Residue profiles of brodifacoum in coastal marine species following an island rodent eradication // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015. Vol. 113. P. 1 – 8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.11.013>

Morgan A. M. Teratogenic effect of the coumarinic anticoagulant rodenticide, racumin in white rats // *Egyptian Society of Clinical Toxicology Journal*. 2006. Vol. 34. P. 5 – 14.

Morriss G., Nugent G., Fisher P. Exposure of feral pigs to brodifacoum following baiting for rodent control // *DOC Internal Science Series* 194. Wellington: Department of Conservation, 2005. 16 p.

Poché R. M., Poché D., Franckowiak G., Somers D. J., Briley L. N., Tseveenjav B., Polyakova L. Field evaluation of low-dose warfarin baits to control wild pigs (*Sus scrofa*) in North Texas // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13, iss. 11. P. 1 – 21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206070>

Poessel S. A., Breck S. W., Fox K. A., Gese E. M. Anticoagulant rodenticide exposure and toxicosis in coyotes (*Canis latrans*) in the Denver metropolitan area // *Journal of Wildlife Diseases*. 2015. Vol. 51, iss. 1. P. 265 – 268. <https://doi.org/10.7589/2014-04-116>

Rattner B. A., Horak K. E., Warner S. E., Day D. D., Meteyer C. U., Volker S. E., Eisemann J. D., Johnston J. J. Acute toxicity, histopathology, and coagulopathy in American kestrels (*Falco sparverius*) following administration of the rodenticide diphacinone // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2011. Vol. 30, iss. 5. P. 1213 – 1222. <https://doi.org/10.1002/etc.490>

Riley S. P. D., Bromley C., Poppenga R. H., Uzal F. A., Whited L., Sauvajot R. M. Anticoagulant exposure and notoedric mange in bobcats and mountain lions in urban southern California // *Journal of Wildlife Management*. 2007. Vol. 71. P. 1874 – 1884.

Risk Mitigation Decision for Ten Rodenticides. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2008. 60 p. URL: <https://glm.com/wp-content/uploads/2019/03/EPA-HQ-OPP-2006-0955-0764.pdf> (accessed 30 May 2021).

Ruiz-Suárez N., Rial C., Boada L. D., Henríquez-Hernández L. A., Valeron P. F., Camacho M., Zumbado M., González M. A., Lara P., Luzardo O. P. Are pet dogs good sentinels of human exposure to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons, organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls? // *Journal of Applied Animal Research*. 2015. Vol. 44, iss. 1. P. 135 – 145. <https://doi.org/10.1080/09712119.2015.1021808>

Serieys L. E. K., Foley J., Owens S., Woods L., Boydston E. E., Lyren L. M., Poppenga R. H., Clifford D. L., Stephenson N., Rudd J., Riley S. P. D. Serum chemistry, hematologic, and post-mortem findings in free-ranging bobcats (*Lynx rufus*) with notoedric mange // *Journal of Parasitology*. 2013. Vol. 99, iss. 6. P. 989 – 996. <https://doi.org/10.1645/12-175.1>

Staples L., Smith M., Pontin K. Use of zinc phosphide to overcome rodent infestations // *Proceedings of the Australian Postharvest Technical Conference*. Canberra: CSIRO, 2003. P. 110 – 115. <https://doi.org/10.13140/2.1.1190.3364>

Thomson L. A., Darwish W. S. Environmental chemical contaminants in food: Review of a global problem // *Journal of Toxicology*. 2019. Vol. 2019. Article number 2345283. <https://doi.org/10.1155/2019/2345283>

Uzal F. A., Houston R. S., Riley S. P. D., Poppenga R., Odani J., Boyce W. Notoedric mange in two free-ranging mountain lions (*Puma concolor*) // *Journal of Wildlife Diseases*. 2007. Vol. 43, iss. 2. P. 274 – 278. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-43.2.274>

Wade A. Opinion: Apocalypse when? A future without rodenticides // Professional Pest Controller. 2021. Iss. 103. <https://ppconline.org/PPC-News/apocalypse-when-a-future-without-rodenticides/271653>.

Wang M., Yang Y., Hou Y., Ma W., Jia R., Chen J. Effects of bromadiolone poisoning on the central nervous system // Neuropsychiatric Disease and Treatment. 2017. Vol. 13. P. 2297 – 2300. <https://doi.org/10.2147/NDT.S142375>

Yadav I. C., Devi N. L., Syed J. H., Cheng Z., Li J., Zhang G., Jones K. C. Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: A comprehensive review of India // Science of the Total Environment. 2015. Vol. 511. P. 123 – 137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.041>

Zuo W., Zhang X., Chang J., Ma W., Wei J. Bromadiolone poisoning leading to subarachnoid haemorrhage: A case report and review of the literature // Journal of Clinical Report and Therapeutics. 2019. Vol. 44, iss. 6. P. 958 – 962. <https://doi.org/10.1111/jcpt.13005>

Modern rodenticides and non-target species

E. V. Erofeeva ¹, Ju. E. Surkova ², A. V. Shubkina ¹✉

¹ A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences
33 Leninsky Pros., Moscow 119071, Russia

² Moscow Pedagogical State University
1 Malaya Pirogovskaya St., Moscow 119991, Russia

Received: 27 February 2023 / revised: 28 March 2023 / accepted: 28 March 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. It is generally recognized that environmental pollution with agrotechnical substances is the major problem for the conservation of biological diversity and human food security. However, their use cannot be completely excluded. Of particular importance are modern rodenticides, i.e. superwarfarins, designed to reduce the numbers of rodents damaging agriculture, i.e. to destroy animals. However, these poisons are highly toxic and are passed up the food chains. Besides, it is impossible to draw a line between agrocnoses in their classical sense and the natural or slightly modified environment. The absence of clear physical boundaries of agrocnoses means that the processes occurring therein affect the biological diversity of adjacent territories, which are considered natural. Animals use both fields and the spaces adjacent to them. In addition, there is a water exchange between cultivated fields and the adjacent natural areas and reservoirs. Modern changes in the structure of agrocnoses increase the segment of fields which rodenticides are used on. The plowing of ravines, riversides and other inconvenient lands (due to an improved quality of equipment) facilitates the ingress of rodenticides into water bodies. Data on the consequences of the use of superwarfarins in some anthropogenic biocenoses of the southern regions of the Russian Federation are presented. Facts of mass destruction of consumers of the 1st and 2nd order (the so-called non-target species), directly related to rodenticid use, are given. Complex pathomorphological and toxicological studies of animals died in nature were carried out for the first time in the Russian Federation. The presence of bromadiolone in tissue samples was confirmed by chemical analysis, and the descriptions of autopsies of dead birds have been processed. Recommendations on the specific features for the collecting and storage of materials sent for research have been prepared.

Keywords: rodenticides, anticoagulants, non-target species, wild animals, natural systems

For citation: Erofeeva E. V., Surkova Ju. E., Shubkina A. V. Modern rodenticides and non-target species. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 148–178 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-148-178>

REFERENCES

Andreev S. V., Belyaev E. S., Ischenko A. A. New universal method for determination of anticoagulants in rodenticides. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 85–90 (in Russian). <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5719>

✉ *Corresponding author.* Laboratory for Behaviour and Behavioural Ecology of Mammals, A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Ekaterina V. Erofeeva: <https://orcid.org/0009-0006-0062-2119>, canis92@mail.ru; Julia E. Surkova: u.sura.sura@yandex.ru; Anna V. Shubkina: <https://orcid.org/0000-0002-6857-3812>, anashubkina@rambler.ru.

Berezovsky O. I. *Sanitary and Toxicological Assessment of Rodenticidal Agents from the Group of Anticoagulants*. Thesis Diss. Cand. Sci. (Biol.). Moscow, 1998. 19 p. (in Russian).

Bromadiolone. *RuPest.ru*, 2021. Available at: <http://rupest.ru/ppdb/bromadiolone.html> (accessed 17 January 2023) (in Russian).

Voytsekhovskiy V. V., Pivnik A. V., Filatova E. A., Esenina T. V., Mishkurova K. M., Fedorova N. A. Coagulopathy at intoxication with rodenticides – antagonists of vitamin K. *Bulletin Physiology and Pathology of Respiration*, 2020, iss. 78, pp. 161–177 (in Russian). <https://doi.org/10.36604/1998-5029-2020-78-161-177>

Galliamova O. V. Blood anticoagulants. *Pesticidy.ru*, 2013. Available at: https://www.pesticidy.ru/group_substances/anticoagulants (accessed 17 January 2023) (in Russian).

Galliamova O. V. Bromadiolone. *Pesticidy.ru*, 2022. Available at: https://www.pesticidy.ru/active_substance/bromadiolon (accessed 18 January 2023) (in Russian).

Galstyan G. M., Davydkin I. L., Nikolaeva A. S., Vekhova N. I., Pavlova Z. E., Ponomarenko I. S., Klebanova E. E., Savchenko V. G. Outbreak of mass poisoning with anticoagulant rodenticides. *Russian Journal of Hematology and Transfusiology*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 174–189 (in Russian). <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2020-65-2-174-189>

Hygienic Requirements for Safety of Testing, Storage, Transportation, Sale, Use, Disposal and Utilization of Pesticides and Agrochemicals: Sanitary Rules and Regulations. Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2010. 71 p. (in Russian).

State Catalogue of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use in the Russian Federation 2020, 2021. *Ministry of Agriculture of the Russian Federation*. Moscow, 2022. Available at: <http://mcx.ru/ministry/departments/departament-rastenievodstva-mekhanizatsii-khimizatsii-i-za-shchity-rasteniy/industry-information/info-gosudarstvennaya-usluga-po-gosudarstvennoy-registratsii-pestitsidov-i-agrokhimikatov> (accessed 12 February 2022) (in Russian).

GOST R 58481-2019. *Rodenticides. Methods for the determination of the physical and chemical properties*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 10 p. (in Russian).

Erofeeva E. V., Surkova Ju. E., Shubkina A. V. Rodenticides and wildlife deletion. *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2021, vol. 141, no. 5, pp. 496–507 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0042132421050021>

Zakharova G. V., Pashovkina R. N., Krasnova R. R. Warfarin and its analogues - coumarin anticoagulants in forensic chemical and chemical toxicological analysis. *Russian Journal of Forensic Medicine*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 120–121 (in Russian).

Zobnin Yu. V., Kutateladze R. G., Malykh A. F., Pazyukov E. A., Provado I. P., Teterina I. P. Acute poisonings with anticoagulants according to the data of the Irkutsk toxicological center. *Sibirskii meditsinskii zhurnal*, 2013, vol. 120, no. 5, pp. 131–134 (in Russian).

Ivleva E. A., Bogomolov D. V., Putintsev V. A., Bukeshov M. K. Morphological manifestations of the rodenticide poisoning. In: *Dekabr'skie chteniia po sudebnoi meditsine: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Pod red. D. V. Sundukova* [D. V. Sundukov, ed. December Readings on Forensic Medicine: Collection of Materials of the International Scientific-Practical Conference]. Moscow, Peoples' Friendship University of Russia Publ., 2017, pp. 38–41 (in Russian).

Ivanitskaya E. G., Kochergina-Nikitskaya E. V., Shastova L. A. *Instruction No. 45-11 from 21.02.2011 on the use of rodenticide “Bromocid-Fluid” / CJSC Scientific and Commercial Firm “RET”, Russia*. Moscow, Non-Commercial Institute of Pest Management Publ., 2011. 8 p. Available at: https://dez-sredstva.com/svidet_instruct/rodent_concentr/bromocid-fljuidin.pdf (accessed 18 January 2022) (in Russian).

On Approval of the Rules for Transportation of Biological Material, Cells for Production of Cell Lines, Cell Lines Intended for Production of Biomedical Cell Products and Biomedical Cell Products (Order of the Ministry of Health of the Russian Federation of 28.08.2017 No. 564n).

Moscow, 2017. 5 p. Available at: <https://cdnstatic.rg.ru/uploads/attachments/149/21/10/49385.pdf> (accessed 22 December 2021) (in Russian).

Regulations on the Organization of the Activities of Plague Control Facilities of Rosпотребнадзор (approved by Order No. 274 of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, April 1, 2015). Moscow, 2015. 24 p. Available at: https://www.rosпотребнадзор.ru/upload/iblock/dd0/prikaz-pchu-ot-01.04.15-n-274_-zaregistr.-minyustom-26.06.15.pdf (accessed 22 December 2021) (in Russian).

Rosohotrybolovsoyuz is trying to find those responsible for the death of great bustards in Crimea. *Ohotniki.ru*. Moscow, 2022. Available at: <https://www.ohotniki.ru/hunting/societys/societys/article/2022/02/20/660116-rosohotrybolovsoyuz-pyitaetsya-nayti-vinovnyih-v-gibeli-drof-v-kryimu.html> (accessed 22 February 2022) (in Russian).

Russian Market of Agricultural Raw Materials and Foodstuffs in 2001–2020 (updated for December 2020). Expert-Analytical Center of Agribusiness “AB-Center”. 2021. Available at: <https://ab-centre.ru/dbase/rossiyskiy-rynok-selhozsyrya-i-prodovolstviya-v-2001-2020-gg-obnovlenie-na-dekabr-2020?ysclid=lgmhrqznpv779126512> (accessed 15 February 2022) (in Russian).

Ryl'nikov V. A., Matrosov A. N., Kuznetsov A. A., Iakovlev A. A., Babich N. V., Sludskii A. A., Tarasov M. A., Toshchigin Iu. V., Kadirov A. F. *Upravlenie chislennost'iu problemnykh biologicheskikh vidov. T. 3. Deratizatsiya: uchebnoe posobie. Pod red. V. A. Ryl'nikova* [Ryl'nikov V. A., ed. Control of the Abundance of Hazardous Biological Species. Vol. 3. Deratization: Manual]. Moscow, Institute of Pest Management Publ., 2011. 220 p. (in Russian).

SanPiN 3.5.3.1129-02. SP 3.5.3.1129-02. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniia k provedeniiu deratizatsii (utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 12.07.2002)* [SanPiN 3.5.3.1129-02. SANPN 3.5.3.1129-02. Sanitary and Epidemiological Requirements for Deratization (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 12.07.2002)]. Moscow, 2002. 20 p. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/9e2/4294845736.pdf> (accessed 12 December 2021) (in Russian).

Shakirova G. In the west of Crimea, about 70 red-listed bustards died. *Rossiiskaia gazeta*. Moscow, 2021. Available at: https://rg.ru/2021/12/20/reg-ufo/na-zapade-kryma-pogibli-okolo-70-krasnokniznyh-drof.html?fbclid=IwAR0IwxXucT7cYUoE4E3YW-o7_hRBxcdO7jYnapJU8Fz_-X2Qm2yAmzg0 (accessed 12 December 2021) (in Russian).

Yakovlev A. A., Babich N. V., Dragomirov K. G. How to protect the harvest from rodents? *Zashchita i karantin rastenii*, 2007, no. 9, pp. 9–10 (in Russian).

Yakovlev A. A., Babich N. V. Rodenticides. *Zashchita i karantin rastenii*, 2011, no. 10, pp. 42–44 (in Russian).

Aktar M. W., Sengupta D., Chowdhury A. Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2009, vol. 2, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>

Antoniou V., Zantopoulos N., Skartsis D., Tsoukali-Papadopoulou H. Pesticide poisoning of animals of wild fauna. *Veterinary and Human Toxicology*, 1996, vol. 38, iss. 3, pp. 212–213.

Antoniou V., Zantopoulos N., Samouris G., Ioannidou M. Impacts of toxic substances in animals of wild fauna in Northern Greece. In: *Proceedings of the 2nd Environmental Conference of Macedonia*. Thessaloniki, 2005, pp. 1–6.

Berny Ph., Velardo J., Pulce C., D'amico A., Kammerer M., Lasseur R. Prevalence of anticoagulant rodenticide poisoning in humans and animals in France and substances involved. *Clinical Toxicology*, 2010, vol. 48, iss. 9, pp. 935–941. <https://doi.org/10.3109/15563650.2010.533678>

Caravati E. M., Erdman A. R., Scharman E. J., Woolf A. D., Chyka P. A., Cobaugh D. G., Wax P. M., Manoguerra A. S., Christianson G., Nelson L. S., Olson K. R., Booze L. L., Troutman W. G. Long-acting anticoagulant rodenticide poisoning: An evidence-based consensus guide-

line for out-of-hospital management. *Clinical Toxicology*, 2007, vol. 45, iss. 1, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1080/15563650600795487>

Chong Y.-K., Mak T. W.-L. Superwarfarin (long-acting anticoagulant rodenticides) poisoning: from pathophysiology to laboratory-guided clinical management. *Clinical Biochemical Review*, 2019, vol. 40, no. 4, pp. 175–185. <http://doi.org/10.33176/AACB-19-00029>

Devgun J. M., Rasin A., Kim T., Mycyk M. B., Bryant S. M., Wahl M. S., Lauriers C. D., Navon L., Moritz E. D., Thompson T. M., Swoboda H. D., Lu J., Aks S. E. An outbreak of severe coagulopathy from synthetic cannabinoids tainted with long-acting anticoagulant rodenticides. *Clinical Toxicology*, 2020, vol. 58, iss. 8, pp. 821–828. <https://doi.org/10.1080/15563650.2019.1690149>

Edwards P. J., Fletcher M. R., Berny P. Review of the factors influencing the decline of the European brown hare, *Lepus europaeus* (Pallas, 1778) and the use of wildlife incident data to evaluate the significance of paraquat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, vol. 79, iss. 2–3, pp. 95–103. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00153-X)

Elmeros M., Lassen P., Bossi R., Topping C. J. Exposure of stone marten (*Martes foina*) and polecat (*Mustela putorius*) to anticoagulant rodenticides: Effects of regulatory restrictions of rodenticide use. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 612, pp. 1358–1364. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.0340048-969>

Erofeeva E. V., Surkova Ju. E., Shubkina A. V. Rodenticides and wildlife extermination. *Biology Bulletin Reviews*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 178–188. <https://doi.org/10.1134/S2079086422020025>

Erickson W., Urban D. *Potential Risks of Nine Rodenticides to Birds and Nontarget Mammals: A Comparative Approach*. Washington, United States Environmental Protection Agency, 2004. 225 p.

Feinstein D. L., Akpa B. S., Ayee M. A., Boullerne A. I., Braun D., Brodsky S. V., Gidalevitz D., Hauck Z., Kalinin S., Kowal K., Kuzmenko I., Lis K., Marangoni N., Martynowycz M. W., Rubinstein I., Breemen R. van, Ware K., Weinberg G. The emerging threat of superwarfarins: History, detection, mechanisms, and countermeasures. *Annals of New-York Academy of Sciences*, 2017, vol. 1374, iss. 1, pp. 111–122. <https://doi.org/10.1111/nyas.13085>

Guitart R., Sachana M., Caloni F., Croubels S., Vandenbroucke V., Berny Ph. Animal poisoning in Europe. Part 3: Wildlife. *Veterinary Journal*, 2009, vol. 183, iss. 3, pp. 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2009.03.033>

Hathurusinghe M. H., Ibrahim S. A. Survival and growth of yogurt culture in MRS broth in the presence of selected rodenticides. *Milchwissenschaft*, 2012, vol. 67, no. 1, pp. 51–54.

Hathurusinghe M. H., Ibrahim S. A. Influence of brodifacoum and bromadiolone on growth of yoghurt cultures in milk. *International Journal of Dairy Technology*, 2016, vol. 69, iss. 1, pp. 51–56. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12205>

Hinds L. A., Henry Y. S., Van De Weyer N., Robinson F., Ruscoe W. A., Brown P. R. Acute oral toxicity of zinc phosphide: an assessment for wild house mice (*Mus musculus*). *Integrative Zoology*, 2023, vol. 18, iss. 1, pp. 63–75. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12666>

Joermann G. A review of secondary-poisoning studies with rodenticides. *OEPP EPPA Bulletin*, 1998, vol. 28, iss. 1-2, pp. 157–176. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1998.tb00717.x>

Lamarque F., Artois M., Berny P., Hatier C. Le réseau SAGIR, réseau national de suivi sanitaire de la faune sauvage Française. *Bulletin Mensuel Office National de la Chasse*, 1999, vol. 246, pp. 18–26.

Liu Q., Zhou L., Zheng N., Zhuo Luo, Liu Y., Liu L. Poisoning deaths in China: Type and prevalence detected at the Tongji Forensic Medical Center in Hubei. *Forensic Science International*, 2009, vol. 193, pp. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.09.013>

López-Perea J. J., Camarero P. R., Molina-Lopez R. A., Parpal L., Obon E., Sola J., Mateo R. Interspecific and geographical differences in anticoagulant rodenticide residues of predatory wildlife from the Mediterranean region of Spain. *Science of The Total Environment*, 2015, vol. 511, pp. 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.042>

López-Perea J. J., Camarero P. R., Sanchez-Barbudo I. S., Mateo R. Urbanization and cattle density are determinants in the exposure to anticoagulant rodenticides of non-target wildlife. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 244, pp. 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.101>

Masuda B. M., Fisher P., Beaven B. Residue profiles of brodifacoum in coastal marine species following an island rodent eradication. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, vol. 113, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.11.013>

Morgan A. M. Teratogenic effect of the coumarinic anticoagulant rodenticide, racumin in white rats. *Egyptian Society of Clinical Toxicology Journal*, 2006, vol. 34, pp. 5–4.

Morriss G., Nugent G., Fisher P. Exposure of feral pigs to brodifacoum following baiting for rodent control. *DOC Internal Science Series 194*. Wellington, Department of Conservation, 2005. 16 p.

Poché R. M., Poché D., Franckowiak G., Somers D. J., Briley L. N., Tseveenjav B., Polyakova L. Field evaluation of low-dose warfarin baits to control wild pigs (*Sus scrofa*) in North Texas. *PLoS ONE*, 2018, vol. 13, iss. 11, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206070>

Poessel S. A., Breck S. W., Fox K. A., Gese E. M. Anticoagulant rodenticide exposure and toxicosis in coyotes (*Canis latrans*) in the Denver metropolitan area. *Journal of Wildlife Diseases*, 2015, vol. 51, iss. 1, pp. 265–268. <https://doi.org/10.7589/2014-04-116>

Rattner B. A., Horak K. E., Warner S. E., Day D. D., Meteyer C. U., Volker S. E., Eisemann J. D., Johnston J. J. Acute toxicity, histopathology, and coagulopathy in American kestrels (*Falco sparverius*) following administration of the rodenticide diphacinone. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, vol. 30, iss. 5, pp. 1213–1222. <https://doi.org/10.1002/etc.490>

Riley S. P. D., Bromley C., Poppenga R. H., Uzal F. A., Whited L., Sauvajot R. M. Anticoagulant exposure and notoedric mange in bobcats and mountain lions in urban Southern California. *Journal of Wildlife Management*, 2007, vol. 71, pp. 1874–1884.

Risk Mitigation Decision for Ten Rodenticides. Washington, United States Environmental Protection Agency, 2008. 60 p. Available at: <https://glm.com/wp-content/uploads/2019/03/EPA-HQ-OPP-2006-0955-0764.pdf> (accessed 30 May 2021).

Ruiz-Suárez N., Rial C., Boada L. D., Henríquez-Hernández L. A., Valeron P. F., Camacho M., Zumbado M., González M. A., Lara P., Luzardo O. P. Are pet dogs good sentinels of human exposure to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons, organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls? *Journal of Applied Animal Research*, 2015, vol. 44, iss. 1, pp. 135–145. <https://doi.org/10.1080/09712119.2015.1021808>

Serieys L. E. K., Foley J., Owens S., Woods L., Boydston E. E., Lyren L. M., Poppenga R. H., Clifford D. L., Stephenson N., Rudd J., Riley S. P. D. Serum chemistry, hematologic, and post-mortem findings in free-ranging bobcats (*Lynx rufus*) with notoedric mange. *Journal of Parasitology*, 2013, vol. 99, iss. 6, pp. 989–996. <https://doi.org/10.1645/12-175.1>

Staples L., Smith M., Pontin K. Use of zinc phosphide to overcome rodent infestations. In: *Proceedings of the Australian Postharvest Technical Conference*. Canberra, CSIRO, 2003, pp. 110–115. <https://doi.org/10.13140/2.1.1190.3364>

Thomson L. A., Darwish W. S. Environmental chemical contaminants in food: Review of a global problem. *Journal of Toxicology*, 2019, vol. 2019, article number 2345283. <https://doi.org/10.1155/2019/2345283>

Uzal F. A., Houston R. S., Riley S. P. D., Poppenga R., Odani J., Boyce W. Notoedric mange in two free-ranging mountain lions (*Puma concolor*). *Journal of Wildlife Diseases*, 2007, vol. 43, iss. 2, pp. 274–278. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-43.2.274>

Wade A. Opinion: Apocalypse when? A future without rodenticides. *Professional Pest Controller*, 2021, iss. 103. <https://ppconline.org/PPC-News/apocalypse-when-a-future-without-rodenticides/271653>.

Wang M., Yang Y., Hou Y., Ma W., Jia R., Chen J. Effects of bromadiolone poisoning on the central nervous system. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 2017, vol. 13, pp. 2297–2300. <https://doi.org/10.2147/NDT.S142375>

Yadav I. C., Devi N. L., Syed J. H., Cheng Z., Li J., Zhang G., Jones K. C. Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: A comprehensive review of India. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 511, pp. 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.041>

Zuo W., Zhang X., Chang J., Ma W., Wei J. Bromadiolone poisoning leading to subarachnoid haemorrhage: A case report and review of the literature. *Journal of Clinical Report and Therapeutics*, 2019, vol. 44, iss. 6, pp. 958–962. <https://doi.org/10.1111/jcpt.13005>

Original Article

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-179-195>

Assessment of lands for cassava (*Manihot esculenta* Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida) cultivation using the AHP-GIS-Remote Sensing technique

Thi Thu Nga Nguyen , Thi Hanh Tong

Le Quy Don Technical University
236 Hoang Quoc Viet St., Hanoi 100000, Vietnam

Received: 2 February 2023 / revised: 29 March 2023 / accepted: 3 April 2022 / published: 21 June 2023

Abstract. The objective of present study was to assess the physical land capacity for an annual cassava crop, aiming to understanding spatial parameters and environment parameters required for locating potential areas of cassava cultivation. According to FAO guidelines, a spatial model was built to assess the potential land for facilitating sustainable cassava production through the integration of the AHP-GIS-Remote Sensing method. The present study showed that the land analysis indicated that the high potential land was 6101.1 ha (8% total area), concentrated in the middle and eastern part of the study area. These areas face limitations for the cultivation of cassava due to climatic conditions of the minimum temperature of the coldest month ($P_3 < 14^\circ\text{C}$), average annual sunny hours ($P_5 < 1500$ h) and potential factors for providing quality products (LULC, annual precipitation and soil pH are the most significant factors). The areas of cassava crop cultivation were simultaneously reduced. Still, the reason for that has been not dependent on the physical environmental conditions, the limiting factors from the domestic market, backward processing technology, and the purchase price of raw cassava may possibly play a prominent role in the local farms.

Keywords: AHP, cassava, crop, soil, GIS, FAO

Funding. This work is funded through Vietnam-Russia Tropical Central (E1.4 Project) during the survey in 2021.

For citation: Nguyen T. T. N., Tong T. H. Assessment of lands for cassava (*Manihot esculenta* Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida) cultivation using the AHP-GIS-Remote Sensing technique. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 179–195. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-179-195>

 **Corresponding author.** Department of Geodesy and Cartography, Institute of Techniques for Special Engineering, Le Quy Don Technical University, Vietnam.

ORCID and e-mail addresses: Thi Thu Nga Nguyen: <https://orcid.org/0000-0001-7021-9698>, Thungatdbd@lqdtu.edu.vn; Thi Hanh Tong: <https://orcid.org/0000-0002-6639-0318>, Tonghanh@lqdtu.edu.vn.

INTRODUCTION

The long-term health of a community's food system is an essential indicator of its vitality and sustainability. A logical and appropriate way to revitalize a community is by developing a local food economy (Feenstra, 1997; Anderson, Rivera-Ferre, 2021). Land potential evaluation played an essential role in utility land use, especially for potential crops selected in categories that adapt to climate change. Vietnam is a developing country that could create food insecurity. Cassava is an excellent alternative to mitigate this dependency. This crop plays an important role in rural support the production of food in a sustainable manner (Noerwijati, Budiono, 2015; Campo et al., 2011). Even though cassava production is mostly geared toward the food sector, there are only a few avenues for its commercialization. In some tropical countries, land suitability studies may be used to determine the prospective cassava area, which can then be used to guide long-term cassava production. The integration of multi-criteria assessment and pair-wise comparison matrix revealed that cassava production should be encouraged among Southern Adama State farmers to utilize the land for improved cassava output effectively (Zemba et al., 2017). Likewise, one of the most burning issues should be considered to improve cassava cultivation management to increase production on land resource sustainability. It was advised by Akinwumiju et al. (2020) that the best site for cassava production in Nigeria was determined mostly by the soil characteristics, sunlight hours, and amount of rainfall. Cassava played an important role in the development of agriculture, because of its economic importance (Vurro et al., 2010). The production of cassava has been limited by high diversity of the crop's inherent benefits, poor on-farm management (e.g., lack over seeding and planting, poor soil health, and weeds), all of which have had harmed output and the occurrence of mosaic disease in some cultivars (Akano et al., 2002). The knowledge on the social-economic-environmental affecting cassava production is still insufficient, especially compared to other cereals crops (Burns et al., 2012). Several studies reported that the cassava plant played a crucial role in food security and cannot be over-emphasized (Kinshella, 2015; Purnamasari et al., 2019). Its food security within the tropical regions that cassava can combat hunger and address food security issues (Sharma et al., 2017; Adiele et al., 2021). The suitable land for cassava crop was the object of many researches, of which the environmental factors such as climate, soil type, topographic parameters played an influential role in cassava growth, as well as a knowledge of the biophysical constraints that exist in the local environment (Zemba et al., 2017; Akinwumiju et al., 2020; Purnamasari et al., 2019). Ba Thuoc district faced annual agricultural production supply deficiency, an intractable problem in the past decades. The volatility of the market trends affecting crops. Previously, rice gave priority in Ba Thuoc; likewise today, cassava has been given more attention due to its ability to adapt to the ecological condition. However, the variability in yield across the trial locations indicates the influence of some social-economic-environmental factors. Poor knowledge and unreliable data for agricultural planning cause a decrease of production value in the country's market (D'haeze et al., 2005). Likewise, today finding potential fuel resources come from cassava, the factors observed in literature, namely availability of resources, social awareness, capability production, economy, technology, education, and policy (Okudoh et al., 2014; Rewlay-ngoen et al., 2021). These results showed that

organic fuel resources are determined by the biggest weight policy factor (Zhu et al., 2015). It means that people who live around organic fuel resources must be supported first by the government policy to transform production into small-scale industry. Cassava is a plant that originates in the tropics and is considered a drought-tolerant plant, but in the growth and development process, cassava also requires a certain amount of water, especially in the sprouting period and seedlings (Santisopasri et al., 2001; El-Sharkawy, 2007). Purnamasari et al. (2019) suggested that GIS technology can be considered a robust tool suitable for discovering agricultural areas. The use of AHP-GIS methodologies provides the ability to integrate linguistic information about annual cropland in the analysis. The datasets on cropland can be used to estimate the size of cassava plantations in other locations. To evaluate land appropriateness, which features might restrict the amount of land accessible for cassava production, the research set out to determine land suitability. Because land features cannot be improved easily, physical land productivity is regarded the most significant factor in obtaining the greatest possible value from the land. Geographic Information System (GIS) technology provides a dynamic approach for land use assessment and geo-environmental analysis based on geographic information (Pereira, Duckstein, 1993). Because multiple map layers are overlaid on over of one other, it enables the user to combine databases created from various sources and evaluate them properly in a spatiotemporal domain. The combination of AHP and GIS technology to model prospective cassava crop production areas in Ba Thuoc district of Thanh Hoa province utilizing FAO standards for land evaluation was carried out in this study. It was also utilized as a tool to choose the number of factors to be included in the modeling process. An instruction for cassava production land evaluation of ISO 8409: 2012 Vietnam Ministry of Science and Technology (2021) was also employed. Considering this existing work, the main objectives of this study were: (1) physical environmental evaluation was being used to map the potential area for cassava crop production, and (2) analyze the spatial variability of this crop in study area and zoning the potential land for cassava crop. In addition, all the data was collected and processed in ArcGIS to visualize geographically. Furthermore, an integrated use of GIS-based AHP can support extend vast vegetation land, which is analyzed from the land-use map to assess the site of cassava crops.

MATERIAL AND METHODS

Data collection. The collection database of surveys such as: questionnaires, semi-structured interviews and reports. The locations of cassava fields also were recorded by global positioning system (GPS). The cassava planted in the highly suitable areas of district also were determined (Fig. 1). The data were used in this study include climatic parameters (P_1 , P_2 , ..., P_5) from <https://www.worldclim.org> in format csv, which were processed by the IDW interpolation method in GIS. A collection of 30×30 m digital elevation models (DEMs) from <http://srtm.csi.cgiar.org/> were used to study of terrain and slope (P_7). Soil factors: Soil type (P_6), soil texture (P_8), soil layer thickness (P_9) and proportion of stones mixed in the soil obtained from The Soil map of Vietnam's Ministry of Natural Resources and Environment.

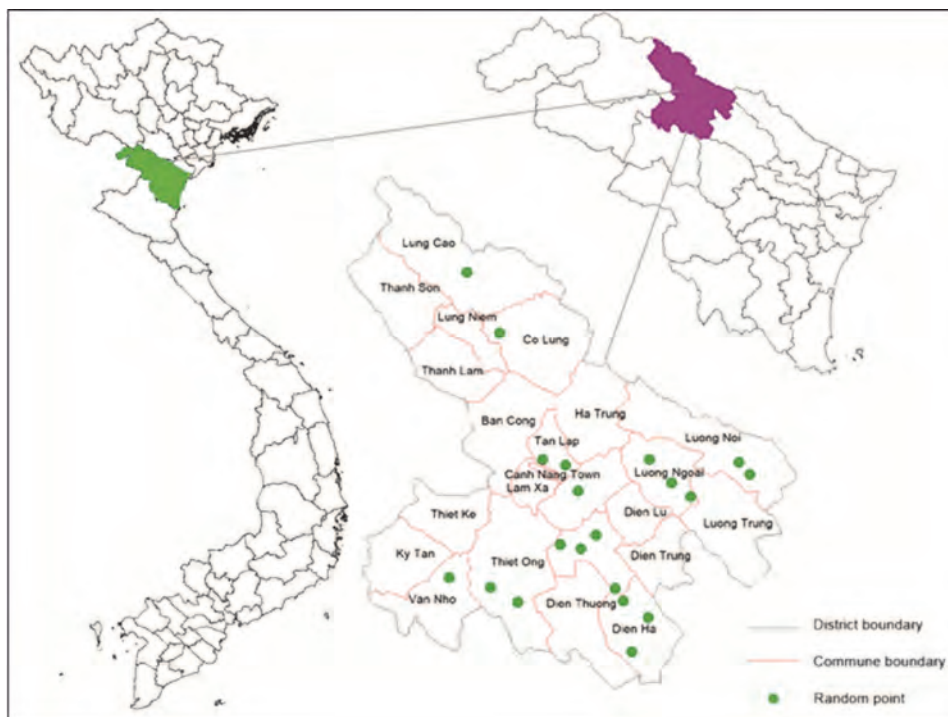


Fig. 1. Map location of study area (The random point is the site of cassava fields, and it utilized in the validation of the model)

The information used in evaluating environmental efficiencies, such as soil pH (P_{10}), N (P_{11} , %N in soil) were gathered through a survey.

Regarding socio-economic variables, it is necessary to consider the impact of main roads on the extent of the cassava stock market as a parameter effect. In addition to facilitating access to transportation infrastructure, distances between fields and roads (P_{12}) also assist farmers and agricultural operations to marketing. To evaluate suitability levels for cassava production, physical variables connected with water supply (P_{13}), such as the distance from water bodies, streams, rivers, and watering zones, were considered. The land use cover map (P_{14}) was collected from the Ministry of Science and Technology Vietnam, 2015, to extract the agricultural land types (Table 1).

Collection of soil sampling and analysis. Soil samples were taken from agricultural regions in Ba Thuoc district between the years 2020 and 2021, and the results were analyzed. The research field was divided into grid squares of 11 km by 11 km. A total of 300 soil samples were collected from the surface soil (0–20 cm) of each grid crossroad point in cultivable fields, ranging from 0 to 20 cm in depth. The sampling was carried out after the harvesting season in the fall and before the following cropping season to reduce the influence of cultivation and agricultural operations carried out during the pre-

ASSESSMENT OF LANDS FOR CASSAVA

vious growing season, such as irrigation, fertilization, traffic and the soil. It was determined that certain sample sites would be captured on a portable global positioning system device (Garmin).

Table 1. Data were used in the analysis

Data	Unit	Description	Source	Data
P ₁ : Annual mean temperature	Celsius degree	30 m resolution	https://www.worldclim.org	Raster
P ₂ : Max Temperature of Warmest Month	Celsius degree	30 m resolution	https://www.worldclim.org	Raster
P ₃ : Min Temperature of Coldest Month	Celsius degree	30 m resolution	https://www.worldclim.org	Raster
P ₄ : Annual precipitation	Millimeter	30 m resolution	https://www.worldclim.org	Raster
P ₅ : Average annual sunny hours	Hours	30 m resolution	https://www.worldclim.org	Raster
P ₆ : Soil type		Extracted from Soil map of scale 1:100.000. Survey (2021)	Vietnam General Department of Land Administration, 2010. Research team	Shape file
P ₇ : Slope	Degree	Extracted from DEM, 30 m resolution	http://srtm.csi.cgiar.org/	Raster
P ₈ : Soil texture		Extracted from Soil map of scale 1:100.000. Survey (2021)	Vietnam General Department of Land Administration, 2010. Research team	Shape file
P ₉ : Soil depth	Centimeter	Extracted from Soil map of scale 1:100.000. Survey (2021)	Vietnam General Department of Land Administration, 2010. Research team	Shape file
P ₁₀ : pH		Survey (2021)	Research team	Raster
P ₁₁ : Nitrogen (N)	%	Survey (2021)	Research team	Raster
P ₁₂ : Distance from roads	Meter	Extracted from traffic map of scale 1: 100.000	Vietnam Ministry of Science and Technology, 2010	Shape file
P ₁₃ : Distance from rivers	Meter	Extracted from traffic map of scale 1: 100.000	Vietnam Ministry of Science and Technology Vietnam, 2010	Shape file
P ₁₄ : Land use cover		Sentinel 2 (2020)	Google Earth Engine	Raster

Analytic hierarchy process (AHP). The decision-making problem can be a complex issue regarding the involvement of multiple objectives and parameters (Multi criteria Decision Analysis/MCDA). One of the tools used for the selection of suitable candidates or ordering priorities in the MCDA problem is the Analytical Hierarchy Process (AHP). The AHP method is the potential way of solving the problem of important unequal factors in nature by giving weight to the experts. Still, expert opinions remain uncertain, due to human behavioral bias or even because of experts' backgrounds. This technique was used to determine the most potential alternative for idea solution based on the weight of importance of each parameter in the relation with others (Saaty, 2008). A focus group discussion held among the farmers and committee members were completed. Information from interviews to determine factors influencing cassava crop land suitability. Furthermore, this work also aimed to weight these factors. Overall priorities can be made through synthesizing or pooling together the judgment made in the pairwise comparisons (Table 2, Fig. 2). Each factor is categorized into 4 levels (S1, S2, S3, N)

based on ecological requirement of cassava crop of Instruction for agricultural production land evaluation of Vietnamese Standard (ISO 8409: 2012 (Ministry of Science and Published technology, 2021)). The integration of AHP-GIS was used in this model. A consistency ratio is taken as the ratio of the consistency of the results. CR is calculated from the ratio between CI, which is derived from the comparison matrix and the random consistency index (RI). The RI is the consistency index of a randomly generated pairwise comparison matrix, simply obtained from the random inconsistency indices. If a consistency ratio of less than 0.10, the results are sufficiently accurate and there is no need for further evaluation. However, if the consistency ratio is greater than 0.10, the results may be arbitrary, and preferences must be reassessed (MacCormac, 1983; Saaty, 2008).

Table 2. Nine-point scale using in expert judgement

Scale	Degree of preference
9	Absolute importance
7	Very strongly importance or preferred
5	Strong importance or strongly preferred
3	Weak importance, moderately important or preferred
2, 4, 6, 8	The two judgements that are adjacent to each other have intermediate values
1	Equally important or preferred is favored over more important or recommended

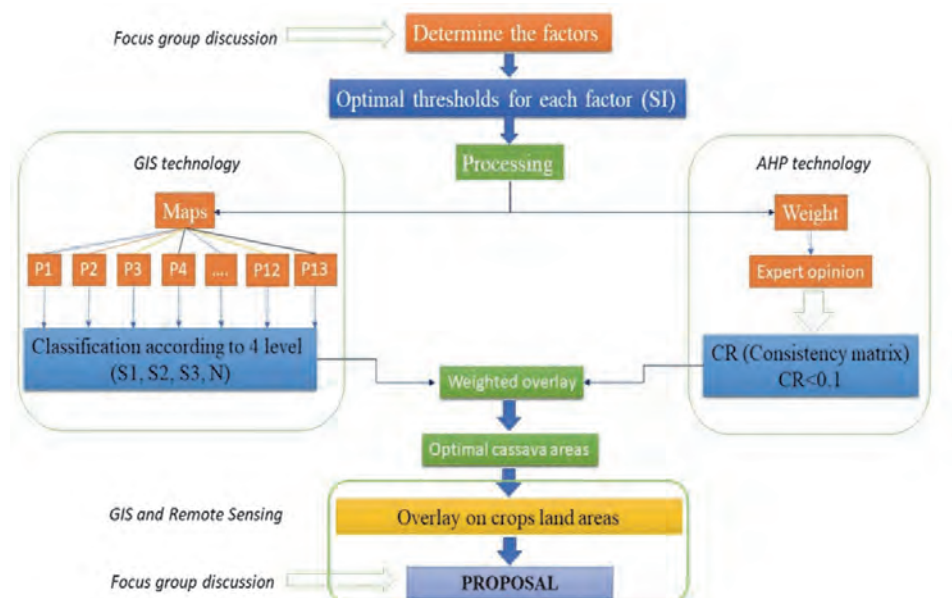


Fig. 2. The process to select optimal land for cassava production in Ba Thuoc district, Thanh Hoa province, Vietnam

Remote sensing technique. QGIS 3.12.1 software was used to capture the normalized difference vegetation index (NDVI). Rouse et al. (1974) discovered that NDVI is the most common indicator in the cultivation study. The NDVI has two main bands: the NIR and the Red Band. The land use cover and the map of yield monitoring were frequently utilized in agriculture. The NDVI was computed using the band combination for the red and NIR reflections using band 4 and band 8 from every accessible cloud-free Sentinel-2 scenes (2016–2020). Similarly, Purnamasari et al. (2019) revealed the places near significant water resources such as big rivers and water bodies, rice fields were found to be abundant, but cassava crops were found to be abundant on sloping terrain in areas distant from water resources. The normalized vegetation difference index (NVDI) has been developed to assess changes in the vegetation index because of satellite observations (NDVI). The Normalized Difference Vegetation Indicator (NDVI) is a vegetation index connected to various biophysical parameters and used to produce several agricultural indices. Regarding to crop area, the NDVI was calculated using temporal information from Sentinel-2 (Google Earth Engine, 2020), gathered near the end of the cassava growing season and just before harvest.

GIS technique. In the present work, GIS was used to map the potential land for cassava crop. The data of factors which were inputted to the model classified according to 4 levels. Weight of each factor was obtained by experts (Table 3). Integrated using the Boolean operations and the weighted linear combination to create component maps in raster form. ArcGIS 10.2 was used to map potential cassava cropland by overlaying raster component maps. Finally, a map of potential cassava cropland was created, which was divided into four classifications (SI1, SI2, SI3, N) in agreement with Equation (1) and the FAO's framework for land suitability (FAO, 1993). This technique makes use of a combination and manipulation of geographical data as well as decision-maker opinions in accordance with given decision rules, whereas the parametric method simply makes use of multiplication for the score of all elements.

$$SI = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot X_i) \quad (1)$$

Score of each factor (X_i) was obtained on each land mapping unit, importance of factor i are converted to factor weight (W_i), i ranges from 1 to n , n was the total number of factors in the model. The weighted linear combination of W_i and X_i , was calculated by Equation (1), give suitability index (SI) which was an evaluation for each land mapping unit. Land mapping unit is a unit of land which have the same characteristic.

Table 3. The weights of parameters in land analysis of cassava cultivation in Ba Thuoc district of Thanh Hoa province, Vietnam

Parameters	S1	S2	S3	N	Weight (W)
1	2	3	4	5	6
P ₁ : Annual Mean Temperature	> 22–25	> 20–22	> 25, > 18–20	< 18	0.038
P ₂ : Max Temperature of Warmest Month	> 30	> 27–30	> 24–27	< 24	0.038
P ₃ : Min Temperature of Coldest Month	> 17–20	> 14 – 17	> 20	< 14	0.038

Table 3. Continuation

1		2	3	4	5	6
P ₄ : Annual Precipitation		1500–1900	1100–1500	1900–2300	> 2300, <1100	0.089
P ₅ : Average annual sunny hours		> 2500	2000–2500	1500–2000	< 1500	0.036
Soil characteristics	P ₆ : Soil type	Ft, Fk, Fu, Fv, Fn, Ru, Rv, Fj, Fs	Fa, Fq, Fp, Fs, X, Pbe, Pbc, Py	Pf, Hk, Hu, Hj, Hs, Ha, Hq	0.204	0.204
	P ₇ : Slope	3–8	0–3, 8–15	15–25	0.051	0.051
	P ₈ : Soil texture	Clay	Sandy loam	Loam	0.068	0.068
	P ₉ : Soil depth	> 70	50 – 70	30–50	0.068	0.068
	P ₁₀ : pH	6.5–7.5	5.5–6.5	7.5–8.2	< 5.5 and > 8.2	0.086
P ₁₁ : Nitrogen		0.17	0.17–0.09	0.09–0.045	< 0.045	0.060
P ₁₂ : Distance from roads		< 1000	1000–2000	2000–3000	> 3000	0.035
P ₁₃ : Distance from rivers		< 500	500–1000	1000–1500	> 1500	0.048
P ₁₄ : Land use cover		Vegetation in fertile soils	Rice field; intercropping	Plantation forests land	Settlements, residents. Water bodies; Natural forest	0.179

RESULTS AND DISCUSSION

Spatial distribution of potential area

These highly potential (S1) areas concentrated in some characterized including annual mean temperature from 22–25°C, yearly precipitation from 1500–1900 mm, average annual sunny hours above 2500 hours: Slope degree from 3 to 8°, soil depth above 70cm, texture class clay (Table 3). Three parameters have the most suitable land area for a crop, such as P₂ (Max Temperature of Warmest Month), P₁ (Annual mean temperature) (Table 3). The land of low potential (N) located in the large areas with slope degree >30° also was classified due to the presence of settlements, water bodies, natural forest land, and residences that cannot replace with cassava fields. The area with climatic conditions ranges in minimum temperature of the coldest month (P₃ < 14°C), average annual sunny hours (P₅ < 1500 h), which were the most significant areas not potential for cassava. This result is similar to Akinwumiju et al. (2020), who showed that climatic conditions exert the most limiting effects on cassava production.

According to focus group interviews, literature reviews, and local people's knowledge, a limited number of physical environment characteristics were selected for the model. The assessment process was an application taking into cassava environmental requirements regarding local conditions based primarily on the physical element of soil, topography, climate and geographical condition. LULC, annual precipitation and soil pH are the most significant factors among these.

Based on the weighted overlay maps used to find appropriate cassava production sites, as shown in (Fig. 3), the land suitability maps may serve as a potential map for forecasting instrumentation that could assist measures to increase local food production in the Ba Thuoc district. Results indicated that the amount of land areas allocated to each category was as follows: highly potential land (S1: 6101.1 ha, 8%), moderately potential land (S2: 20826.40 ha, 27%), marginally potential land (S3: 32288.77 ha, 42%), and not

ASSESSMENT OF LANDS FOR CASSAVA

potential (N: 18305.75 ha, 24%) (Table 4, Fig. 4). Therefore, the study suggested the cassava area proposal for cultivation in the high potential area (S1). In contrast, diversification of marginally potential (S3) and not potential (N) areas to other idea solutions than cassava potentially adapted to the environmental requirements. In the model, several contents (Planted area, yield, production) were collected from the General Statistics Office of Vietnam from 2015 to 2019. These data revealed that the size of cassava cultivation decreased from 1470 ha to 918 ha (37.5%); Production of cassava decreased from 24402 to 15494 tons (36.5%) from 2015 to 2019; Yield of cassava increased 1.68% (Table 5).

This study produced information on the importance of each parameter useful for future studies on cassava crops of other regions, especially the approach that can provide a framework for another crop of this region. Therefore, to enhancing food security, the annual cassava production capacity can be increased by extending the cultivation to the other areas reasonably favorable for the root crop. Edet et al. (2015) found that the plant growth parameters of cassava at 4–6 months after planting all contributed to enlarge the fresh root biomass at 12 months after growing harvest. Furthermore, Amarullah et al. (2017) reported that growth traits' most excellent vegetative phase began to show a significant positive contribution to the tuber weight.

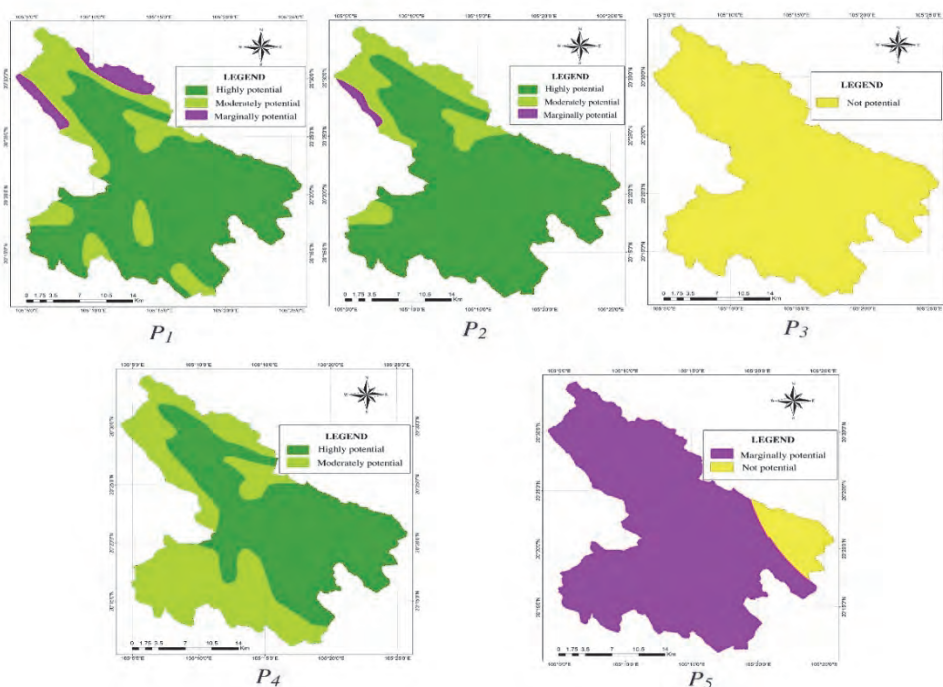


Fig. 3. Reclassification of parameters of model ($P_1 - P_{14}$): P_1 – Annual mean temperature, P_2 – Max Temperature of Warmest Month, P_3 – Min Temperature of Coldest Month, P_4 – Annual precipitation, P_5 – Average annual sunny hours

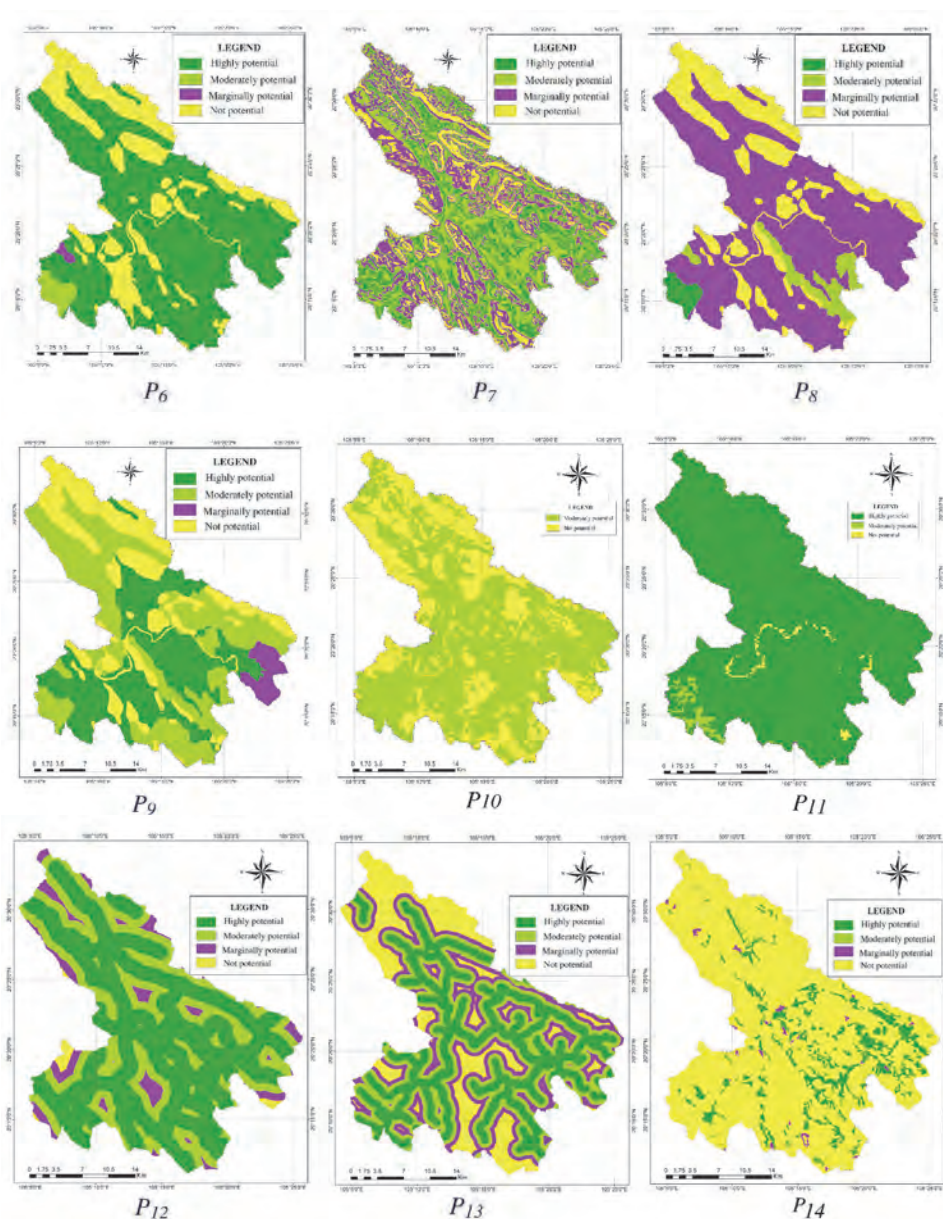


Fig. 3. Continued. P₆ – Soil type, P₇ – Slope, P₈ – Soil texture, P₉ – Soil depth, P₁₀ – Soil pH, P₁₁ – Nitrogen, P₁₂ – Distance from roads, P₁₃ – Distance from rivers, P₁₄ – Land use cover

ASSESSMENT OF LANDS FOR CASSAVA

Table 4. Potential area for cassava production in Ba Thuoc district, Thanh Hoa province, Vietnam

Potential class	Area, ha	Percentage area, %
Highly potential (S1)	6101.10	8
Moderately potential (S2)	20826.40	27
Marginally potential (S3)	32288.77	42
Not potential (N)	18305.75	24
Sum	77522.02	100

Our result analyzed the contributions of yield and cassava production in Ba Thuoc district, Vietnam. During this period, the yield increased while the planted area and production decreased. Although, Boansi (2017) used the short and long-run models, cassava yield was affected by standard climate variables and within-season rainfall variability. But our research results showed that the areas of cassava crop cultivation simultaneously reduced, and the reason for that has been not dependent on the physical characteristic environmental conditions, which have been very potential factors for providing quality products. Especially the potential land was illustrated by the map result with a larger area (6101.1 ha) than present area cassava planting (918 ha). The status of cassava plants was cultivated fragment. The big farms never planned to be established yet. Thus, the limiting factors from the domestic market, backward processing technology, and the purchase price of raw cassava will play a prominent role in the local farms.

The agricultural land potential was affected by asymmetries caused by climatic and socioeconomic systems, which may worsen present productivity (Fischer et al., 2005). Therefore, restoring bare land, reforestation, soil water conservation strategies, and policies for developmental agricultural output must be encouraged. In recent years, the in-

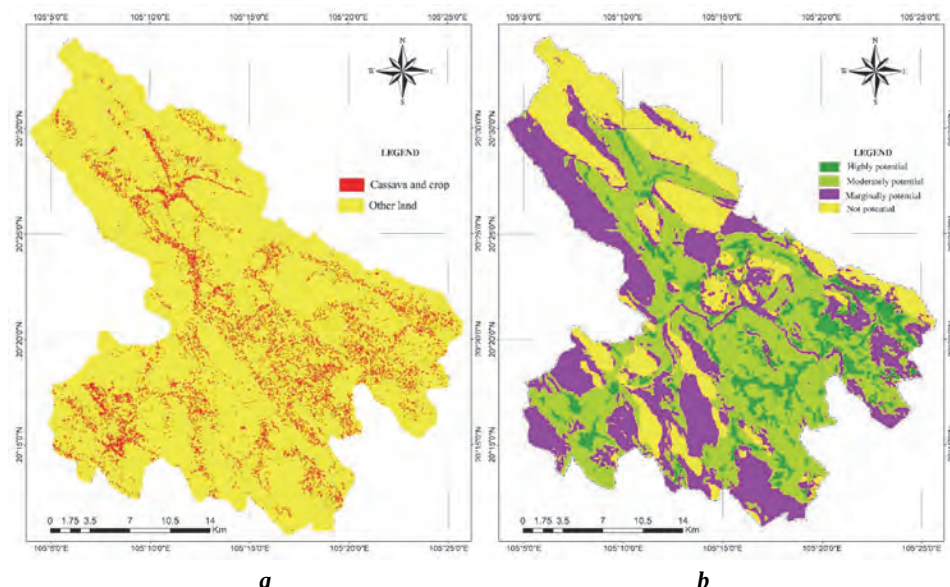


Fig. 4. Actual cassava and crop cultivation area, 2020 (a) and potential cassava cultivation area (b)

creasing urbanization rate, and the need for land usage of different projects have caused a decline in the quantity of agricultural land (Bravo, 2017). In the meantime, our results showed the potential area for cassava production is many times larger than the actual area in the study area. In addition, a suitable land category for agriculture confirmed by farmers has a greater probability, especially when agricultural land is challenged by climate change and unplanned human growth (Fischer et al., 2005). Hence, national, and regional policies on land management techniques influence agricultural output, both directly and indirectly.

Table 5. Status of cassava cultivation (General Statistics Office of Vietnam, 2019)

Category	Explication	Unit	2015	2016	2017	2018	2019
Planted area	When the plant begins its growth process for each cropping season, the annual planted area is recorded. If crops are replanted several times in the same place owing to being dead, the area is also recorded only once in that location	Ha	1470	1544	995	915	918
Yield	The primary product per one area unit of a certain agricultural crop or set of agricultural crops collected in a production season or in a year on average planted area is referred to as crop yield	Quintal / ha	166	166.40	170.90	167.46	168.79
Production	Cassava production is measured in the form of fresh bulbs	Ton	24402	25693	17005	15323	15495

Methodological Challenge

Some of the criteria evaluated for mapping the PI land include continuous numerical data (e.g., soil depth, rainfall, temperature, etc.), leaving this difficult to accurately relate such data to the high potential area (Zhang et al., 2015). All these variables have distinct magnitudes, making them incomparable for usage. Furthermore, determining the appropriate weight of all criteria is difficult due to the apparent uneven effect on cassava growth. Those data derived from physical environmental data (soil, climate), which may result in some issues and barriers in the result obtained because micro-scale analyses are required to address the significant ecological variability and distinguish between the influences of anthropogenic activities (Papastergiadou et al., 2010; Lamsal et al., 2019). Another cause of current problems is a disparity between the spatial-temporal resolution of satellite images and the socioeconomic-ecological aspects. Due to their spatial resolution, current soil maps and climate data cannot reveal spatial variation at fine resolution. Hence, a fine scale is required to analyze stream stability, accumulation, and soil degradation that occurs in the cassava planting area. As a result, fine - scale spatial resolution remote sensing products and field research are suggested for upcoming investigations.

Field-level crop monitoring employed Sentinel-2 MSI vegetation index (VI) datasets and NDVI data. Satellite-based normalized differential vegetation index fluctuations were assessed. (NDVI). The NDVI generates crop indices and is connected with numerous biophysical parameters. Sentinel 1A and 1B satellites and Sentinel 2A and 2B satellites provided data. ESA's Scientific Data Hub provided all orbital data: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

Semi-structured interviews and field data were collected during cropping seasons using Sentinel-2 MSI taken at the end of the growing period and before harvest. NDVI describes land surface vegetation, water, and natural surfaces... Given irregular field patterns and small field sizes, different management approaches, extremely heterogeneous growing environments, and other mapping issues associated with smallholder farming systems, crop type mapping in study area smallholder settings are hard. During the growing season, frequent cloud cover makes crop-type mapping, particularly intercropping, difficult.

Thus, freely available European Copernicus Program satellite data, notably S2A/B, enable considerable breakthroughs in mapping and monitoring crop kinds in smallholder farming systems of the study areas. This study added cassava and intercropping combinations to crop type mapping. Our crop mapping approach had an 82% ROC curve for complex smallholder cropping systems. (Field data were collected during the cropping seasons and used to test the accurate ratio of the NDVI map). This is essential to understanding Sentinel-2 data's potential and limitations for monitoring smallholder agricultural systems.

However, our crop maps are good enough for informed land-use change, broad-scale early warning systems, and regional crop production monitoring. In smallholder systems with high intercropping, similar methodologies could be used due to similar climatic circumstances, satellite data frequency, cloud cover, management, and agricultural practices.

Validation

According to GPS coordinates for high-yielding cassava fields recorded in Survey 2021, most cassava planting sites are in the central and eastern sections of the country. This ground reference information is used to validate the land potential model using ROC Analysis (www.jrocf.it.org) (Eng, 2014). The results' validation demonstrates this study results application of the model through in-situ observations. Using Receiver Operating Characteristic (ROC) curve analysis, the results were validated by using site selected from the survey. The results showed an area under the ROC curve value of 82%, indicating that the AHP method accurately predicts and models potential land in the study area and that the method is appropriate for assessing and modeling potential land in the study area. Significant knowledge of the impact of optimal cassava area on sustainable land use management and development in the district is given by this analysis (Fig. 5).

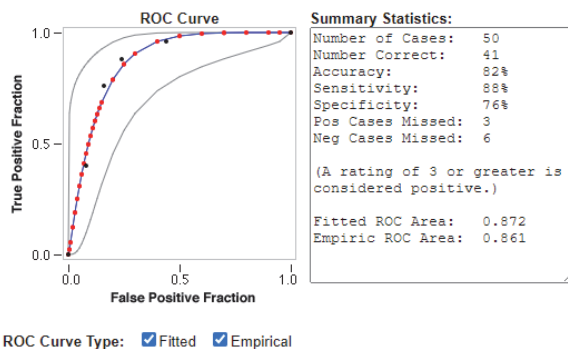


Fig. 5. Receiver operating characteristic (ROC) curve (Key for the ROC Plot: RED symbols and BLUE line: Fitted ROC curve; GRAY lines: 95% confidence interval of the fitted ROC curve; BLACK symbols ± GREEN line: Points making up the empirical ROC curve)

CONCLUSIONS

In this study, the primary purpose of the land evaluation was to predict the potential or limitations of land for cassava production. The study revealed an assessment model to determine the land suitability for planting cassava. Cassava crop is not an indigenous product, Vietnam has been and continues to be the world's second-largest exporter of this product. Our results suggest that the potential land area for cassava production is still quite huge, eight times larger than the current cassava area. The results also highlighted that these areas face limitations for the cultivation of cassava due to climatic conditions of the minimum temperature of the coldest month ($P_3 < 14^{\circ}\text{C}$), average annual sunny hours ($P_5 < 1500 \text{ h}$); Land use, land cover, annual precipitation and soil pH are the most significant factors. The high potential area was 8% concentrated in the study area's middle and eastern part. Although, the research showed the areas of cassava crop cultivation simultaneously reduced, the reason for that has not been dependent on the physical environmental conditions, which have been very potential factors for providing quality products. Product prices, farmer psychology, and agricultural product development policies are just a few of the market factors that must be considered.

Acknowledgments

The project team thanks the farmers who contributed by offering access to this work. We also are grateful to administration of Ba Thuoc district – Thanh Hoa province. Special thanks to local people at Canh Nang Town, Dien Ha commune who supported for our survey.

REFERENCES

- Adiele J. G. *Growing Out of Hunger: Towards an Improved Understanding of the Water and Nutrient Limited Yield of Cassava*. Doctoral Dissertation. Wageningen, Wageningen University, 2020. 150 p.
- Adiele J. G., Schut A. G. T., van den Beuken R. O. M., Ezui K. S., Pypers P., Ano A. O., Giller K. E. A recalibrated and tested LINTUL-Cassava simulation model provides insight into the high yield potential of cassava under rainfed conditions. *European Journal of Agronomy*, 2021, vol. 124, pp. 126–242. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126242>
- Akinwumiju A. S., Adelodun A. A., Orimoogunje O. I. Agro-Climato-Edaphic zonation of Nigeria for a cassava cultivar using GIS-Based Analysis of Data from 1961 to 2017. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, article number 1259. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58280-4>
- Akano A. O., Dixon A. G. O., Mba C., Barrera E., Fregene M. Genetic mapping of a dominant gene conferring resistance to cassava mosaic disease. *Theoretical and Applied Genetics*, 2002, vol. 105, iss. 4, pp. 521–525. <https://doi.org/10.1007/s00122-002-0891-7>
- Amarullah A., Indradewa D., Yudono P., Sunarminto B. H. Correlation of growth parameters with yield of two cassava varieties. *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)*, 2017, vol. 1, no. 3, pp. 100–104. <https://doi.org/10.22146/ipas.10706>
- Anderson M. D., Rivera-Ferre M. Food system narratives to end hunger: Extractive versus regenerative. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, vol. 49, pp. 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.12.002>
- Boansi D. Effect of climatic and non-climatic factors on cassava yields in Togo: Agricultural policy implications. *Climate*, 2017, vol. 5, iss. 2, article number 28. <https://doi.org/10.3390/cli5020028>

Bravo M. R. Urbanization in the Philippines and Its Influence on Agriculture. In: M. Yokohari, A. Murakami, Y. Hara, K. Tsuchiya, eds. *Sustainable Landscape Planning in Selected Urban Regions*. Tokyo, Springer, 2017, pp. 97–110. https://doi.org/10.1007/978-4-431-56445-4_9

Burns A. E., Gleadow R. M., Zacarias A. M., Cuambe C. E., Miller R. E., Cavagnaro T. R. Variations in the chemical composition of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) leaves and roots as affected by genotypic and environmental variation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, vol. 60, iss. 19, pp. 4946–4956. <https://doi.org/10.1021/jf2047288>

Campo B. V. M., Hyman G., Bellotti A. Threats to cassava production: Known and potential geographic distribution of four key biotic constraints. *Food Security*, 2011, vol. 3, iss. 3, pp. 329–345. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0141-4>

D'haeze D., Deckers J., Raes D., Phong T. A., Loi H. V. Environmental and socio-economic impacts of institutional reforms on the agricultural sector of Vietnam: Land suitability assessment for Robusta coffee in the Dak Gan region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, vol. 105, iss. 1-2, pp. 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.05.009>

Edet M. A., Tijani-Eniola H., Lagoke S. T. O., Tarawali G. Relationship of cassava growth parameters with yield, yield related components and harvest time in Ibadan, Southwestern Nigeria. *Journal of Natural Sciences Research*, 2015, vol. 5, iss. 9, pp. 87–92.

Eng J. *ROC Analysis: Web-Based Calculator for ROC Curves*. Baltimore, Johns Hopkins University, 2014. Available at: <http://www.jrocfits.org> (accessed 10 January 2023).

El-Sharkawy M. A. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: Implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2007, vol. 19, iss. 4, pp. 257–286. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400003>

Feenstra G. W. Local food systems and sustainable communities. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1997, vol. 12, iss. 1, pp. 28–36. <https://doi.org/10.1017/s0889189300007165>

Fischer G., Shah M. N., Tubiello F., Van Velhuizen H. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: An integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, vol. 360, iss. 1463, pp. 2067–2083. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1744>

FAO Guidelines for Land-Use Planning. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1993.

General Statistics Office of Vietnam. Statistical Yearbook of Thanh Hoa Province. Statistical Publishing House, Vietnam, 2019 (in Vietnamese).

Ministry of Science and Published technology. ISO (TCVN) 8409:2012 by the Institute of Planning and Design of Agriculture – Ministry of Agriculture and Rural Development Editor. Directorate for Standards, Metrology and Quality appraisal, Ministry of Agriculture and Rural Development proposal, 2021.

Kinshella M. L. W. Consuming hunger: Experiences of cassava and development in a Coastal Tanzanian Village. *Food, Culture & Society*, 2015, vol. 17, iss. 3, pp. 377–393. <https://doi.org/10.2752/175174414X13948130848025>

Lamsal P., Atreya K., Ghosh M. K., Pant K. P. Effects of population, land cover change, and climatic variability on wetland resource degradation in a Ramsar listed Ghodaghodi Lake Complex, Nepal. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, iss. 7, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7514-0>

MacCormac E. R. Review of: 'Decision making for leaders: The analytical hierarchy process for decisions in a complex world' by Thomas L. Saaty. *The Engineering Economist*, 1983, vol. 29, iss. 1, pp. 74–75. <https://doi.org/10.1080/00137918308967693>

- Noerwijati K., Budiono R. Yield and yield components evaluation of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) clones in different altitudes. *Energy Procedia*, 2015, vol. 65, pp. 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.050>
- Okudoh V., Trois C., Workneh C., Schmidt C. The potential of cassava biomass and applicable technologies for sustainable biogas production in South Africa: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 1035–1052. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.142>
- Papastergiadou E., Kagalou I., Stefanidis K., Retalis A., Leonardos I. Effects of anthropogenic influences on the trophic state, land uses and aquatic vegetation in a shallow Mediterranean lake: Implications for restoration. *Water Resources Management*, 2010, vol. 24, iss. 3, pp. 415–435. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9453-y>
- Pereira J. M., Duckstein L. A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. *International Journal of Geographical Information Science*, 1993, vol. 7, iss. 5, pp. 407–424. <https://doi.org/10.1080/02693799308901971>
- Purnamasari R. A., Ahamed T., Noguchi R. Land suitability assessment for cassava production in Indonesia using GIS, remote sensing and multi-criteria analysis. *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, 2019, vol. 3, iss. 1, pp. 1–32. <https://doi.org/10.1007/s41685-018-0079-z>
- Rewlay-ngoen C., Papong S., Onbuddha R., Thanomnim B. Evaluation of the environmental performance of bioethanol from cassava pulp using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 284, article number 124741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124741>
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains With ERTS*. Washington, NASA special publication, 1974, vol. 351. 309 p.
- Santisopasri V., Kurotjanawong K., Chotineeranat S., Piyachomkwan K., Sriroth K., Oates C. G. Impact of water stress on yield and quality of cassava starch. *Industrial Crops and Products*, 2001, vol. 13, iss. 2, pp. 115–129. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(00\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(00)00058-3)
- Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 2008, vol. 1, iss. 1, pp. 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759>
- Sharma P., Aggarwal P., Kaur A. Biofortification: A new approach to eradicate hidden hunger. *Food Reviews International*, 2017, vol. 33, iss. 1, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1137309>
- Vurro M., Bonciani B., Vannacci G. Emerging infectious diseases of crop plants in developing countries: Impact on agriculture and socio-economic consequences. *Food Security*, 2010, vol. 2, iss. 3, pp. 113–132. <https://doi.org/10.1007/s12571-010-0062-7>
- Zemba A. A., Kefas J., Hamza A. Land suitability analysis for decision-making in cassava (*Manihot* Spp.) cultivation in southern part of Adamawa State, Nigeria. *Global Journal of Agricultural Sciences*, 2017, vol. 16, iss. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.4314/gjass.v16i1.1>
- Zhang J., Su Y., Wu J., Liang H. GIS based land suitability assessment for tobacco production using AHP and fuzzy set in Shandong province of China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, vol. 114, pp. 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.04.004>
- Zhu W., Lestander T. A., Örberg H., Wei M., Hedman B., Ren J., Xie G., Xiong S. Cassava stems: A new resource to increase food and fuel production. *GCB-Bioenergy*, 2015, vol. 7, iss. 1, pp. 72–83. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12112>

Оригинальная статья

УДК [[635.23:631.42]+[528.8:004]](597)

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-179-195>

**Оценка земель для выращивания маниоки
(*Manihot esculenta* Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida)
с использованием метода анализа иерархий, ГИС
и дистанционного зондирования**

Т. Т. Н. Нгуен [✉], Т. Х. Тонг

*Технический университет Ле Куи Дон
Вьетнам, г. Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236*

Поступила в редакцию 02.02.2023 г., после доработки 29.03.2023 г., принята 03.04.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Цель настоящего исследования – оценить характеристики земель для выращивания однолетней маниоки с целью выбора пространственных свойств и параметров окружающей среды, необходимых для указания перспективных участков для выращивания маниоки. В соответствии с руководящими принципами ФАО была построена пространственная модель для оценки перспективных земель для устойчивого выращивания маниоки посредством интеграции метода AHP-GIS-Remote Sensing. Анализ земель показал, что земли с высоким потенциалом составляют 6101.1 га (8% от общей площади), они сосредоточены в средней и восточной части изучаемой территории. Эти районы имеют ограничения для выращивания маниоки из-за климатических условий: минимальная температура самого холодного месяца ($P_3 < 14^\circ\text{C}$), среднегодовое количество солнечных часов ($P_5 < 1500$ ч) и ряд потенциальных факторов обеспечения качественной продукции (наиболее важные факторы – годовое количество осадков и pH почвы). Площади посевов маниоки сократились, но причина этого не зависела от физических условий окружающей среды. Возможно, на местных фермах играют важную роль ограничивающие факторы внутреннего рынка, устаревшие технологии переработки и низкая закупочная цена на сырую маниоку.

Ключевые слова: АНР (метод анализа иерархий), маниока, урожай, почва, ГИС, ФАО

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (проект E1.4) в 2021 г.

Для цитирования. Nguyen T. T. N., Tong T. H. Assessment of lands for cassava (*Manihot esculenta* Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida) cultivation using the AHP-GIS-Remote Sensing technique [Нгуен Т. Т. Н., Тонг Т. Х. Оценка земель для выращивания маниоки (*Manihot esculenta* Crantz; Euphorbiaceae, Magnoliopsida) с использованием метода анализа иерархий, ГИС и дистанционного зондирования] // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 179 – 195. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-179-195>

✉ Для корреспонденции. Кафедра геодезии и картографии Института техники специального машиностроения, Технический университет Ле Куи Дон, Вьетнам.

ORCID и e-mail адреса: Нгуен Тхи Тху Нра: <https://orcid.org/0000-0001-7021-9698>, Thungatdbd@lqdtu.edu.vn; Тонг Тхи Хань: <https://orcid.org/0000-0002-6639-0318>, Tonghanh@lqdtu.edu.vn.

Оригинальная статья

УДК 631.46:574.4: 630.43

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-196-213>

ТОКСИЧНОСТЬ ДЫМА ДЛЯ БИОТЫ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРОВ

М. С. Нижельский ✉, К. Ш. Казеев, В. В. Вилкова,
А. Н. Федоренко, С. И. Колесников

Южный федеральный университет

Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, д. 105/42

Поступила в редакцию 18.08.2022 г., после доработки 22.02.2023 г., принята 07.03.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Приводятся результаты по влиянию одного из видов пирогенного фактора (дым) после сжигания стружек хвойных пород деревьев на биоиндикаторы (почвенные ферменты, микроорганизмы, мезофауна, растения сельскохозяйственных культур). Установлено, что задымление в течение 60 минут значительно повлияло на ферментативную активность чернозема обыкновенного. Посредством фумигации произошло снижение таких ферментов, как каталаза, пероксидаза, полифенолоксидаза и инвертаза. Наиболее чувствительными к дыму оказались ферменты класса оксидоредуктаз. Выявлена высокая токсичность газообразных продуктов горения к почвенной флоре и фауне. В результате воздействия фумигации на биоиндикаторы определена острая токсичность дыма. Зафиксирована высокая смертность тест-объектов в опытах (*Eisenia fetida*, *Nauphoeta cinerea*). Почвенные микроорганизмы (*Azotobacter chroococcum* и *Penicillium chrysogenum*) оказались информативным показателем после 30 – 120 минут фумигации. Выявлена устойчивость всходов растений (*Raphanus sativus*, *Triticum aestivum*, *Pisum sativum*) к газообразным продуктам горения. Выполнен эксперимент по определению химического состава газов в дыму. Установлено, что в нем содержатся такие опасные соединения, как диоксид серы (SO₂), оксид и диоксид азота (NO, NO₂), оксид углерода (CO), ацетальдегид (C₂H₄O), формальдегид (CH₂O), фенол (C₆H₆O) гидроксибензол и другие, которые оказали неблагоприятное воздействие на индикаторы. Анализ выявил, что концентрация оксида углерода в 714 раз превышала максимально разовую предельно допустимую концентрацию (ПДК), ацетальдегида – в 24100 раз, концентрация оксида азота и диоксида азота – в 100 и 300 раз соответственно.

Ключевые слова: пирогенное воздействие, биотестирование, биоиндикаторы, ферменты, тест-объекты, микроорганизмы, токсичность, химический состав дыма

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (№ FENW-2023-0008) и при финансовой поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-449.2022.5).

✉ Для корреспонденции. Кафедра экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии им. Д. И. Иванковского, Южный федеральный университет.

ORCID и e-mail адреса: Нижельский Михаил Сергеевич: <https://orcid.org/0000-0001-6443-6039>, nizhelskiy@sfned.ru; Казеев Камил Шагидуллович: <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>, kamil_kazeev@mail.ru; Вилкова Валерия Валерьевна: <https://orcid.org/0000-0002-1374-3941>, lera.vilkova.00@mail.ru; Федоренко Анастасия Николаевна: <https://orcid.org/0000-0002-1690-6048>, pushok.mur@yandex.ru; Колесников Сергей Ильич: <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>, kolesnikov@sfned.ru.

Для цитирования. Нижельский М. С., Казеев К. Ш., Вилкова В. В., Федоренко А. Н., Колесников С. И. Токсичность дыма для биоты и биологической активности почв при моделировании пожаров // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 196 – 213. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-196-213>

ВВЕДЕНИЕ

Пожары наносят катастрофический ущерб природным сообществам, в том числе оказывают неблагоприятное воздействие на почву. В результате изменяются биохимические свойства почв, которые влияют на доступность питательных веществ для растений (Pellegrini et al., 2020). В значительной степени происходят изменения и биоты почв (Certini et al., 2021). Последствия природных пожаров могут включать повышение уровня аэрозолей и CO_2 в атмосферном воздухе с последующим осаждением токсичных веществ на почву. Они, в свою очередь, оказывают прямое негативное воздействие на функционирование биоты и на здоровье почв.

Большая часть организмов, обитающих в почве, фактически находится в поверхностном слое, наиболее подверженном воздействию высоких температур во время пожара (Swengel, 2001; Doamba et al., 2014).

Известно, что при пирогенном воздействии изменяется температурный режим, химические свойства почв, происходит уменьшение влагоемкости и водопроницаемости, уменьшение численности микроорганизмов (Kazeev et al., 2020 *a*, *b*). Однако активное задымление также может привести к снижению интенсивности микробиологических процессов и ферментативной активности (Вальков и др., 1996). Поэтому следует более подробно рассмотреть протекающие в почве процессы, обусловленные фумигацией (задымлением). Дым содержит опасные токсианты, в нем много фенольных соединений, которые, как известно, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами (Синьков, Почапский, 2017; Бердникова, 2019). Оксиды углерода, азота и другие вещества также опасны в составе продуктов горения, образующихся в результате термической деструкции.

Для выявления изменений, происходящих в почве, проводят мониторинг. Биоиндикация является распространенным методом оценки изменений в почве (Breg et al., 2017; Erdős et al., 2017). Живые организмы предоставляют информацию о негативном воздействии стрессовых факторов окружающей среды, и поэтому биоиндикация дополняет физические и химические исследования почв (Heger et al., 2012). Биотестирование проводят для определения общей токсичности, мутагенности и канцерогенности почв (Романов, Любомирова, 2009; Terekhova, 2011). Использование растений в оценке качества почв является приоритетным направлением биоиндикации. Это связано с тем, что продуцентам принадлежит основополагающая роль в жизни биогеоценозов и круговороте веществ и энергии в биосфере (Неверова, Еремеева, 2006). Фитоиндикация осуществляется по реакции растений на воздействие внешних факторов. Выбор изучаемых показателей биологической активности поврежденных почв должен основываться на нескольких критериях: информативности показателя, высокой чувствительности, небольшой ошибке опытов, незначительном варьировании показателя, широкой доступности

использования метода (Казеев и др., 2016). Наиболее корректный результат достигается при использовании нескольких тест-объектов из разных систематических групп (Федеральный закон от 24.06.98 N 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»).

Цель работы – исследовать влияние дыма при моделировании пожаров на ферментативную активность чернозема обыкновенного, мезофауну, микроорганизмы и растения сельскохозяйственных культур. Для этого требовалось провести анализ по изменению активности почвенных ферментов (каталазы, полифенолоксидазы, пероксидазы, инвертазы, уреазы) и определить показатели, наиболее чувствительные к воздействию дыма. Также в ходе проведения исследований было необходимо установить временной порог влияния фумигации, в процессе которой будет зафиксирована смертность мезофауны (тараканов и дождевых червей), выявить резистентность проростков растений к фумигации и выявить подавление микроорганизмов после задымления.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследований были такие живые организмы, как *Penicillium chrysogenum* (Thom, 1910), азотфиксирующие бактерии *Azotobacter chroococcum* (Beijerinck, 1901), тараканы *Nauphoeta cinerea* (Olivier, 1789), черви *Eisenia fetida* (Savigny, 1826), семена растений – *Pisum sativum* L., (1753), *Triticum aestivum* L., (1753), *Raphanus sativus* L., (1753), а также почвенные ферменты (каталаза, полифенолоксидаза, пероксидаза, инвертаза, уреазы).

Почва, подвергающаяся воздействию дыма – чернозем обыкновенный южно-европейской фации карбонатный легкоглинистый (Haplic Chernozem (Aric, Loamic, Pachic)), отобранный из Ботанического сада Южного федерального университета (0 – 10 см). Она обладает высоким плодородием и благоприятными свойствами: хорошей структурой, оптимальной плотностью сложения, хорошей водопроницаемостью, высокой обеспеченностью калием, азотом и фосфором (Вальков и др., 2008; Azarenko et al., 2020; Kazeev et al., 2020 a). Почва опытного участка характеризуется следующими показателями: мощность гумусовых горизонтов (A+B) – 80 см, содержание органического углерода в пахотном горизонте – 2.0%, легкоглинистый гранулометрический состав (содержание физической глины – 53%), содержание подвижного фосфора – 3.3 мг P₂O₅/100 г, обменного калия, K₂O – 341 мг/кг, нитратов, N–NO₃ – 8.4 мг/кг (Nizhelskiy et al., 2022).

Серия модельных экспериментов была проведена в контролируемых условиях при помощи дымогенератора «Merkel Standart» (Helicon, Россия). Фумигацию осуществляли, используя инструкцию производителя компании Helicon (Россия). Биоиндикаторы помещали в газовую камеру объемом 50 л. Подачу воздуха в камеру осуществляли поршневым компрессором Hailia Aco 208 (Haili Group Co. Ltd, Китай), с интенсивностью заполнения дымом 17.5 л/мин. Схема установки для опытов для каждого из исследуемых объектов представлена на рис. 1. Во всех экспериментах температура воздуха была идентична (21°C), а материалами горения были стружки хвойных пород деревьев. При проведении экспериментов относи-

тельная влажность составляла 54 – 58%, атмосферное давление 755 – 757 мм рт. ст. (100.67 – 100.93 кПа). Параметры воздушной среды определили при помощи метеометра МЭС-200А (ЗАО НПП Электронстандарт, Россия). В опытах исследовали только влияние дыма на почву и биоту, температурный фактор и огонь были исключены конструктивными особенностями устройства для фумигации (задымления). В ходе экспериментов установлено, что температура выделяющегося при горении хвойных стружек дыма не превышала 25.8°C (определено термометром ТЛ-2 (ОАО Термоприбор, Россия)).

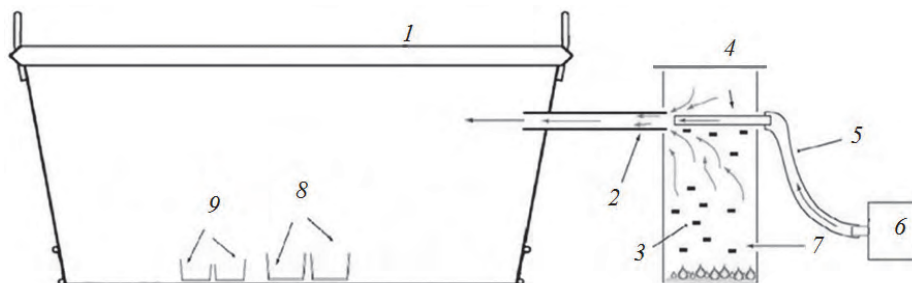


Рис. 1. Схема экспериментов: 1 – газовая камера, 2 – дымовая труба для подачи дыма в газовую камеру, 3 – материалы горения, 4 – трубка для подачи воздуха в дымовую трубу, 5 – шланг от воздушного компрессора, 6 – воздушный компрессор, 7 – отверстие для розжига, 8 – контейнеры с почвой, 9 – контейнеры с тест-объектами

Fig. 1. Scheme of the experiments: 1 – gas chamber, 2 – smoke pipe for smoke supply to the gas chamber, 3 – combustion materials, 4 – air supply pipe to the smoke pipe, 5 – hose from the air compressor, 6 – air compressor, 7 – ignition opening, 8 – containers with soil, 9 – containers with test objects

Изменение биохимических показателей. Почву слоем 0.6 см и массой 40 г помещали в контейнеры объемом 200 мл. Время обработки каждого образца дымом составило 60 мин. Изменение активности почвенных ферментов определяли после фумигации. Активность каталазы – волкуметрическим методом по скорости разложения перекиси водорода (Галстян, 1982). Активность полифенолоксидазы и пероксидазы определены колориметрическим методом по скорости превращения гидрохинона в бензохинон. Активность этих ферментов в значительной степени зависит от pH и некоторых других параметров (Gianfreda, Rao, 2004; Sinsabaugh, 2010). Для определения активности инвертазы использовали колориметрический метод определения образующейся глюкозы из сахарозы с помощью реактива Феллинга. Метод определения активности уреазы основан на определении содержания аммонийного азота при гидролизе мочевины с помощью реактива Несслера. Активность фермента зависит от микробного сообщества, а также физических и химических характеристик почв и меняется при изменении содержания органического вещества, глубины почвы, температуры и pH (Yang et al., 2006; Corstanje et al., 2007).

Обилие микроорганизмов. Численность микроскопических грибов определена методом посева. Для этого использовали чистую культуру *Penicillium chrysogenum* из коллекции кафедры биохимии и микробиологии. Посев проводили на среду Чапека из суспензии микромицета, доведённой до концентрации 10^5 КОЕ/мл, численность конидий контролировали с помощью камеры Горяева. Обилие бактерий *Azotobacter chroococcum* определяли методом комочков обрастания почвы на безазотистой среде Эшби. Чашки Петри с микроорганизмами помещали в газовую камеру для фумигации. Токсичность дыма определяли подсчетом исследуемых микроорганизмов на опытных чашках Петри в сравнении с контрольными чашками без фумигации.

Использование дождевых червей и тараканов в качестве тест-объектов. При помощи дождевых червей оценивается острая токсичность, репродуктивный потенциал, прирост биомассы. При проведении экспериментов за основу взяли метод из государственного стандарта России (Межгосударственный стандарт ГОСТ 33036–2014). Черви *Eisenia fetida* были помещены в контейнеры на 200 мл во влажную почву слоем 0,6 см и массой 40 г. Предварительно почву увлажнили водой (влажность 40% от массы почвы). Поочередно обрабатывали контейнеры с червями дымом в течение 1, 5, 10, 30 мин. Аналогично проводили скрининговый тест, где вместо почвы была фильтровальная бумага. В ходе эксперимента следили за реакцией организмов (скорость зарывания червей в почву). По окончании опыта, а также спустя 24 ч зафиксировали летальный исход (%) организмов. Еще одним не менее важным тест-объектом, который часто используют при оценке состояния наземных экосистем, являются насекомые. Тараканы (*Nauphoeta cinerea*) были помещены в прозрачные контейнеры объемом 1000 мл. Время фумигации и подсчет тараканов были такими же, как и для дождевых червей. Выбор тест-организмов обусловлен удобством их использования и информативностью полученных результатов при биодиагностике (Рассади́на, 2007). Критерием токсичности являлась гибель более 50% тараканов и червей за сутки в тестируемом образце по сравнению с контролем.

Использование растений в качестве тест-объекта. Для эксперимента влажную почву поместили в пластиковые контейнеры объемом 200 мл и увлажнили водопроводной водой (40% от массы почвы). Затем в каждый из контейнеров с почвой сеяли по 10 семян разных культур (*Raphanus sativus*, *Triticum aestivum*, *Pisum sativum*). В течение 4 суток поддерживали оптимальные для прорастания семян условия – влажность, освещенность. По окончании срока проросшие семена подвергали фумигации – 5, 10, 30 мин. После эксперимента в течение 3 суток наблюдали за внешними изменениями проростков. Также измеряли длину корней и побегов растений через 3 суток после фумигации.

Химический состав дыма. При проведении экспериментов по влиянию газообразных продуктов горения на почву и биоту определили также и химический состав дыма. Забор дыма осуществили при помощи газоанализатора ДАГ-16 (ООО Дитгаз, Россия) по методикам: ПНД Ф 13.1.41-2003 (издание 2012), ПНД Ф 13.1:2:3.59-07 (издание 2005), ПНД Ф 13.1:2:3.23-98 (издание 2005), ФР.1.31.2009.05508 (издание 2004), М-МВИ 173-06 (издание 2006), ПНД Ф

13.1:2:3.27-99 (издание 2005), М-18 (издание 2002), М-14 (издание 2011), М-15 (издание 2001), ПНД Ф 12.1.1-99 (издание 1999). Для определения массовых концентраций химических соединений были использованы такие приборы, как газовый хроматограф кристалл-2000М (ЗАО СКБ Хроматэк, Россия), хроматограф ФГХ-01 (ООО НПФ АНАТЭК, Россия), фотометр КФК-3-01-ЗОМЗ (АООТ Загорский оптико-механический завод, Россия), спектрофотометр UV-1800 (Shimadzu Corporation, Япония).

Полученные данные оценивали на достоверность результатов с применением однофакторного дисперсионного анализа с уровнем статистической значимости $p < 0.05$. Все расчеты проводили с применением пакетов программ Microsoft Excel (Microsoft Corp., USA) и Statistica 10 (StatSoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение биохимических показателей. В ходе экспериментов было выявлено изменение активности почвенных ферментов. Активность всех ферментов значительно снизилась при воздействии продуктов горения. Наиболее чувствительными к воздействию дыма оказались ферменты из класса оксидоредуктаз: каталаза и полифенолоксидаза. Значения их активности после часовой обработки дымом уменьшились на 25 – 33% по сравнению с контролем. Активность других показателей была ингибирована дымом на 15 – 23% (рис. 2).

Выбор ферментов для анализа обусловлен их высокой чувствительностью к антропогенным влияниям. Газообразные продукты горения оказали значительное воздействие на чернозем. Такие изменения произошли в результате поглощения почвой веществ, которые образуются при горении древесных остатков. При помощи газоанализатора ДАГ-16 было установлено, что в дыму содержатся такие опасные соединения, как диоксид серы (SO_2), оксид и диоксид азота (NO , NO_2), оксид углерода (CO), ацетальдегид ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$), формальдегид (CH_2O), фенол ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$) гидроксибензол, гептан (C_7H_{16}), метан (CH_4), гексан (C_6H_{14}). Анализ выявил, что концентрации некоторых из них существенно превышает ПДК атмосферного воздуха ГН 2.1.6.3492-17 (Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17). В частности, оксид углерода составил 3570 мг/м^3 , что в 714 раз превышает допустимые максимально разовую концентрацию и в 1190 раз среднесуточную. Аналогичные изменения наблюдали с оксидом и диоксидом азота, формальдегидом, фенолом и ацетальдегидом. Следовательно, данные газообразные вещества внесли наибольший

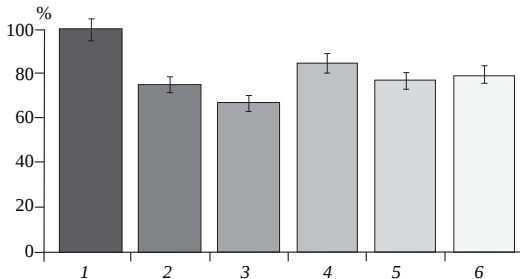


Рис. 2. Снижение активности ферментов в почве, % от контроля: 1 – контроль, 2 – каталаза, 3 – полифенолоксидаза, 4 – пероксидаза, 5 – инвертаза, 6 – уреаза (изменения достоверны при $p < 0.05$)

Fig. 2. Decrease in the enzyme activity in soil, % of control: 1 – control, 2 – catalase, 3 – polyphenol oxidase, 4 – peroxidase, 5 – invertase, 6 – urease (changes are significant when $p < 0.05$)

вклад в изменение ферментативной активности. Однако не все исследуемые в анализе соединения превышали ПДК. Например, концентрация диоксида серы при анализе дыма составила 0.28 мг/м³, что не превысило максимально допустимую, однако в 5.6 раза превышало среднесуточную (табл. 1).

Таблица 1. Концентрации химических соединений в дыму от сжигания хвойных стружек
Table 1. Concentrations of chemical compounds in smoke from the burning of coniferous wood-chips

Химическое соединение / Chemical compound	Концентрация в эксперименте, мг/м ³ / Concentration in the experiment, mg/m ³	Предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе, мг/м ³ / Maximum permissible concentrations for atmospheric air, mg/m ³	
		Максимально разовая концентрация / Maximum single concentration	Среднесуточная концентрация / Daily average concentration
Диоксид серы (SO ₂) / Sulphur dioxide (SO ₂)	0.28	0.5	0.05
Углерод оксид (CO) / Carbon oxide (CO)	3570	5	3
Азота диоксид (NO ₂) / Nitrogen dioxide (NO ₂)	60	0.2	0.04
Азота оксид (NO) / Nitrogen oxide (NO)	40	0.4	0.06
Метан (CH ₄) / Methane (CH ₄)	< 2	50	–
Гексан (C ₆ H ₁₄) / Hexane (C ₆ H ₁₄)	238	60	–
Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O) / Acetaldehyde (C ₂ H ₄ O)	241	0.01	–
Формальдегид (CH ₂ O) / Formaldehyde (CH ₂ O)	9.53	0.05	0.01
Фенол (C ₆ H ₆ O) Гидроксibenзол / Phenol (C ₆ H ₆ O) Hydroxybenzene	4.41	0.01	0.006

Ранее были установлены некоторые закономерности реакции почвенных ферментов на воздействие дыма, установлено ингибирование ферментативной активности в зависимости от интенсивности воздействия (времени и температуры дыма), влажности почвы, природы фермента и других факторов (Nizhelskiy et al., 2022). На сегодняшний день в литературных источниках достаточно информации об изменении биохимических показателей почв после воздействия температурного фактора, огня (Boerner et al., 2008; Vilkova et al., 2022), но практически не изучены последствия воздействия дыма на почву. Данное исследование по воздействию дыма от пожаров дополнило ранее изученные по влиянию пирогенного фактора (огня и высоких температур) на изменение активности почвенных ферментов. Выявлены химические вещества, которые оказывают наибольшее воздействие на биологическую активность чернозема при сжигании растительных остатков.

Обилие микроорганизмов. Согласно полученным результатам, обилие *Penicillium chrysogenum* на чашках Петри зависело от времени обработки их дымом. Установлено существенное сокращение численности исследуемых организмов за 30 – 120 мин фумигации. За указанное время численность снизилась на 25 – 57% (рис. 3).

ТОКСИЧНОСТЬ ДЫМА ДЛЯ БИОТЫ

Аналогичная ситуация была и с влиянием дыма на *Azotobacter chroococcum*. Установлена высокая чувствительность бактерий к продуктам горения. Наибольшее подавление произошло после максимального уровня воздействия (120 мин) – значения показателя снизились относительно контроля на 62%. Таким образом, зафиксирована высокая чувствительность бактерий *Azotobacter chroococcum* и грибов *Penicillium chrysogenum* к фумигации от горения хвойных стружек. Выявлена взаимосвязь изменения обилия микроорганизмов в зависимости от продолжительности фумигации.

Ранее уже было исследовано воздействие огня на почвенные микроорганизмы (Barteiro, Díaz-Raviña, 2021), оценивалось кратковременное воздействие пирогенного фактора (огня), а также среднесрочные и долгосрочные последствия. Отмечается, что воздействие пожаров на почвенные микроорганизмы, а также последующее восстановление почвы зависит от различных факторов, таких как интенсивность пожара, длительность воздействия, устойчивость почвы и условий окружающей среды. В работах (Saenz de Miera et al., 2020; Qin, Liu, 2021) описываются изменения бактериальных сообществ в зависимости от интенсивности огня, а также уменьшение разнообразия бактерий и грибов спустя полгода после пирогенного воздействия. Подобное исследование было выполнено в экспериментах, описанных в настоящей статье, однако вместо огня использовали дым от сжигания хвойных стружек. Температурный фактор был исключен конструкцией оборудования для обработки чашек Петри с микроорганизмами дымом. Температура газообразных продуктов горения не превышала 25.8°C. Таким образом выявили токсичность газов, выделяемых при горении растительных материалов на почвенные микроорганизмы. При этом эффекта от сопутствующих факторов пирогенного воздействия – пламени и высокой температуры не было.

Использование дождевых червей и тараканов в качестве тест-объектов.

Воздействие дыма на тараканов в течение 1 мин не вызвало их иммобилизации, отмечалась высокая подвижность особей. Фумигация в течение 5 и 10 мин также не оказала влияния на жизнеспособность тест-организмов, однако двигательная активность их не была высокой, как в контрольном образце. Воздействие дыма в течение 30 мин (табл. 2) вызвало гибель 80% исследуемых организмов. Таким образом, фумигация от горения материалов растительного происхождения, вследствие своей высокой токсичности, значительно повлияла на жизнеспособность

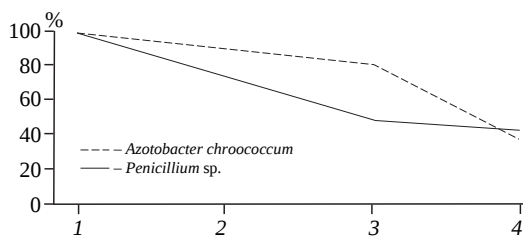


Рис. 3. Снижение численности бактерий *Azotobacter chroococcum* и микроскопических грибов *Penicillium chrysogenum* под воздействием дыма, % от контроля: 1 – контроль, 2 – фумигация 30 мин, 3 – фумигация 60 мин, 4 – фумигация 120 мин (изменения достоверны при $p < 0.05$)

Fig. 3. Reduction of *Azotobacter chroococcum* bacteria and *Penicillium chrysogenum* microscopic fungi under smoke exposure, % of control: 1 – control, 2 – after 30 min fumigation, 3 – after 60 min fumigation, 4 – after 120 min fumigation (changes are significant when $p < 0.05$)

тараканов (*Nauphoeta cinerea*) из-за попадания в их организм вредных веществ после выделения токсичных газов при дымообразовании от горения древесных стружек.

Таблица 2. Изменения активности и смертность *Nauphoeta cinerea*, подвергшихся воздействию дыма

Table 2. Changes in the activity and mortality of smoke-exposed *Nauphoeta cinerea*

Воздействие дыма / Exposure to smoke	Контроль / Control	1 мин / 1 min	5 мин / 5 min	10 мин / 10 min	30 мин / 30 min
Смертность, % / Mortality rate, %	0	0	0	0	80
Поведенческая реакция во время эксперимента / Behavioral responses during the experiment	Отмечена повышенная двигательная активность / There was an increase in motor activity	Поведенческие реакции остались без изменений, аналогично контролю / Behavioral responses remained unchanged, similar to the control	7 из 10 тараканов были малоподвижные / 7 out of 10 cockroaches were slow-moving	У 8 из 10 тест-объектов отсутствовали поведенческие реакции / 8 out of 10 test subjects had no behavioural responses	

После фумигации дождевых червей в скрининговом тесте в течение 1 мин летальных исходов не зафиксировано. В образцах с обработкой 5 и 10 мин количество жизнеспособных особей оставалось неизменным, однако они не были такими активными, как в предыдущем варианте (1 мин) и контроле. После 30 мин фумигации замечена крайне низкая активность организмов на фильтровальной бумаге в скрининговом тесте. Далее после окончания фумигации все контейнеры с образцами хранили при 20°C в темном помещении. Спустя 24 ч тест-объекты проверили снова согласно ГОСТ 33036–2014 (Межгосударственный стандарт ГОСТ 33036-2014). В результате наблюдений выявлено, что только 30-минутная обработка дымом привела к 100% летальному исходу, в то время как изменений в остальных исследуемых образцах не зафиксировано.

Во втором тесте, с использованием почвы, отмечали следующие поведенческие реакции: повышение активности, ускоренное сокращение кожно-мышечного мешка, вертикальный таксис в глубь почвы с целью минимизировать воздействие дыма. Подсчет жизнеспособных дождевых червей после опыта и сравнение с контролем проводили аналогично скрининговому тесту. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Поведенческая реакция и смертность (%) *Eisenia fetida* после воздействия дыма
Table 3. Behavioral response and mortality (%) of *Eisenia fetida* after smoke exposure

Воздействие дыма / Exposure to smoke		1 мин / 1 min	5 мин / 5 min	10 мин / 10 min	30 мин / 30 min
Смертность, % / Mortality rate, %	Скрининговый тест / Screening test	0	0	0	100
	Тест с почвой / Test with soil	0	0	0	40
Скорость зарывания в почву, мин / Speed of digging into the soil, min		0.1 – 0.2 мин с начала эксперимента / 0.1–0.2 min from the start of the experiment			

Результаты по влиянию продуктов горения на дождевых червей в почве свидетельствуют о среднем уровне токсичности газообразных продуктов горения на почву, так как согласно ГОСТ 33036–2014 (Межгосударственный стандарт ГОСТ 33036-2014), высоким уровнем считается смертность тест-объектов более 50%. Низкая смертность червей в эксперименте с почвой связана с тем, что почва выполняет роль защитного барьера, препятствуя проникновению газообразных продуктов горения к червям. Однако в случае со скрининговым тестом (без почвы) летальный исход был более 50%.

Известно множество работ, посвященных использованию различных биотестов в качестве диагностического показателя почв в результате различных видов антропогенного воздействия (Казеев и др., 2016; Schaefer, 2004; Moya et al., 2019). Однако нет информации об использовании таких тест-объектов, как дождевые черви (*Eisenia fetida*), тараканы (*Nauphoeta cinerea*) при фумигации от горения материалов растительного происхождения. Настоящее исследование дало представление о реакции живых организмов на газообразные продукты горения.

Использование растений в качестве тест-объекта. Выявлены морфологические изменения растений при диагностике. В частности, зафиксирован некроз – отмирание участков побегов, листьев у исследуемых культур после фумигации дымом. Помимо этого, замечены изменения в длине побегов и корней (рис. 4).

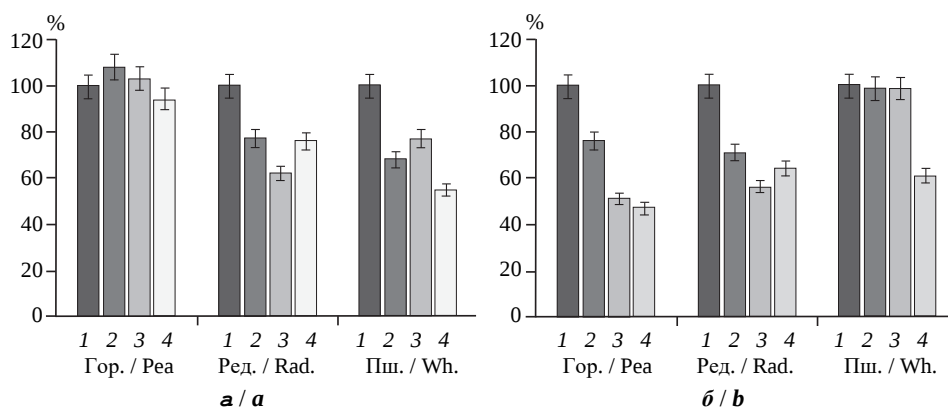


Рис. 4. Изменение длины корня (а) и побега (б) у растений после фумигации, % от контроля: Гор. – горох (*Pisum sativum*), Ред. – редис (*Raphanus sativus*), Пш. – пшеница (*Triticum aestivum*); 1 – контроль, 2 – дым 5 мин, 3 – дым 10 мин, 4 – дым 30 мин (изменения достоверны при $p < 0.05$)

Fig. 4. Changes in the root (a) and shoot (b) length in plants after fumigation, % of control: Pea – pea (*Pisum sativum*), Rad. – radish (*Raphanus sativus*), Wh. – wheat (*Triticum aestivum*); 1 – control, 2 – 5 min smoke, 3 – 10 min smoke, 4 – 30 min smoke (changes are significant when $p < 0.05$)

Так, длина корней у гороха после 30-минутной обработки дымом меньше на 6%, чем у контрольных вариантов, в то время как фумигация 5 и 10 мин не повлияла на корни. Возможно, это связано с крупными размерами семян, которые обла-

дают большими питательными запасами. Они помогают гороху долго функционировать без внешних источников питания. У редиса длина корней уменьшилась на 24 – 38%, однако наибольший эффект дым оказал на корни пшеницы (уменьшение на 45%) после 30 мин фумигации. В случае замеров длин побегов наблюдали похожую ситуацию. Аналогично предыдущим результатам по влиянию дыма на биоиндикаторы (почва, микроорганизмы, черви и тараканы), данный эксперимент выявил резистентность растений к газообразным продуктам горения. Подобных исследований на сегодняшний день практически нет.

В текущей работе был использован метод фитотоксичности, который в настоящее время широко распространен. Все полученные в ходе модельных экспериментов по влиянию дыма от пожаров результаты могут свидетельствовать о существенном влиянии токсичных веществ дыма (диоксид серы, оксид и диоксид азота, оксид углерода, ацетальдегид и другие) на биологические свойства почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено значительное снижение активности почвенных ферментов, изменения обилия микроорганизмов, почвенной биоты после воздействия фумигации. Численность почвенных микроорганизмов является информативным показателем воздействия пирогенного фактора на почву. В результате воздействия дыма наблюдали подавление обилия микроскопических грибов *Penicillium chrysogenum* и бактерий *Azotobacter chroococcum*. Установлен высокий уровень смертности у червей в скрининговом тесте (100%) после 30-минутного воздействия стрессора, но в тесте с почвой этот уровень заметно меньше, что связано с защитной функцией самой почвы, выступающий в качестве барьера. Летальный исход наблюдали у тараканов (80%) после 30 мин нахождения тест-объектов под дымом. Растения также крайне чувствительные тест-объекты, у них наблюдались морфологические изменения – некроз участков тканей. Также имеются изменения в длине побегов и корней, где наибольший эффект зафиксирован при максимальной продолжительности задымления 30 мин. Выявлена высокая чувствительность почвенных ферментов к газообразным продуктам горения. Фумигация оказала негативное воздействие на ферментативную активность почвы, где наиболее чувствительными оказались ферменты класса оксидоредуктаз. Выявлено, что при сжигании материалов растительного происхождения (хвойные стружки) выделяются различные газообразные вещества, которые для почвы и биоты являются крайне токсичными. Это диоксид серы (SO₂), оксид и диоксид азота (NO, NO₂), оксид углерода (CO), ацетальдегид (C₂H₄O), формальдегид (CH₂O), фенол (C₆H₆O) гидроксибензол и другие. Их концентрации превышают предельно допустимые.

Таким образом, возникновение пожаров приобретает катастрофический характер. Как показали наши эксперименты, оказывать негативное воздействие на почву и биоту может не только огонь и экстремально высокие температуры, но и дым. Опасность дыма заключается в его токсичности, и в том, что он может переноситься на большие расстояния, далеко от эпицентра пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бердникова Л. Н. Влияние опасных и вредных факторов лесных пожаров на окружающую среду // Ресурсосберегающие технологии сельского хозяйства. Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2019. Вып. 11. С. 47 – 55.

Вальков В. Ф., Казадаев А. А., Креница А. М., Супрун В. А., Суханова В. М., Тациев С. С. Влияние сжигания стерни на биоту чернозема // Почвоведение. 1996. № 12. С. 1517 – 1522.

Вальков В. Ф., Казеев К. Ш., Колесников С. И. Почвы Юга России. Ростов-на-Дону : Изд-во Эверест, 2008. 276 с.

Галстян А. Ш. Об устойчивости ферментов почв // Почвоведение. 1982. № 4. С. 108 – 110.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. М.: Минюст России, 2018. 35 с.

ГОСТ 33036–2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение острой токсичности для дождевых червей. М.: Стандартинформ, 2019. 6 с.

Казеев К. Ш., Колесников С. И., Акименко Ю. В., Даденко Е. В. Методы диагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.

М-14. Методика выполнения измерений массовой концентрации фенола в промышленных выбросах в атмосферу фотоколориметрическим методом. СПб.: НППФ Экосистема, 2011. 14 с.

М-15. Методика выполнения измерений массовой концентрации диоксида серы в промышленных выбросах в атмосферу фотоколориметрическим методом. СПб.: НППФ Экосистема, 2001. 17 с.

М-18. Методика выполнения измерений массовой концентрации оксидов азота в промышленных выбросах в атмосферу фотометрическим методом с реактивом Грисса. СПб.: НППФ Экосистема, 2002. 15 с.

М-МВИ 173-06. Методика выполнения измерений массовой концентрации и определения массового выброса загрязняющих веществ в отходящих газах топливосжигающих установок с применением газоанализаторов ДАГ-16, ДАГ-500, ДАГ-510 / НИИ Атмосфера. СПб., 2006. 25 с.

Неверова О. А., Еремеева Н. И. Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды / Гос. публ. науч.-техн. библиотека СО РАН. Новосибирск, 2006. 88 с. (Сер. Экология. Вып. 80).

ПНД Ф 13.1.41-2003. Количественный химический анализ атмосферного воздуха и выбросов в атмосферу, методика измерений массовой концентрации формальдегида в промышленных выбросах в атмосферу фотометрическим методом с апитилацетоном / Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия. М., 2012. 16 с.

ПНД Ф 13.1:2:3.59-07. Методика выполнения измерений массовой концентрации суммы предельных углеводородов C₁₂-C₁₉ в атмосферном воздухе санитарно-защитной зоны, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах газохроматографическим методом / НИИ Атмосфера. СПб., 2005. 17 с.

ПНД Ф 13.1:2:3.23-98. Методика выполнения измерений массовых концентраций предельных углеводородов C₁-C₅ и непредельных углеводородов (этена, пропена, бутенов) в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом газовой хроматографии / Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия на окружающую среду. М., 2005. 22 с.

ПНД Ф 13.1:2:3.27-99. Методика выполнения измерений массовой концентрации оксида углерода и метана методом реакционной газовой хроматографии в атмосферном воз-

духе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах / Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия на окружающую среду. М., 2005. 21 с.

ПНД Ф 12.1.1-99. Методические рекомендации по отбору проб при определении концентрации вредных веществ (газов и паров) в выбросах промышленных предприятий. М.: Госкомэкология РФ, 1999. 14 с.

Рассадина Е. В. Биоиндикация и ее место в системе мониторинга окружающей среды // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2007. № 2. С. 48 – 53.

Романов В. В., Любимирова В. Н. Биотестирование экологического состояния почв не-санкционированных свалок ТБО на территории Ульяновской области // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 2. С. 82 – 85

Синьков О. А., Почапский А. А. Влияние лесных пожаров на окружающую среду // Актуальные проблемы геотехники, экологии и защиты населения в чрезвычайных ситуациях. Минск: Минский национальный технический университет, 2017. С. 101 – 103.

ФР.1.31.2009.05508. Методика выполнения измерений массовой концентрации акролеина, бутана, бутилкарбита, бутилцеллозоля, гексана, гептана, декана, диметилформамида, метилцеллозоля, нонана, октана, перхлорэтилена, сероуглерода, стирола, этилцеллозоля на портативных газовых хроматографах ФГХ и ПГХ. М.: Росстандарт, 2004.

Федеральный закон от 24.06.98 N 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) [принят Государственной думой 22 мая 1998 года: одобрен Советом Федерации 10 июня 1998 года].

Azarenko M. A., Kazeev K. Sh., Yermolayeva O. Y., Kolesnikov S. I. Changes in the plant cover and biological properties of chernozems in the postagrogenic period // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53, №. 11. P. 1645 – 1654. <https://doi.org/10.1134/S1064229320110034>

Barreiro A. P., Díaz-Raviña M. Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity // Current Opinion in Environmental Science and Health. 2021. Vol. 22. Article number 100264. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2021.100264>

Boerner R. E. J., Giai C., Huang J., Miesel J. R. Initial effects of fire and mechanical thinning on soil enzyme activity and nitrogen transformations in eight North American forest ecosystems // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40, iss. 12. P. 3076 – 3085. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2008.09.008>

Breg V. M., Ribeiro D., Čarni A. Vegetation as the bioindicator of human-induced degradation in karst landscape: case study of waste-filled dolines // Acta Carsologica. 2017. Vol. 46, iss. 1. P. 95 – 110. <https://doi.org/10.3986/ac.v46i1.4712>

Certini G., Moya D., Lucas-Borja M. E., Mastrodonato G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 488. Article number 118989. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.118989>

Corstanje R., Schulin R., Lark R. Scale – dependent relationships between soil organic matter and urease activity // European Journal of Soil Science. 2007. Vol. 58, iss. 5. P. 1087 – 1095. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00902.x>

Doamba S. W. M. F., Savadogo P., Nacro H. B. Effects of burning on soil macrofauna in a savanna-woodland under different experimental fuel load treatments // Applied Soil Ecology. 2014. Vol. 81. P. 37 – 44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.04.005>

Erdős L., Batori Z., Penszka K., Dénes A., Kevey B., Kevey D., Megnes M., Sengl P., Tölgyesi C. Can naturalness indicator values reveal habitat degradation? A test of four methodological approaches // Polish Journal of Ecology. 2017. Vol. 65, iss. 1. P. 1 – 13. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2017.65.1.001>

Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: A review // Enzyme and Microbial Technology. 2004. Vol. 35, iss. 4. P. 339 – 354. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.05.006>

Heger T., Imfeld G., Mitchell E. Special issue on “Bioindication in soil ecosystems”: Editorial note // *European Journal of Soil Biology*. 2012. Vol. 49. P. 1 – 4. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.02.001>

Kazeev K. Sh., Odabashian M. Yu., Trushkov A. V., Kolesnikov S. I. Assessment of the Influence of Pyrogenic Factors on the Biological Properties of Chernozems // *Eurasian Soil Science*. 2020a. Vol. 53, № 11. P. 1610 – 1619. <https://doi.org/10.1134/S106422932011006X>

Kazeev K. Sh., Trushkov A. V., Odabashian M. Yu., Kolesnikov S. I. Postagrogenic Changes in the Enzyme Activity and Organic Carbon Content in Chernozem during the First Three Years of Fallow Regime // *Eurasian Soil Science*. 2020b. Vol. 53, № 7. P. 995 – 1003. <https://doi.org/10.1134/S1064229320070054>

Moya D., Gonzalez-De Vega S., Lozano E., Garcha-Orenes F., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M., de las Heras J. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and midterms after wild-fire // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 235. P. 250 – 256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029>

Nizhelskiy M. S., Kazeev K. Sh., Vilkoval V. V., Kolesnikov S. I. Inhibition of enzymatic activity of ordinary chernozem by gaseous products of plant matter combustion // *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55, № 6. P. 802 – 809. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060096>

Pellegrini A. F., Hobbie S. E., Reich P. B., Jumpponen A., Brookshire E. N. J., Caprio A. C., Coetsee C., Jackson R. B. Repeated fire shifts carbon and nitrogen cycling by changing plant inputs and soil decomposition across ecosystems // *Ecological Monographs*. 2020. Vol. 90, iss. 4. Article number e01409. <https://doi.org/10.1002/ecm.1409>

Qin Q., Liu Y. Changes in microbial communities at different soil depths through the first rainy season following severe wildfire in North China artificial *Pinus tabulaeformis* forest // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 280. Article number 111865. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111865>

Saenz de Miera L. E., Pinto R., Gutierrez-Gonzalez J., Calvo L., Ansola G. Wildfire effects on diversity and composition in soil bacterial communities // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 726. Article number 138636. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138636>

Schaefer M. Assessing 2,4,6-trinitrotoluene (TNT)-contaminated soil using three different earthworm test methods // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2004. Vol. 57, iss. 1. P. 74 – 80. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2003.08.005>

Sinsabaugh R. L. Phenol oxidase, peroxidase, and organic matter dynamics of soil // *Soil Biology & Biochemistry*. 2010. Vol. 42, iss. 3. P. 391 – 404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>

Swengel A. B. A literature review of insect responses to fire, compared to other conservation managements of open habitat // *Biodiversity and Conservation*. 2001. Vol. 10, iss. 7. P. 1141 – 1169. <https://doi.org/10.1023/A:1016683807033>

Terekhova V. A. Soil bioassay: Problems and approaches // *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44, № 2. P. 173 – 179. <https://doi.org/10.1134/S1064229311020141>

Vilkoval V. V., Kazeev K. Sh., Shkhatpatsev A. K., Kolesnikov S. I. Reaction of the enzymatic activity of soils of xerophytic forests on the Black Sea coast in the Caucasus to the pyrogenic impact // *Arid Ecosystems*. 2022. Vol. 12, № 1. P. 93 – 98. <https://doi.org/10.1134/S2079096122010139>

Yang Y. Z., Liu S., Zheng D., Feng S. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities // *Journal of Environmental Science*. 2006. Vol. 18, iss. 6. P. 1135 – 1141. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60051-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60051-X)

Smoke toxicity to the biota and the biological activity of soils when modeling fires

M. S. Nizhelskiy , K. Sh. Kazeev, V. V. Vilkova,
A. N. Fedorenko, S. I. Kolesnikov

Southern Federal University
105/42 Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-Don 344090, Russia

Received: 18 August 2022 / revised: 22 February 2023 / accepted: 7 March 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. The paper presents the results of our study on the effect of one type of pyrogenic factor (smoke) after burning coniferous wood chips on several bioindicators (soil enzymes, microorganisms, mesofauna, plants of agricultural crops). Exposition to smoke for 60 minutes was found to significantly affect the enzymatic activity of common chernozem. Fumigation caused a decrease in such enzymes as catalase, peroxidase, polyphenol oxidase and invertase. The enzymes of the oxidoreductase class were the most sensitive to smoke. High toxicity of gaseous combustion products to the soil flora and fauna was revealed. The acute toxicity of smoke to the bioindicators was determined as a result of fumigation. High mortality of test objects (*Eisenia fetida*, *Nauphoeta cinerea*) was recorded in our experiments. Soil microorganisms (*Azotobacter chroococcum* and *Penicillium chrysogenum*) proved to be informative after 30–120 minutes of fumigation. Resistance of plant sprouts (*Raphanus sativus*, *Triticum aestivum*, and *Pisum sativum*) to combustion gaseous products was revealed. An experiment to analyze the chemical composition of gases in smoke was performed. Such hazardous compounds as sulphur dioxide (SO₂), nitrogen oxide and dioxide (NO, NO₂), carbon monoxide (CO), acetaldehyde (C₂H₄O), formaldehyde (CH₂O), phenol (C₆H₆O) hydroxybenzene and others were found to be contained therein. Our analysis revealed that the concentrations of carbon monoxide were 714 times higher than its maximum permissible concentration (MPC), which acetaldehyde was 24,100 times higher. The nitrogen oxide and nitrogen dioxide concentrations were 100 and 300 times higher, respectively.

Keywords: pyrogenic exposure, biotesting, bioindicators, enzymes, test objects, microorganisms, toxicity, chemical composition of smoke

Funding. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment in the field of scientific activity (no. FENW-2023-0008) and with the financial support of the Leading Scientific School of the Russian Federation (NSH-449.2022.5).

For citation: Nizhelskiy M. S., Kazeev K. Sh., Vilkova V. V., Fedorenko A. N., Kolesnikov S. I. Smoke toxicity to the biota and the biological activity of soils when modeling fires. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 196–213 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-196-213>

 *Corresponding author.* Department of Ecology and Nature Management at the Academy of Biology and Biotechnology named after D. I. Ivanovsky, South Federal University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Mikhail S. Nizhelskiy: <https://orcid.org/0000-0001-6443-6039>, nizhelskiy@sfedu.ru; Kamil Sh. Kazeev: <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>, kamil_kazeev@mail.ru; Valeria V. Vilkova: <https://orcid.org/0000-0002-1374-3941>, lera.vilkova.00@mail.ru; Anastasia N. Fedorenko: <https://orcid.org/0000-0002-1690-6048>, pushok.mur@yandex.ru; Sergey I. Kolesnikov: <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>, kolesnikov@sfedu.ru.

REFERENCES

- Berdnikova L. N. The impact of dangerous and harmful factors of forest fires on the environment. *Resursosberegaiushchie tekhnologii sel'skogo khoziaistva* [Resource-Saving Technologies of Agriculture]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University Publ., 2019, iss. 11, pp. 47–55 (in Russian).
- Valkov V. F., Kazadaev A. A., Kremenitsa A. M., Suprun V. A., Sukhanova V. M., Tashchiev S. C. Influence of stubble burning on black earth biota. *Eurasian Soil Science*, 1996, no. 12, pp. 1517–1522 (in Russian).
- Valkov V. F., Kazeev K. S., Kolesnikov S. I. *Pochvy Yuga Rossii* [Soils of the South of Russia]. Rostov-on-Don, Izdatel'stvo Everest, 2008. 276 p. (in Russian).
- Galstyan A. Sh. On the stability of soil enzymes. *Eurasian Soil Science*, 1982, no. 4, pp. 108–110 (in Russian).
- Hygienic standards GN 2.1.6.3492-17. Limit Value Concentrations (LVC) of Contaminants in Atmospheric Air of Urban and Rural Settlements*. Moscow, Ministry of Justice of Russia Publ., 2018. 35 p. (in Russian).
- GOST 33036-2014. Test Methods for Chemicals of Environmental Hazard. Acute Toxicity Tests for Earthworms*. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 6 p. (in Russian).
- Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I., Akimenko Y. V., Dadenko E. V. *Metody diagnostiki nazemnykh ekosistem* [Methods of Diagnostics of Terrestrial Ecosystems]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2016. 356 p. (in Russian).
- M-14. Methodology for Measuring the Mass Concentration of Phenol in Industrial Atmospheric Emissions by the Photocolorimetric Method*. Saint Petersburg, NPPF Ekosistema Publ., 2011. 14 p. (in Russian).
- M-15. Methodology of Measurement of Mass Concentration of Sulphur Dioxide in Industrial Emissions Into Atmosphere by Photocolorimetric Method*. Saint Petersburg, NPPF Ekosistema Publ., 2001. 17 p. (in Russian).
- M-18. Methods of Measurement of Mass Concentration of Nitrogen Oxides in Industrial Emissions Into Atmosphere by Photometric Method with Griess Reagent*. Saint Petersburg, NPPF Ekosistema Publ., 2002. 15 p. (In Russian).
- M-MVI 173-06. Methods of Measuring the Mass Concentration and Determination of the Mass Emission of the Polluting Substances in the Exhaust Gases of the Fuel Combustion Installations With Gas Analyzers DAG-16, DAG-500, DAG-510*. Saint Petersburg, NII Atmosfera Publ., 2006. 25 p. (in Russian).
- Neverova O. A., Ereemeeva N. I. *Opyt ispol'zovaniia bioindikatorov v otsenke zagriazneniia okruzhaiushchei sredy* [Experience of Using Bioindicators to Estimate the Pollution of Environment]. Novosibirsk, State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006. 88 p. (in Russian).
- PND F 13.1.41-2003. Quantitative Chemical Analysis of Atmospheric Air and Atmospheric Emissions, Method for Measuring the Mass Concentration of Formaldehyde in Industrial Atmospheric Emissions by the Photometric Method With Acetylacetone*. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Anthropogenic Impact on the Environment Publ., 2012. 16 p. (in Russian).
- PND F 13.1.2:3.59-07. Methods for Measuring the Mass Concentration of the Sum of Limiting Hydrocarbons C₁₂-C₁₉ in the Air of the Sanitary Protection Zone, in the Air of the Working Zone and in Industrial Emissions by Gas Chromatographic Method*. Saint Petersburg, NII Atmosfera Publ., 2005. 17 p. (in Russian).
- PND F 13.1.2:3.23-98. Methods of Measurement of Mass Concentrations of Limiting Hydrocarbons C₁-C₅ and Unsaturated Hydrocarbons (Ethene, Propene, Butenes) in Atmospheric Air, Working Air and Industrial Emissions by Gas Chromatography*. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Anthropogenic Impact on the Environment Publ., 2005. 22 p. (in Russian).

PND F 13.1:2:3.27-99. *Methodology for the Measurement of the Mass Concentration of Carbon Monoxide and Methane by Gas Chromatography Reaction Method in Atmospheric Air, Working Air and Industrial Emissions*. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Anthropogenic Impact on the Environment Publ., 2005. 21 p. (in Russian).

PND F 12.1.1-99. *Guidelines for Sampling in Determining the Concentration of Harmful Substances (Gases and Vapours) in Emissions of Industrial Enterprises*. Moscow, State Committee for Ecology of the Russian Federation Publ., 1999. 14 p. (in Russian).

Rassadina E. V. Bioindication and its place in the system of environmental monitoring. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2007, no. 2, pp. 48–53 (in Russian).

Romanov V. V., Lyubomirova V. N. Biotesting of ecological state of soils of unauthorized landfills in Ulyanovsk region. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2009, no. 2, pp. 82–85 (in Russian).

Sinkov O. A., Pochapsky A. A. Impact of forest fires on the environment. In: *Aktual'nye problemy geotekhniki, ekologii i zashchity naseleniia v chrezvychainykh situatsiiakh* [Actual Problems of Geotechnics, Ecology and Population Protection in Emergency Situations]. Minsk, Minsk National Technical University Publ., 2017. pp. 101–103 (in Russian).

FR.1.31.2009.05508. *Methodology for Measuring the Mass Concentration of Acrolein, Butane, Butylcarbitol, Butylcellosolv, Hexane, Heptane, Decane, Dimethylformamide, Methylcellosolv, Nonane, Octane, Perchloroethylene, Carbon Disulfide, Styrene, Ethylcellosolv on Portable Gas Chromatographs FGC and PGC*. Moscow, Rosstandart Publ., 2004. (in Russian)

Federal law of 24.06.98 N 89-FZ “About production and consumption wastes” (with amendments and additions, in force since 01.03.2022) [adopted by State Duma on 22 May 1998: approved by Federation Council on 10 June 1998]. (in Russian).

Azarenko M. A., Kazeev K. Sh., Yermolayeva O. Y., Kolesnikov S. I. Changes in the plant cover and biological properties of chernozems in the postagrogenic period. *Eurasian Soil Science*, 2020, vol. 53, no. 11, pp. 1645–1654. <https://doi.org/10.1134/S1064229320110034>

Barreiro A. P., Díaz-Raviña M. Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2021, vol. 22, article number 100264. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2021.100264>

Boerner R. E. J., Giai C., Huang J., Miesel J. R. Initial effects of fire and mechanical thinning on soil enzyme activity and nitrogen transformations in eight North American forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, vol. 40, iss. 12, pp. 3076–3085. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2008.09.008>

Breg V. M., Ribeiro D., Čarni A. Vegetation as the bioindicator of human-induced degradation in karst landscape: case study of waste-filled dolines. *Acta Carsologica*, 2017, vol. 46, iss. 1, pp. 95–110. <https://doi.org/10.3986/ac.v46i1.4712>

Certini G., Moya D., Lucas-Borja M. E., Mastrodonato G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 488, article number 118989. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.118989>

Corstanje R., Schulin R., Lark R. Scale – dependent relationships between soil organic matter and urease activity. *European Journal of Soil Science*, 2007, vol. 58, iss. 5, pp. 1087–1095. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00902.x>

Doamba S. W. M. F., Savadogo P., Nacro H. B. Effects of burning on soil macrofauna in a savanna-woodland under different experimental fuel load treatments. *Applied Soil Ecology*, 2014, vol. 81, pp. 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.04.005>

Erdős L., Bátori Z., Pensza K., Dénes A., Kevey B., Kevey D., Megnes M., Sengl P., Tölgyesi C. Can naturalness indicator values reveal habitat degradation? A test of four methodological approaches. *Polish Journal of Ecology*, 2017, vol. 65, iss. 1, pp. 1 – 13. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2017.65.1.001>

Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: A review. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, vol. 35, iss. 4, pp. 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.05.006>

Heger T., Imfeld G., Mitchell E. Special issue on “Bioindication in soil ecosystems”: Editorial note. *European Journal of Soil Biology*, 2012, vol. 49, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.02.001>

Kazeev K. Sh., Odabashian M. Yu., Trushkov A. V., Kolesnikov S. I. Assessment of the Influence of Pyrogenic Factors on the Biological Properties of Chernozems. *Eurasian Soil Science*, 2020a, vol. 53, no. 11, pp. 1610–1619. <https://doi.org/10.1134/S106422932011006X>

Kazeev K. Sh., Trushkov A. V., Odabashian M. Yu., Kolesnikov S. I. Postagrogenic Changes in the Enzyme Activity and Organic Carbon Content in Chernozem during the First Three Years of Fallow Regime. *Eurasian Soil Science*, 2020b, vol. 53, no. 7, pp. 995–1003. <https://doi.org/10.1134/S1064229320070054>

Moya D., Gonzalez-De Vega S., Lozano E., Garcha-Orenes F., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M., de las Heras J. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and midterms after wildfire. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 235, pp. 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029>

Nizhelskiy M. S., Kazeev K. Sh., Vilkova V. V., Kolesnikov S. I. Inhibition of enzymatic activity of ordinary chernozem by gaseous products of plant matter combustion. *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, no. 6, pp. 802–809. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060096>

Pellegrini A. F., Hobbie S. E., Reich P. B., Jumpponen A., Brookshire E. N. J., Caprio A. C., Coetsee C., Jackson R. B. Repeated fire shifts carbon and nitrogen cycling by changing plant inputs and soil decomposition across ecosystems. *Ecological Monographs*, 2020, vol. 90, iss. 4, article number e01409. <https://doi.org/10.1002/ecm.1409>

Qin Q., Liu Y. Changes in microbial communities at different soil depths through the first rainy season following severe wildfire in North China artificial *Pinus tabulaeformis* forest. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 280, article number 111865. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111865>

Saenz de Miera L. E., Pinto R., Gutierrez-Gonzalez J., Calvo L., Ansola G. Wildfire effects on diversity and composition in soil bacterial communities. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 726, article number 138636. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138636>

Schaefer M. Assessing 2,4,6-trinitrotoluene (TNT)-contaminated soil using three different earthworm test methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, vol. 57, iss. 1, pp. 74–80. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2003.08.005>

Sinsabaugh R. L. Phenol oxidase, peroxidase, and organic matter dynamics of soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, vol. 42, iss. 3, pp. 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>

Swengel A. B. A literature review of insect responses to fire, compared to other conservation managements of open habitat. *Biodiversity and Conservation*, 2001, vol. 10, iss. 7, pp. 1141–1169. <https://doi.org/10.1023/A:1016683807033>

Terekhova V. A. Soil bioassay: Problems and approaches. *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 2, pp. 173–179. <https://doi.org/10.1134/S1064229311020141>

Vilkova V. V., Kazeev K. Sh., Shkhatpatsev A. K., Kolesnikov S. I. Reaction of the enzymatic activity of soils of xerophytic forests on the Black Sea coast in the Caucasus to the pyrogenic impact. *Arid Ecosystems*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 93–98. <https://doi.org/10.1134/S2079096122010139>

Yang Y. Z., Liu S., Zheng D., Feng S. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities. *Journal of Environmental Science*, 2006, vol. 18, iss. 6, pp. 1135–1141. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60051-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60051-X)

Оригинальная статья

УДК 556:579.26:627:8

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-214-228>

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИОБЕНТОСА В ВЕРХНЕМ БЬЕФЕ ЖИГУЛЕВСКОЙ ГЭС КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А. В. Рахуба , Н. Г. Шерышева

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН
Россия, 445003, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10*

Поступила в редакцию 22.06.2022 г., после доработки 14.01.2023 г., принята 27.02.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Представлены результаты экспедиционных исследований бактериобентоса в акватории Куйбышевского водохранилища в осенний период 2020 г. и влияние на его пространственное распределение динамики течений. Актуальность исследования определяется необходимостью изучения вопроса о внутренней нагрузке (вторичном загрязнении) крупных водоемов из донных отложений. Куйбышевское водохранилище одно из крупнейших проточных водоемов в мире, где особенности береговой конфигурации, неоднородности ложа, неустановившийся гидродинамический режим, режим наносов и его состав определяют пространственное распределение донных отложений и бактериобентосного сообщества в них, которое является важным звеном в процессах круговорота органических и биогенных веществ в экосистеме водоема. Оценка режима течений и наносов проводилась путем расчетов на 2D математической модели Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища, реализованной в программном комплексе «ВОЛНА». Проведена верификация модели и серия численных расчетов скорости течений с учетом режима регулирования расходов воды на гидроузлах. Получена пространственная геометрия течений и динамика распределения расхода наносов. По данным экспедиционных исследований получена общая численность и биомасса бактерий, которые варьировали в пределах $2.47 - 27.55 \times 10^9$ кл/мл и $0.10 - 2.43$ мкг/г соответственно. В результате проведенных исследований были выявлены закономерности пространственного распространения бактериального сообщества в акватории Приплотинного плеса водохранилища и установлен характер связи общей численности бактерий с темпом осадконакопления, скоростью течения, содержанием в донных отложениях органического вещества. Показано влияние зон циркуляции течений в мелководных акваториях на характер распределения донных отложений и изменение количественных характеристик бактериобентоса.

Ключевые слова: бактериобентос, осадконакопление, скорость потока, органическое вещество, типы донных отложений

Финансирование. Работа выполнена в рамках разделов государственного задания Института экологии Волжского бассейна РАН – филиала Самарского научного центра РАН (№ 1021060107212-5-1.6.20 и 1021060107175-5-1.6.19).

 Для корреспонденции. Лаборатория мониторинга водных объектов Института экологии Волжского бассейна РАН.

ORCID и e-mail адреса: Рахуба Александр Владимирович: <https://orcid.org/0000-0002-1770-3197>, rahavum@mail.ru; Шерышева Наталья Григорьевна: <https://orcid.org/0000-0002-4161-1938>, sapfir-sherry@yandex.ru.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Для цитирования. Рахуба А. В., Шершьева Н. Г. Влияние гидродинамических условий на распределение бактериобентоса в верхнем бьефе Жигулевской ГЭС Куйбышевского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 214 – 228. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-214-228>

ВВЕДЕНИЕ

Изучение гидродинамического режима водных экосистем необходимо для правильного понимания закономерностей пространственной организации сообществ водных организмов. Проведен ряд исследований, доказывающих влияние гидродинамического режима на различные группы гидробионтов. Так, было показано, что одним из важнейших факторов, определяющих распределение рыб в Чебоксарском водохранилище, является гидродинамическая активность водных масс водохранилища (Герасимов и др., 2014). На примере Куйбышевского водохранилища установлено, что биомасса фитопланктона меняется по степенному закону с изменением средних скоростей течения (Рахуба, 2020). Распределение планктона и рыб в водохранилищах Волжского каскада (Иваньковского, Углицкого, Рыбинского, Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского) определяется направленностью водного потока и характером циркуляции вод (Поддубный, 2000). В эстуарных акваториях Белого моря изучено количественное распределение зоопланктона в зависимости от приливно-отливных явлений и разнонаправленных течений и отмечается возможность выбора зоопланктонными организмами потоков и течений, обеспечивающих им выживание (Примаков, 2008). Скорость придонного потока является одним из основных факторов, определяющих количественные характеристики бентоса. Гидродинамические характеристики определяют изменения сообществ макрозообентоса (Лабай, 2007). Предполагается, что вертикальное распределение численности и биомассы инфузорий в Климовской узости Куйбышевского водохранилища обусловлено нестабильным характером гидрологического режима (Быкова, Андреева, 2021). Наглядно продемонстрирована роль гидродинамических процессов в происхождении и формировании грунтового комплекса в системе водохранилищ Волжско-Камского каскада (Законнов и др., 2018), являющихся экологической нишей для различных бентосных организмов.

Исследования влияния динамики вод на бактериальные популяции малочисленны и они касаются в основном бактериопланктона. Так, при микробиологическом исследовании северо-восточной части Тропической Атлантики (Гордиенко, Ерохин, 2018), было установлено, что сложная динамическая структура вод предопределяет не менее сложную структуру гидрофизических и гидрохимических полей, что, в свою очередь, обуславливает все особенности в распределении численности, биомассы и интенсивности размножения бактериопланктона. Авторами исследования гетеротрофного бактериопланктона в эстуарии Енисея (Мошарова и др., 2016) сделано предположение, что пространственное распределение бактерий в исследованной акватории определяется, в первую очередь, гидродинамическими процессами, а не содержанием в воде биогенных элементов. Исследователями Карского моря предлагается проследить влияние основных течений шельфа моря

на распределение обилия и видового состава гетеротрофных микроорганизмов (Романова, Сажин, 2018).

Таким образом, показано влияние гидродинамических условий на различные группы обитателей водной среды, причем под гидродинамическими условиями выступали в основном общие характеристики течений без применения количественных гидродинамических показателей.

Относительно бактериобентоса, достаточно много работ посвящено исследованию различных экологических аспектов жизнедеятельности (структуры и функционирования) донных бактериальных сообществ, однако гидродинамика в качестве экологического фактора не рассматривалась. Бактериобентос является важным компонентом водной экосистемы, выполняющим основную деструкционную функцию. Установлено, что наиболее значимыми абиотическими факторами для жизнедеятельности бактериобентосных популяций являются качественный состав органического вещества, редокс-потенциал, активная реакция среды (рН), температура (Дзюбан, 2010), гранулометрический состав, типы донных отложений (Шерышева, 2021). Однако роль гидродинамических процессов в жизнедеятельности донных бактерий остается наименее изученной. Ранее отмечалось, что гидродинамическое воздействие на бентическое бактериальное сообщество представляется вероятным, но его еще предстоит доказать дальнейшими исследованиями (Rusch et al., 2003). На наш взгляд, представляется, что гидродинамический режим выступает одним из ведущих условий пространственной организации бактериобентосных сообществ не только локально, но и в широких региональных и географических масштабах. В связи с этим методологическим обоснованием наших исследований предложена концепция, что кроме отмеченных выше показателей основополагающим фактором для формирования структуры бактериобентоса являются гидродинамические условия среды обитания.

Цель данной работы – исследование влияния гидродинамического фактора на формирование пространственной структуры бактериобентоса в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Гидрологические и микробиологические исследования Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища проводились с 14.09.20 по 03.10.20 г. Институтом экологии Волжского бассейна РАН. Пробы донных отложений отбирали с поверхностных горизонтов 0 – 5 см с помощью трубчатого микробентометра С-1. Всего исследовано 19 станций (рис. 1).

Гранулометрический анализ грунтов проводили комбинированным способом: влажным просеиванием через сита и методом осаждения (Буторин, 1975; Кузяхметов и др., 2004; Законнов и др., 2018). Выделяли следующие размерные фракции механического состава: крупного песка > 1 мм, среднего и мелкого песка 1.0 – 0.1 мм, алеврита 0.1 – 0.01 мм, пелита < 0.01 мм (Законнов и др., 2018). Типы грунтов идентифицировали по: (Законнов и др., 2018). Содержание органического вещества определяли по потерям при прокаливании (Аринушкина, 1970): пробы грунта прокачивали в муфельной печи при температуре 700°C в течение одного

часа после предварительного высушивания грунтов в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 10 часов.

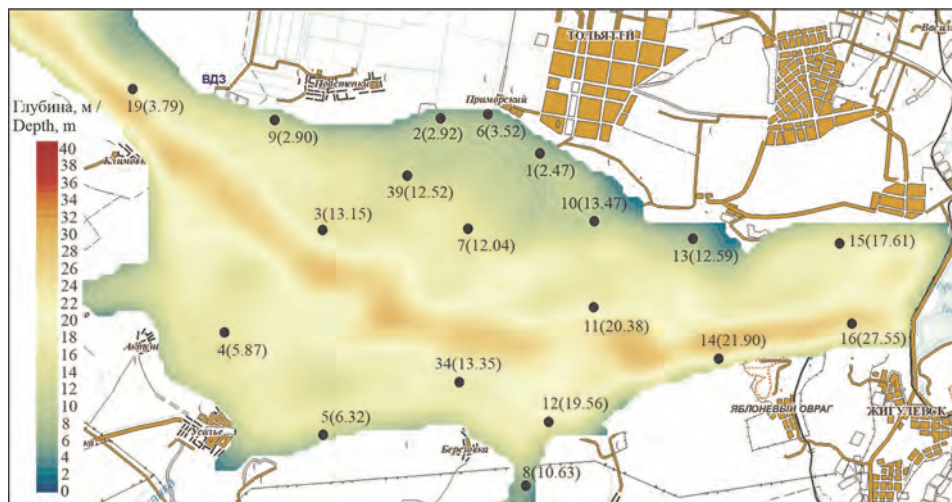


Рис. 1. Карта глубин Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища и отмеченные на ней номера станций отбора проб донных отложений, в скобках показана численность бактериобентоса ($\times 10^9$ кл/мл)

Fig. 1. Depth map of the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir and the numbers of stations for sampling bottom sediments marked thereon, the abundance of bacteriobenthos ($\times 10^9$ cells mL⁻¹) is shown in brackets

Для микробиологических исследований в момент отбора пробы грунта фиксировали 25%-ным раствором глутаральдегида до конечной концентрации 2.5%. Фиксированную и суспензированную пробу объемом 0.5 мл из разведения 1:1000 фильтровали через ядерные фильтры с диаметром пор 0.2 мкм (ОИЯИ РАН, г. Дубна, Россия), окрашенные суданом черным. Определение численности и биомассы бактерий проводили с использованием флуоресцентной микроскопии с помощью красителя флуоресцеинизотиона (FITC) (Гальченко, 2001). Подсчет и измерение размеров бактериальных клеток проводили с помощью микроскопа Leica CTR 5500 (Leica Microsystems, Германия) при увеличении $\times 1000$ в 20 полях зрения. Для определения биомассы бактерий измеряли линейные размеры 400 – 500 клеток в каждой пробе. Биомассу бактериальных клеток рассчитывали по формуле:

$$B = N \times V,$$

где B – биомасса, мкг/г; N – численность, млрд кл/мл; V – объем, мкм³. Удельный вес бактериальной клетки принимали равным 1. Объем клеток рассчитывали по формулам объема геометрических фигур (шара, эллипсоида и цилиндра).

Для расчета динамики течений (V) и осадконакопления (ОН) в Приплотинном плесе использовалась 2D-модель Куйбышевского водохранилища, разработанная на основе программного комплекса «ВОЛНА» (Рахуба и др., 2018; Рахуба, 2020).

Расчеты выполнялись на период летне-осенней межени для среднего по водности года с заданием ветрового воздействия на акваторию водоема. Пространственный размер шага сетки модели составил 200 м с расчетным шагом по времени 5 с.

Для установления связей между параметрами применялся коэффициент корреляции Пирсона (r) при уровне значимости $p < 0.05$. Все расчеты проводили с применением пакетов программ Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corp., USA) и Statistica 7 (StatSoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидродинамика. Сочетание стоковых и ветровых течений на мелководье и в глубоководных частях водохранилища приводит к неоднородному распределению в них донных отложений. Скорости течений выше средних формируют основной гранулометрический скелет, а меньше средних – насыщают его структуру тонкодисперсными частицами (Законнов и др., 2018).

Численные расчеты на математической модели показывают, что в Приплотинном плесе водохранилища циркуляции течений возникают при ветрах выше 10 м/с, в основном южного направления (рис. 2). Согласно подводному рельефу ложа плеса и структуре течений выделяется три основные гидродинамические зоны. Первые две – это зоны мелководий на левом и на правом берегу. Третья зона начинается с северо-западной части плеса (Климовское сужение акватории), далее проходит по центральной глубоководной части и заканчивается, примыкая к правому берегу и плотине Жигулевской ГЭС. На левобережном мелководье формиру-

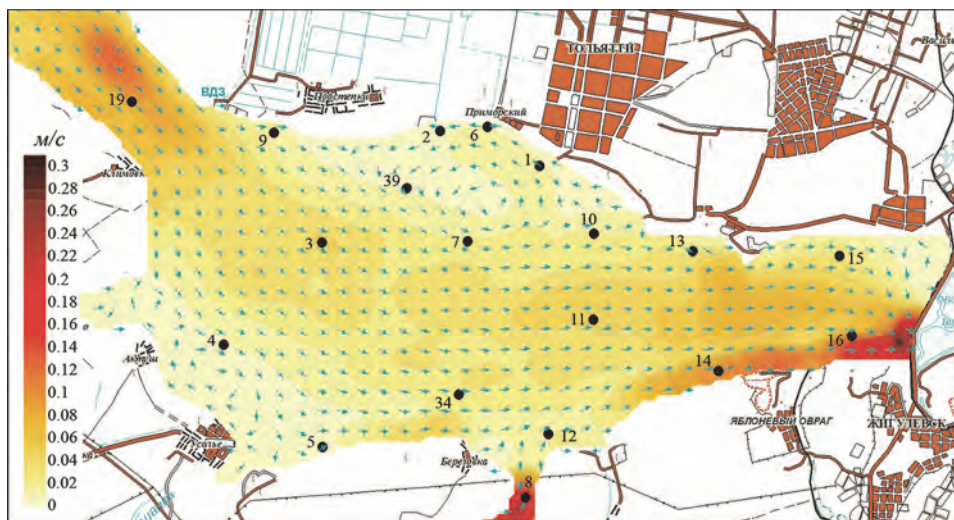


Рис. 2. Расчетное поле скорости течения (м / с) в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища

Fig. 2. Calculated field of flow velocities (m / s) in the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir

ется один большой вихрь течения циклональной направленности. В правобережной зоне мелководья течение разбивается на два вихря меньшей площади антициклональной направленности. Орбитальные скорости циркуляций течений здесь достигают 0.01 – 0.03 м/с. Наибольшие скорости течений представлены стоковыми течениями в верхнем створе сужения акватории плеса – 0.1 – 0.2 м/с и замыкающем створе перед плотиной – 0.3 м/с и выше. В центральной глубоководной части скорости стокового течения не превышают 0.03 – 0.05 м/с.

Согласно картине направления и распределения полей динамики стокового и ветровых течений в Приплотинном плесе осадконакопление концентрируется в глубоководной части плеса. Высокие скорости течения в Климовском сужении и в правобережном русле перед плотиной способствуют хорошей промываемости дна. Напротив, выраженные области циркуляций у левого и правого берега выносят взвешенные наносы в центральную часть плеса. У плотины ГЭС на участке верхнего бьефа с максимальными глубинами и максимальными скоростями течения формируется зона активного перемешивания водной массы.

Донные отложения Приплотинного плеса представлены песками, песчанистыми илами и илистыми отложениями. Установлено, что гидродинамические процессы и морфометрические особенности водоема определяют направленность путей формирования донных отложений (Законнов, 2016). В соответствии с этим в литоральной части левобережного мелководья (до 8-метровой изобаты) под воздействием стоковых, приливно-отливных и ветровых течений распространены среднезернистые и мелкозернистые пески, заиленные пески. В сублиторали до глубин 10 – 16 м под воздействием стоковых течений накапливаются песчанистые илы. В центральной глубоководной зоне, где однонаправленное течение, и вдоль правого берега плеса (до 20-метровой изобаты) залегают серые мелкоалевритовые и алевритовые илы. На правом берегу обнаружены локальные участки илов, включающие размытые породы доломита и мергеля, что придает илам белесый (меловой) оттенок. В прибрежных участках правобережья встречаются биотопы, на которых донные отложения плотно покрыты дрейссеной, или с синезелеными водорослями в наилках и на поверхности грунта. Механический состав донных отложений плеса характеризует тенденцию увеличения дисперсности частиц от прибрежной мелководной зоны к центральной глубоководной зоне. Так, содержание пелитовых частиц размером < 0.01 мм увеличивается в поперечном направлении от берегов к центральной части водоема (таблица). Сумма тонкодисперсных (алевритовых и пелитовых) фракций в осадках на левом берегу в среднем составляет 19.9%, увеличивается на правом берегу до 49.5% и достигает максимальных значений в центральной глубоководной части – 52.2%. В результате в центральной зоне происходит процесс илонакопления, сопровождающийся обогащением профундальных илов органическим веществом, необходимым для жизнедеятельности бактериобентоса. Естественным процессом в трансформации взвешенных веществ из различных источников является их интегральное перемешивание и аккумуляция на дне водоема в виде донных осадков (Законнов, 2007, 2019).

Физико-химические показатели донных отложений, гидродинамические характеристики, численность и биомасса бактериобентоса в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища осенью 2020 г.

Table. Physicochemical indicators of bottom sediments, hydrodynamic characteristics, numbers and biomass of bacteriobenthos in the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir in the autumn of 2020

№ станций / Station no.	Пелит, % / Pelit, % < 0.01 мм	ОВ, % / ОМ, %	$N \times 10^9$, кл/мл / cl/ml	B , мкг/г / $\mu\text{g/g}$	ОН, мм/год / SA, mm/year	V , м/с / m/s
1	0.07	2.3	2.47	0.10	0.13	0.016
2	6.37	2.1	2.92	0.60	0.11	0.009
3	14.04	10.0	13.15	1.37	0.62	0.048
4	14.49	10.4	5.87	0.66	0.34	0.024
5	13.87	7.7	6.32	0.67	0.12	0.018
6	1.9	0.7	3.52	0.85	0.08	0.008
7	11.9	10.1	12.04	1.63	0.51	0.041
8	18.42	8.8	10.63	1.22	0.24	0.026
9	13.54	6.5	2.90	0.22	0.33	0.028
10	5.75	3.0	13.74	1.93	0.63	0.047
11	13.49	11.0	20.38	2.58	0.86	0.064
12	13.06	10.4	19.56	1.72	0.14	0.021
13	2.44	2.4	12.59	1.26	0.67	0.051
14	15.50	9.7	21.90	2.06	0.49	0.118
15	7.05	7.2	17.61	1.80	0.50	0.032
16	13.67	12.7	27.55	2.23	1.86	0.239
19	6.17	5.8	3.79	1.09	0.50	0.061
34	10.34	10.9	13.35	1.68	0.43	0.034
39	20.92	13.3	12.52	1.32	0.41	0.032

Примечание. ОВ – содержание органического вещества, N – общая численность бактерий, B – биомасса бактерий, ОН – осадконакопление, V – скорость течения.

Note. OM is the content of organic matter, N the total abundance of bacteria, B the biomass of bacteria, SA the sediment accumulation, V is flow velocity.

Органическое вещество (ОВ) служит основным пищевым субстратом для массовых групп бактериобентоса. В донных отложениях Приплотинного плеса наименьшие значения ОВ регистрировались в песках и илистых песках левого побережья – $3.75 \pm 0.83\%$, причем минимальные – $1.70 \pm 0.49\%$ в зоне левобережной циркуляции на участке обратного вдольберегового течения (ст. 2, 6, 1). На русловых станциях правого берега содержание органического вещества составило $10.18 \pm 0.78\%$, при этом наименьшее среднее значение 9.05% обнаружено также в зоне правобережных циркуляций течений (ст. 4 и 5). Серые илы в средней глубоководной зоне наиболее обогащены органическим веществом – $11.06 \pm 0.58\%$. Из полученных данных следует, что органическое вещество оседает в основном в центральной глубоководной зоне, формируя зону илонакопления или зону аккумуляции.

Наличие зон аккумуляции биогенных элементов обусловлено особенностью гидродинамической активности водных масс, соотношением и направлением течений различной природы (Герасимов, 2014). В Приплотинном плесе на участках вихревых образований течений на левом и правом берегу происходит смыв с по-

верхности грунта наилка, детрита, тонкодисперсной взвеси, алевритовых и пелитовых частиц, которые вовлекаются в более мощный центральный водный поток. Далее в процессе седиментации смытый «питательный» материал оседает на дно благодаря снижению скорости течения в придонных слоях, где аккумулируются илы, обогащенные питательным материалом. Обнаружено, что органическое вещество положительно коррелирует с глубиной водоема ($r = 0.72$, $p = 0.0005$) и с тонкодисперсными фракциями механического состава осадков – алевритовой ($r = 0.71$, $p = 0.0007$) и пелитовой ($r = 0.85$, $p = 0.0001$). Из гидродинамических характеристик выявлены положительные корреляции осадконакопления со скоростью течения ($r = 0.91$, $p = 0.0001$) и с глубиной водоема ($r = 0.54$, $p = 0.017$).

Пространственное распределение бактериобентоса. Общая численность бактерий (N) в донных отложениях по направлению от Климовской узости до плотины увеличивалась от 2.47 до 27.55×10^9 кл/мл, биомассы (B) – от 0.10 до 2.23 мкг/г. Рис. 3 демонстрирует изменение общей численности бактериобентоса и содержания органического вещества в поверхностных донных слоях на акватории Приплотинного плеса. Корреляционный анализ массива данных выявил достоверные положительные корреляции содержания органического вещества в грунтах с общей численностью ($r = 0.60$, $p = 0.007$) и биомассой ($r = 0.51$, $p = 0.026$) бактерий.

В пространственном распределении бактериобентоса целесообразно выделить два направления: поперечный профиль на участке максимального расширения озеровидной части плеса и продольные профили вдоль стокового течения от Климовской узости к плотине, включая левый берег и вектор от Усинского залива до плотины по правому берегу (см. рис. 2).

Вдоль поперечного профиля происходит увеличение количественных показателей бактерий от берегов к центральной зоне илонакопления. Так, песчанистые грунты на мелководье левого побережья на участке обратного течения характеризуются минимальной численностью ($2.95 \pm 0.21 \times 10^9$ кл/мл) и биомассой (0.44 ± 0.17 мкг/г) бактерий. Важным фактором, влияющим на численность бактериобентоса, является стабильность донных отложений. Снижение численности бактерий на песках и заиленных песках объясняется повышенной подвижностью грунтов. Дно мелководья на этом участке подвергается наибольшему воздействию динамических факторов, угнетающих развитие бактерио-

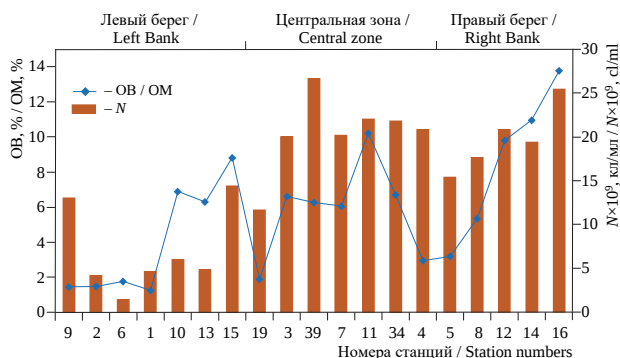


Рис. 3. Общая численность (N) бактерий и содержание органического вещества (ОВ) в донных отложениях Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища осенью 2020 г.

Fig. 3. Total numbers (N) of bacteria and the content of organic matter (OM) in the bottom sediments of the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir in the autumn of 2020

бентоса: обратное течение, внешнее воздействие ветрового волнения и суточного колебания уровня воды в плесе. В серых мелкоалевритовых илах в центральной зоне илонакопления численность бактерий увеличивается до $14.29 \pm 1.51 \times 10^9$ кл/мл, а биомассы – до 1.72 ± 0.22 мкг/г. Стоковое течение здесь отличается однонаправленностью по глубине с постепенным уменьшением скорости по вертикали от поверхности ко дну (Поддубный, 2000), что способствует накоплению пищевого субстрата в илах и, как следствие, развитию бактериобентоса. На правом берегу в серых алевритовых илах, в зоне вихревых течений (ст. 4, 5), численность и биомасса бактерий вновь снижается до $6.10 \pm 0.22 \times 10^9$ кл/мл и 0.67 ± 0.01 мкг/г.

Вдоль продольного профиля развивается тенденция увеличения количественных показателей бактериобентоса вниз по течению к зоне подпора. В переходной зоне от литоральных илов к профундальным вдоль левого берега под воздействием стокового течения и ветрового волнения формируются заиленные пески и песчанистые илы. Численность и биомасса бактерий на этом участке составляет $13.17 \pm 0.46 \times 10^9$ кл/мл и 1.60 ± 0.27 мкг/г соответственно. В серых алевритовых илах правобережья от впадения р. Уса по направлению к плотине (ст. 12, 14) численность и

биомасса бактерий увеличивается до $15.10 \pm 4.38 \times 10^9$ кл/мл и 1.47 ± 0.24 мкг/г соответственно, по сравнению с аналогичными показателями в зоне вихревых течений (ст. 4, 5). Донные отложения здесь обогащаются за счет внесения питательных веществ с притоком р. Уса. В зоне подпора около плотины с максимальными скоростями течения и максимальными глубинами в условиях перемешивания водных масс регистрировались максимальные значения численности ($22.7 \pm 0.78 \times 10^9$ кл/мл) и биомассы (2.15 ± 0.08 мкг/г) бактерий.

При исследовании активности и распределения бактериальных популяций в песчанистых отложениях шельфа Среднеатлантического залива (Rusch et al., 2003) авторы обращают внимание на возможную адаптацию популяции донных бактерий к гидродинамическим условиям. Наблю-

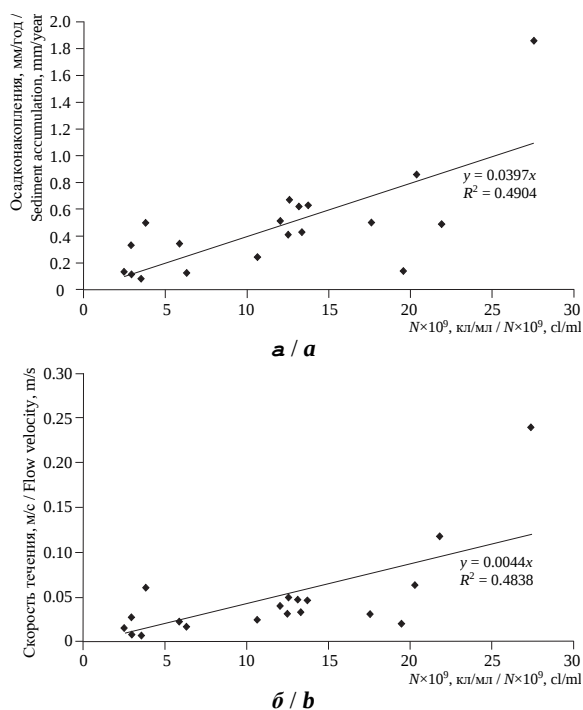


Рис. 4. Зависимость величин осадконакопления (а) и скорости течения (б) от общей численности (N) бактерий
Fig. 4. Dependence of sedimentation values (a) and flow velocity (b) on the total numbers (N) of bacteria

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

дения на приливно-отливной песчаной отмели показали, что максимальное количество бактерий скапливается в глубинных отложениях, менее подверженных воздействию волн и донных течений по сравнению с мелководьями, подверженными гидродинамическому стрессу, но это не нашло прямой поддержки ввиду ограниченного набора гидродинамических данных. Данное предположение подтверждается нашими исследованиями. Так, установлена связь гидродинамических характеристик (осадконакопления и скорости течения) с численностью бактериобентоса (рис. 4).

Нами выявлены корреляции, подтверждающие влияние гидродинамического режима плеса на пространственную организацию бактериобентосного сообщества. Так, общая численность и биомасса бактерий положительно коррелирует с осадконакоплением ($r = 0.70$, $p = 0.0008$ и $r = 0.63$, $p = 0.004$) скоростью потока ($r = 0.70$, $p = 0.0008$ и $r = 0.56$, $p = 0.013$). Из полученных результатов следует, что под влиянием гидродинамических условий организуется две закономерные траектории с градиентом увеличения численности и биомассы бактерий в пространственном распределении бактериобентоса по донному ложу плеса: вдоль поперечного профиля – от противоположных побережий к центральной оси и вдоль продольного профиля – от Климовской узости к плотине ГЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под воздействием гидродинамических условий формируется два направления закономерных изменений численности и биомассы бактерий – вдоль поперечного и продольного профилей плеса. С учетом влияния гидродинамических характеристик, типа донных отложений и количественных показателей бактериобентоса целесообразно выделить зоны интегрального районирования пространственной организации бактериобентоса:

- 1) зоны вихревых циркуляций течений с минимальным развитием бактериобентоса, обусловленные гидродинамической активностью водных масс и подвижность грунта;
- 2) переходную зону от литорали к профундали с увеличением численности и биомассы бактерий;
- 3) центральную зону илонакопления с высокими количественными показателями бактериального сообщества;
- 4) зону активного перемешивания у плотины ГЭС с максимальными глубинами, скоростями течения и максимальными численностями бактериобентоса.

Таким образом, гидродинамические условия являются важным фактором наряду с другими (типом донных отложений, качественным составом органического вещества, температурой, редокс-потенциалом, pH среды), организующим векторы распространения бактериобентоса, вдоль которых формируются специфические устойчивые закономерности изменения количественных показателей бактериобентосных сообществ.

На основании полученных результатов целесообразно предположить общэкологическую закономерность – пространственное распределение бактериобентоса можно рассматривать как интегральную функцию от комплекса факторов:

переменных динамического потока (скорости течения и осадконакопления), типа донных отложений, глубины и содержания органического вещества в грунтах, ветровых волнений и других абиотических факторов. Данная концепция требует дополнительных исследований и подтверждения на других плесах Куйбышевского водохранилища и водных объектах водохранилищного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета, 1970. 487 с.

Буторин Н. В., Зиминова Н. А., Курдин В. П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. 159 с.

Быкова С. В., Андреева В. А. Пространственно-временное распределение инфузорий планктона Куйбышевского водохранилища в районе Климовской узкости // Поволжский экологический журнал. 2021. № 2. С. 146 – 162. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-146-162>

Гальченко В. Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.

Герасимов Ю. В., Поддубный С. А., Малин М. И., Цветков А. И. Влияние гидродинамических условий на распределение рыб в Чебоксарском водохранилище // Вопросы рыболовства. 2014. Т. 15, № 3. С. 295 – 305.

Гордиенко А. П., Ерохин В. Е. Эколого-физиологические характеристики бактериопланктона в связи с особенностями динамики вод // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2018. Кн. 1. С. 246 – 250.

Дзюбан А. Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 192 с.

Законнов В. В. Осадконакопление в водохранилищах Волжского каскада: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2007. 39 с.

Законнов В. В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2016. Вып. 75 (78). С. 30 – 40.

Законнов В. В., Законнова А. В., Цветков А. И., Шерышева Н. Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 35 – 46.

Законнов В. В., Иванов Д. В., Хасанов Р. Р., Законнова А. В., Маланин В. В., Марасов А. А. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 6. Донные отложения Куйбышевского водохранилища и их картирование с использованием геоинформационных технологий // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 72 – 89.

Кузяхметов Г. Г., Мифтахова А. М., Киреева Н. А., Новоселова Е. И. Практикум по почвоведению: учеб. пособие. Уфа: Башкирский государственный университет, 2004. 120 с.

Лабай В. С. Распределение бентоса в нижней ритрале р. Поронай под воздействием некоторых абиотических факторов среды // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО. 2007. Т. 9. С. 184 – 206.

Мошарова И. В., Ильинский В. В., Мошаров С. А. Состояние гетеротрофного бактериопланктона эстуария реки Енисей и зоны Обь-Енисейского речного выноса в осенний период в связи с факторами окружающей среды // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, №. 2. С. 202 – 215.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Поддубный С. А. Гидрологические условия формирования и повышения биологической продуктивности экосистем Волжских водохранилищ: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2000. 42 с.

Примаков И. М. Распространение планктонных организмов приливных губ Белого моря под влиянием гидродинамических условий // Труды Зоологического института РАН. 2008. Т. 312, № 1/2. С. 135 – 144.

Рахуба А. В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. 2020. Т. 162, кн. 3. С. 430 – 444. <https://doi.org/10.26907/2542-064x.2020.3.430-444>

Рахуба А. В., Шмакова М. В. Численное моделирование заиления Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 35 – 48.

Романова Н. Д., Сажин А. Ф. Гетеротрофный микропланктон южной оконечности жемчужины Святой Анны в осенний период (Карское море) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 3. С. 116 – 129. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).8)

Шерышева Н. Г. Пространственное распределение бактериобентоса в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в осенний период // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. Т. 23, № 5. С. 152 – 159.

Rusch A., Huettel M., Reimers C. E., Taghon G. L., Fuller C. M. Activity and distribution of bacterial populations in Middle Atlantic Bight shelf sands // FEMS Microbiology Ecology. 2003. Vol. 44, iss. 1. P. 89 – 100. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2003.tb01093.x>

Influence of hydrodynamic conditions on the bacteriobenthos distribution in the upper reaches of the Zhiguli hydroelectric power station of the Kuibyshev reservoir

A. V. Rakhuba , N. G. Sherysheva

*Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Institute of Ecology of the Volga River Basin of Russian Academy of Sciences
10 Komzina St., Togliatti 445003, Russia*

Received: 22 June 2022 / revised: 14 January 2023 / accepted: 27 February 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. The paper presents the results of our expedition studies of bacteriobenthos in the water area of the Kuibyshev reservoir in the autumn period of 2020 and the influence of the dynamics of currents on its spatial distribution. The relevance of the study is determined by the need to study the internal load (secondary pollution) of large reservoirs from bottom sediments. The Kuibyshev reservoir is one of the largest flowing reservoirs in the world, where features of the coastal configuration, the heterogeneity of the bed, the unsteady hydrodynamic regime, the sediment regime and its composition determine the spatial distribution of bottom sediments and the bacteriobenthos community therein, which is an important link in the circulation processes of organic and biogenic substances in the ecosystem of the reservoir. An assessment of the regime of currents and sediments was carried out by calculation on a 2D mathematical model of the Priplotinny Reach of the Kuibyshev reservoir, implemented in the software package “VOLNA”. The model was verified, and a series of numerical calculations of the flow velocity was carried out taking into account the regime of water flow control at hydraulic units. The spatial geometry of the currents and the sediment flow distribution dynamics were obtained. According to the data of our expedition studies, the total numbers and biomass of bacteria were estimated, which varied in the range of $(2.47\text{--}27.55) \times 10^9$ cells mL^{-1} and $0.10\text{--}2.43$ $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectively. As a result of the conducted studies, patterns of the spatial distribution of the bacterial community in the water area of the Priplotinny Reach of the reservoir were revealed, and the nature of the relationship between the total numbers of bacteria and the sedimentation rate, the flow velocity, and the content of organic matter in bottom sediments was established. The influence of the circulation zones of currents in shallow waters on the nature of the distribution of bottom sediments and changes in the quantitative characteristics of bacteriobenthos is shown.

Keywords: bacteriobenthos, sedimentation, flow rate, organic matter, types of bottom sediments

Funding. The work was carried out within the framework of the sections of the state task Institute of Ecology of the Volga River Basin – the Branch of the Samara Scientific Center of Russian Academy of Science (no. 1021060107212-5-1.6.20 and 1021060107175-5-1.6.19).

For citation: Rakhuba A. V., Sherysheva N. G. Influence of hydrodynamic conditions on the bacteriobenthos distribution in the upper reaches of the Zhiguli hydroelectric power station of the Kuibyshev reservoir. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 214–228 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-214-228>

 *Corresponding author.* Laboratory of Monitoring of Water Bodies of the Institute of Ecology of the Volga River Basin of Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Aleksandr V. Rakhuba: <https://orcid.org/0000-0002-1770-3197>, rahavum@mail.ru; Natalia G. Sherysheva: <https://orcid.org/0000-0002-4161-1938>, sapfir-sherry@yandex.ru.

REFERENCES

- Arinushkina E. V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Manual on Chemical Analysis of Soils]. Moscow, Moscow University Press, 1970. 487 p. (in Russian).
- Butorin N. V., Semenova N. A., Kurdin V. P. *Donnye otlozheniya verkhnevolzhskikh vodokhranilishch* [Bottom Sediments of the Upper Volga Reservoirs]. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 159 p. (in Russian).
- Bykova S. V., Andreeva V. A. Spatiotemporal distribution of planktonic ciliates in the Kuybyshev water reservoir in the area of Klimovskaya narrowing. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 2, pp. 146–162 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-146-162>
- Galchenko V. F. *Methanotrophic Bacteria*. Moscow, GEOS Publ., 2001. 500 p. (in Russian).
- Gerasimov Yu. V., Poddubny S. A., Malin M. I., Tsvetkov A. I. The influence of hydrodynamic conditions on fish distribution in Cheboksary reservoir. *Problems of Fisheries*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 295–305 (in Russian).
- Gordienko A. P., Erokhin V. E. Ecological and physiological characteristics of bacterioplankton in connection with the peculiarities of water dynamics. In: *Biodiagnostika sostoianiya prirodnikh i prirodno-tekhnogennykh sistem: materialy XVI Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Biodiagnostics of the State of Natural and Natural-Technogenic Systems: Materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]. Kirov, Vyatka State University Publ., 2018, book 1, pp. 246–250 (in Russian).
- Dzyuban A. N. *Destruktsiya organicheskogo veshchestva i tsikl metana v donnykh otlozheniyakh vnutrennikh vodoemov* [Destruction of Organic Matter and Methane Cycle in Bottom Sediments of Inland Reservoirs]. Yaroslavl, Printhouse Publ., 2010. 192 p. (in Russian).
- Zakonnov V. V. *Sedimentation in Reservoirs of the Volga Cascade*: Thesis Diss. Dr. Sci. (Geogr.). Moscow, 2007. 39 p. (in Russian).
- Zakonnov V. V. Silt accumulation in the reservoir system of the Volga cascade. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences*, 2016, iss. 75 (78), pp. 30–40 (in Russian).
- Zakonnov V. V., Zakonnova A. V., Tsvetkov A. I., Sherysheva N. G. Hydrodynamic processes and their role in formation of bottom sediments in reservoirs of the Volga–Kama cascade. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences*, 2018, iss. 81 (84), pp. 35–46 (in Russian).
- Zakonnov V. V., Ivanov D. V., Khasanov R. R., Zakonnova A. V., Malanin V. V., Marasov A. A. Spatial-temporal transformation of the Volga Reservoirs' soil complex. Communication 6. The Kuybyshev Reservoir bottom sediments and their mapping with the use of geo/information techniques. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2019, no. 2, pp. 72–89 (in Russian).
- Kuzyakhmetov G. G., Miftakhova A. M., Kireeva N. A., Novoselova E. I. *Praktikum po pochvovedeniiu: uchebnoe posobie* [Practical Training in Soil Science: Textbook]. Ufa, Bashkir State University Publ., 2004. 120 p. (in Russian).
- Labay V. S. Benthos distribution in the lower rithral of the Poronai River under the impact of some abiotic environmental factors. *Water life Biology, Resources Status and Condition of Inhabitation in Sakhalin-Kuril Region and Adjoining Water Areas: Transactions of the "SakhNIRO"*, 2007, vol. 9, pp. 184–206 (in Russian).
- Mosharova I. V., Ilyinsky V. V., Mosharov S. A. State of heterotrophic bacterioplankton of Yenisei estuary and the zone of Ob–Yenisei discharge in autumn in relation with environmental factors. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 2, pp. 341–352.
- Poddubny S. A. *Hydrological Conditions for the Formation and Increase of the Biological Productivity of the Ecosystems of the Volga Reservoir*: Thesis Diss. Dr. Sci. (Geogr.). Moscow, 2000. 42 p. (in Russian).

Primakov I. M. Distribution of planktonic organisms of the tidal lips of the White Sea under the influence of hydrodynamic conditions. *Proceedings of the Zoological Institute of the RAS*, 2008, vol. 312, no.1/2, pp. 135–144 (in Russian).

Rakhuba A. V. Assessment of the influence exercised by the hydrodynamic regime on the phytoplankton development and the water quality of the Kuibyshev Reservoir. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 3, pp. 430–444 (in Russian). <https://doi.org/10.26907/2542-064x.2020.3.430-444>

Rakhuba A. V., Shmakova M. V. Numerical modeling of siltation of the dambed of the Kuibyshev reservoir by river sediments. *Meteorology and Hydrology*, 2018, no. 1, pp. 35 – 48 (in Russian).

Romanova N. D., Sazhin A. F. Heterotrophic microplankton of the southern tip of the St. Anna trench in the autumn period (Kara Sea). *Journal of Oceanological Research*, 2018, vol. 46, no. 3, pp. 116–129 (in Russian). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).8)

Sherysheva N. G. Spatial distribution of bacteriobenthos in the Priplotinny reach of the Kuibyshev reservoir in autumn. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2021, vol. 234, no. 5, pp. 152–159 (in Russian).

Rusch A., Huettel M., Reimers C. E., Taghon G. L., Fuller C. M. Activity and distribution of bacterial populations in Middle Atlantic Bight shelf sands. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, vol. 44, iss. 1, pp. 89–100. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2003.tb01093.x>

Оригинальная статья

УДК 599.323.5:574.34

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-229-245>

РАЗМНОЖЕНИЕ И СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ ПОЛЁВКИ-ЭКОНОМКИ *ALEXANDROMYS OECONOMUS* PALLAS, 1776 (CRICETIDAE, RODENTIA) В ЮЖНОМ ЗАУРАЛЬЕ

В. П. Стариков , В. Н. Кравченко, О. Ю. Володина

Сургутский государственный университет

Россия, 628412, г. Сургут, ул. Ленина, д. 1

Поступила в редакцию 18.11.2022 г., после доработки 27.01.2023 г., принята 04.03.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Рассмотрены особенности размножения и структуры популяции полёвки-экономки, обитающей в Южном Зауралье за периоды 1981 – 2001 и 2020 – 2022 гг. Отлов животного проводили как в зимний, так и бесснежный периоды. С помощью метода ловчих канавок (направляющих заборчиков) и ловушко-линий учтено 754 полёвки-экономки. Как и в других частях ареала, полёвка-экономка в Южном Зауралье тяготеет к околородным биотопам. Для этого грызуна Южного Зауралья свойственно зимнее размножение, но наиболее интенсивно размножение наблюдается в мае – июне. Для этих месяцев свойственны и максимальные показатели плодовитости как для перезимовавших, так и прибылых самок. Перезимовавшие самки за репродуктивный период могут приносить до 4 помётов, самки-сеголетки – 3 – 4. Плодовитость перезимовавших самок статистически значимо выше, чем прибылых самок. В феврале – мае в популяции полёвки-экономки преобладают перезимовавшие животные, в июне и последующие летне-осенние месяцы доминируют сеголетки. Среди перезимовавших и прибылых зверьков доминируют самцы, в конце лета и осенью соотношение полов среди этих возрастных групп полёвки-экономки выравнивается.

Ключевые слова: полёвка-экономка, обилие, размножение, структура популяции, Южное Зауралье

Для цитирования. Стариков В. П., Кравченко В. Н., Володина О. Ю. Размножение и структура популяции полёвки-экономки *Alexandromys oeconomus* Pallas, 1776 (Cricetidae, Rodentia) в Южном Зауралье // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 229 – 245. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-229-245>

ВВЕДЕНИЕ

Транспалеарктический вид – полёвка-экономка широко представлена на территории России. На Западно-Сибирской равнине она обычна как в целом по региону, так и по отдельным зонам, и встречается повсеместно, кроме арктических и се-

 Для корреспонденции. Кафедра биологии и биотехнологии Института естественных и технических наук, Сургутский государственный университет.

ORCID и e-mail адреса: Стариков Владимир Павлович: <https://orcid.org/0000-0003-4849-2158>, vp_starikov@mail.ru; Кравченко Вероника Николаевна: <https://orcid.org/0000-0002-6516-1580>, kioreis@mail.ru; Володина Оксана Юрьевна: <https://orcid.org/0000-0003-4960-6807>, oxa9209@mail.ru.

верных моховых субарктических тундр (Равкин и др., 1996; Кислый, 2019 и др.). Полёвки ведут околородный образ жизни, заселяют, главным образом, поймы рек и различного рода депрессии рельефа, занятых озёрно-болотными комплексами (Крыльцов, 1954; Карасева и др., 1957; Ивантер, 1975; Бердюгин и др., 2007; Бобрецов, 2016; Стариков и др., 2021; Tast, 1966).

На территории Южного Зауралья полёвка-экономка также обычна (Никифоров, 1959; Марвин, 1969; Стариков, Кочуров, 1986), входит в группу фоновых видов. Первые сведения по размножению и структуре популяции этого вида лесостепного Зауралья получены более 60 лет назад (Шварц и др., 1957). Наши исследования в определенной степени несут мониторинговый характер, позволяющий сравнить и конкретизировать эти стороны экологии животного.

Территория Южного Зауралья, в частности Курганская область, на западе граничит с Челябинской и Свердловской областями, на севере и северо-востоке – с Тюменской областью, а на юге и юго-востоке – с Казахстаном. Основываясь на материалах изучения флоры и растительности, при геоботаническом членении Южного Зауралья мы вслед за Н. И. Науменко (2008) принимаем схему зонально-провинциального деления растительного покрова, предложенную авторами карты «Растительность Западно-Сибирской равнины» (Ильина и др., 1976) и коллективной монографии «Растительный покров Западно-Сибирской равнины» (Ильина и др., 1985). По этой схеме на рассматриваемой территории последовательно с севера на юг сменяются подтаёжная подзона бореальной ботанико-географической зоны, северная и южная широтные полосы лесостепи (рассматриваемой в ранге подзоны степной зоны) и подзоны разнотравно-дерновинно-злаковых степей. Для подтаёжной подзоны бореальной (таежной) зоны, выделяемой на севере области, наиболее характерны мелколиственные и сосновые леса в сочетании с практически полным отсутствием степей и солончаковых сообществ. Болотная растительность подзоны представлена обширными по занимаемой площади лесными низинными и верховыми (сфагновыми) болотами. Большая часть территории Курганской области относится к подзоне лесостепи степной зоны (Науменко, 2019). Характерная особенность лесостепи – наличие двух зональных типов растительности – луговых степей и «мелколиственных лесов, образующих колки». Значительны по занимаемой площади солонцовые и солончаковые сообщества, болота, сообщества водной и прибрежной растительности; высокие террасы речных долин заняты сосновыми лесами. Подзона разнотравно-дерновиннозлаковых степей, охватывающая юг Курганской области, отличается резким сокращением лесов и мезофитных лугов, практически полным отсутствием верховых болот и значительным усилением роли степей и солончаков в сложении растительного покрова.

Цель настоящего исследования состоит в оценке некоторых сторон экологии полёвки-экономки Южного Зауралья, главным образом, особенностей размножения и структуры популяций.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы положены материалы и наблюдения, накопленные в апреле – августе 2020 – 2022 гг. в Курганской области на территории трёх подзон. В 2020 г.

сбор биоматериала проводился в лесостепной подзоне на границе двух административных районов – Кетовского и Притобольного в окрестностях населенных пунктов – Темляково (55°20' с.ш., 65°21' в.д.), Заборское (55°10' с.ш., 65°14' в.д.), Нагорское (55°15' с.ш., 65°19' в.д.), Утятское (55° 9' с.ш., 65°11' в.д.) и Камышное (55°41' с.ш., 66°25' в.д.). В 2021 г. учёты животных проводили в подтайге вблизи населенных пунктов Самохвалово (56°38' с.ш., 64°43' в.д.) и Мехонское (56°09' с.ш., 64°34' в.д.) Шатровского района, а в 2022 г. – в подзоне разнотравно-дерновинно-злаковой степи в окрестностях с. Озёрное (54°248' с.ш., 64°38' в.д.) и пос. Искра (54°24' с.ш., 64°33' в.д.) Звериноголовского района. Для оценки ряда сторон экологии полёвки-экономки привлечен также наш материал за период 1981 – 2001 гг.

Учёты животных осуществляли методами ловчих канавок, направляющих заборчиков длиной 50 м с пятью конусами (Наумов, 1955; Тупикова и др., 1963; Охотина, Костенко, 1974), а также ловушко-линий (Кучерук, 1952). Отработано 42920 конусо-суток и 29360 давилко-суток. Всего учтено 754 зверька. Возраст полёвок-экономок устанавливали, опираясь на особенности скульптурированности черепа (Ларина, Лапшов, 1974). В качестве дополнительных критериев определения возраста использовали весовые и линейные показатели размеров тела, состояния репродуктивной системы самцов и самок. На основе этих признаков выделяли взрослых (перезимовавших) и прибылых животных. Участие в размножении самок устанавливали по наличию эмбрионов и плацентарных пятен; участие самцов – по размерам семенников и наличию сперматозоидов в придатке семенника (Тупикова, 1964; Карасева и др., 2008; Пантелеев, 2010). Сборы мелких млекопитающих, в том числе полёвки-экономки, в 2020 – 2022 гг. проведены в 58 биотопах.

При статистической обработке данных определяли средние значения плодовитости грызунов, стандартную ошибку и размах варьирования (*min – max*). Средние значения сравнивали, используя *U*-критерий Манна – Уитни. При визуализации внутригодовой динамики грызунов использовали построение линии «скользящая средняя» (для самцов). Все расчеты проводили с применением пакетов программ Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corp., USA) и Statistica 10 (StatSoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Весной и в первой половине лета полёвка-экономка Южного Зауралья в той или иной степени стенотопна, как правило, приурочена к околотовдным (приречные, приозерные, депрессии рельефа) биотопам. Во второй половине лета спектр осваиваемых ею биотопов расширяется (более чем на 80% в каждой из подзон), тем не менее и в этом случае максимальное её обилие оставалось в околотовдных биотопах. Мы присоединяемся к мнению большинства исследователей, которые связывают это с её ярко выраженной гигрофильностью и зеленоядностью (Ивантер, 1975; Громов, Поляков, 1977; Бобрецов, 2016 и др.). В Южном Зауралье доля этой полёвки (от суммарного обилия мелких млекопитающих в 2020 – 2022 гг.) была максимальной в подтайге. Данная особенность прослеживалась как в учётах с помощью ловчих канавок (направляющих заборчиков), так и ловушко-линий (табл. 1).

Размножение. В нашем распоряжении имеются небольшие материалы по учётам полёвки-экономки в зимний период.

Таблица 1. Подзональные особенности обилия (особей на 100 конусо-суток и особей на 100 давилко-суток) полевки-экономки Южного Зауралья (2020 – 2022 гг.)**Table 1.** Subzonal abundance features (individuals per 100 cone-days and individuals per 100 trap-days) of the root vole in the Southern Trans-Urals region (2020–2022)

Подзона / Subzone	Год / Year	Учеты в конусы / Catching into cones		Учеты давилками / Catching into snap trap	
		Обилие (в среднем по подзоне) / Abundance (average over the subzone)	Доля от суммарного обилия мелких млекопитающих, % / Share of the total abundance of small mammals, %	Обилие (в среднем по подзоне) / Abundance (average over the subzone)	Доля от суммарного обилия мелких млекопитающих, % / Share of the total abundance of small mammals, %
Подтайга / Subtaiga	2021	1.63	14.4	0.12	7.5
Лесостепь / Forest steppe	2020	0.82	8.5	0.47	3.9
Разнотравно-дерновинно-злаковая степь / Herb-bunchgrass steppe	2022	1.24	9.1	0.05	1.6
В среднем по Южному Зауралью / On average in the Southern Trans-Urals region	2020 – 2022	1.23	10.7	0.21	4.3

Так, в *январе* 1990 и 1991 гг. добыты 2 самца и 1 самка, все без признаков участия в размножении. Размеры семенников у самцов варьировали от 3×2 до 5×4 мм; у самки отсутствовали эмбрионы и плацентарные пятна. В этот период состояние сперматогенеза самцов мы не оценивали. Однако есть мнение о том, что зрелые сперматозоиды содержат семенники размером не менее 5 мм (Пястолова, Яскин, 1975).

В эти же годы в *феврале* учтено 10 особей полёвки-экономки. Два самца имели неразвитые семенники, а у четырёх наблюдался активный сперматогенез (размеры семенников варьировали от 9×7 до 10×6 мм). Длина тела животных колебалась от 112 до 122 мм, масса – от 33 до 45 г. Одна из четырёх самок в этом месяце имела 8 плацентарных пятен и лактировала. Мы склонны считать, что это результат зимнего размножения, поскольку плацентарные пятна у серых полевков сохраняются недолго, не более 39 дней после родов (Свириденко, 1958).

В *марте* 1990 и 1991 гг. также учтено 10 особей полёвки-экономки. Во второй половине этого месяца два самца имели семенники 5×3 мм, один самец – 8×6 мм, один – 9×5, два – 9×6 и один 10×6 мм. Длина тела их колебалась от 93 до 127 мм, масса самцов варьировала от 19 до 56 г. Три самки, отловленные в эти же сроки, либо вынашивали эмбрионы (3 и 6) на средних стадиях их развития, либо имели плацентарные пятна (2).

В конце 50-х гг. XX в. на территории нашей страны, по крайней мере в годы исследования авторов, отрицалась возможность зимнего размножения полёвки-экономки (Карасева и др., 1957), в том числе на территории лесостепного Зауралья (Шварц и др., 1957). К настоящему времени накоплен большой материал, показывающий возможность особей этого вида размножаться в зимний период или весной в высоких широтах под снегом (Шубин, Сучкова, 1973; Юдин и др., 1976;

Слудский и др., 1978; Хлебников, 1980; Прокопьев, 1988; Русаков, Стариков, 2001; Шадрина, Вольперт, 2013; Бобрецов, 2016; Tast, Kaikusalo, 1976). Следует также указать, что в различных частях ареала экономки явление зимнего размножения фиксируется не ежегодно. В Южном Зауралье, из-за недостатка материала в зимний период, судить насколько это событие в жизни данного грызуна наблюдается часто, также не приходится.

В апреле в разные годы отловлено 6 половозрелых самцов, самки не зарегистрированы.

В мае в Южном Зауралье учтено 67 полёвок-экономок. Все перезимовавшие взрослые (adultus) самцы ($n = 22$) имели хорошо развитые семенники и могли участвовать в размножении. Часть перезимовавших самок ($n = 10$) вынашивала эмбрионы (на всех стадиях развития (9 – 28.05), другая часть ($n = 5$) самок выкармливала детёнышей (14 – 27.05) (очевидно, второй помёт). Здесь уместно указать, что промежутки между родами у полёвки-экономки исчисляются в 20 – 30 дней (Карасева и др., 1957). Все самцы возраста subadultus ($n = 19$) также могли участвовать в размножении, размеры их семенников были сопоставимы с размерами семенников перезимовавших животных. Самые ранние поимки самцов этого возраста датируются 5 – 9.05 1981, 1982 и 2021 гг. Длина тела этих животных варьировала от 104 до 112 мм, масса – от 26 до 46 г. Если учесть срок беременности полёвки-экономки, период выкармливания детёнышей (Карасева и др., 1957), а также время достижения минимальной массы в 26 г (минимальная масса особи, приступившей к самостоятельному образу жизни и попавшей в конус – 7 г), то можно утверждать, что начало размножения в эти годы приходилось на середину марта. Очевидно, это сеголетки первого помёта. В этот месяц было учтено 11 самок возраста subadultus (sad). Четыре самки, отловленные в первой декаде мая в 1981 и 2021 гг., имели массу тела 20.4 – 40 г, при длине тела – 95 – 102 мм. Три из них были с эмбрионами на начальных и средних стадиях развития (первый приплод самок-сеголеток). Во второй декаде мая (15.05.2021 г.) самка возраста subadultus с длиной тела 105 мм, массой 21.1 г имела 5 плацентарных пятен и выкармливала детёнышей. В третьей декаде мая учтено четыре самки (sad), три из них ещё не приступили к размножению, одна вынашивала эмбрионы.

Таким образом, в отдельные годы перезимовавшие самки уже к середине мая могут выкармливать второй помёт, самки-сеголетки также к середине мая – первый помёт.

В июне зарегистрировано 55 перезимовавших самцов, все половозрелые, 21 самка возраста adultus (ad). Все они 100% участвовали в размножении. В первой декаде месяца одна самка вынашивала эмбрионы, две – лактировали. Во второй декаде июня три самки вынашивали эмбрионы, две выкармливали детёнышей, две совмещали беременность и лактацию. В третьей декаде пять самок были беременными, две выкармливали детёнышей (очевидно, третий помёт) одна совмещала беременность и лактацию, три самки имели плацентарные пятна от двух беременностей. В этом месяце учтено 103 самца (sad), из них 92 самца (89.3%) половозрелые. Самок этого возраста учтено 64. В размножении участвовало 21 (32.8%). В первой декаде встречались самки с эмбрионами ($n = 3$) и одна – с плацентарными

пятнами. Во второй декаде июня учтено 4 самки с эмбрионами и 4 самки с плацентарными пятнами, а в третьей декаде июня также 4 самки с эмбрионами, 4 самки с плацентарными пятнами и одна самка с двумя группами плацентарных пятен (20.06.2022 г.).

В июле все взрослые самцы ($n = 45$) участвовали в размножении. У двух из 30 перезимовавших самок (6.7%) отсутствовали эмбрионы и плацентарные пятна. Среди участвующих в размножении 12 самок (42.9%) вынашивали эмбрионы (на начальных и средних фазах развития); 11 самок имели плацентарные пятна и выкармливали детёнышей; четыре самки во второй половине месяца совмещали беременность и лактацию, а одна самка имела две группы плацентарных пятен (24.07.2022 г.). В этом месяце зарегистрировано 89 самцов возраста subadultus, из них 59 (66.3%) могли участвовать в размножении. Участие в размножении самок возраста subadultus ниже, из 67 самок этого возраста только 23 самки (34.3%) участвовали в размножении. 13 из них вынашивали эмбрионы на различных фазах развития, 9 самок имели плацентарные пятна и выкармливали детёнышей и лишь одна совмещала беременность и лактацию.

В августе интенсивность размножения снижалась. Все взрослые самцы ($n = 10$) могли участвовать в размножении. Среди взрослых самок ($n = 11$) в размножении участвовало 7 (63.6%); у четырёх самок отсутствовали эмбрионы и пятна. Последняя беременная взрослая самка отловлена 13.08.2020 г. (эмбрионы 8×6 мм). Показатели участия в размножении самцов возраста subadultus также снизились – до 42.9%. Всего в этом месяце учтено 64 самки возраста subadultus, лишь 11 из них (17.2%) участвовали в размножении. Последняя беременная самка этого возраста зарегистрирована нами 25.08.1984 г. Однако, по мнению С. С. Шварца с соавторами (1957), в лесостепном Зауралье беременные самки очень редко могут встречаться в сентябре и даже в октябре (окрестности с. Озёрное).

В сентябре зарегистрирован один самец возраста adultus, самки этого возраста не отмечены. В этом месяце зарегистрировано 10 самцов и 8 самок возраста subadultus, 30% самцов были половозрелыми, одна самка имела плацентарные пятна (5.09.1984 г.).

В октябре (15 – 22.10.1991 г.) перезимовавших особей не зарегистрировано. Среди 10 полувзрослых самцов у 8 из них семенники варьировали от 2×1 до 4×2 мм, длина тела 75 – 100 мм, масса – 14 – 23 г. Два самца имели семенники 6×4 и 6×5 мм, длина тела их существенно больше (110 – 115 мм), равно как и масса – 35.5 – 47 г. Таким образом, в зиму уходят сеголетки двух последних генераций.

На Крайнем Севере размножение полёвки-экономки длится около 4 месяцев. Короткий период отчасти компенсируется большой величиной выводка – 7 – 8 эмбрионов на одну беременную самку (Скалон, 1931; Пястолова, 1967; Карасева, 1971; Шварц, Большаков, 1979; Григорьев, 2003; Шадрин, Вольперт, 2013; Никифоров, Чибыев, 2015; Литвинов, Чупин, 2018). В более южных широтах плодовитость ниже, но более длительный период размножения (Карасева и др., 1957; Шварц и др., 1957; Попов, 1960; Снигиревская, 1961; Balciuskas et al., 2012). В Южном Зауралье, наряду с зимним размножением полёвки-экономки, которое,

очевидно, не носит массового характера, оно постепенно переходит на раннюю весну (середину марта). Отсюда, сроки размножения этого грызуна для данной территории могут достигать 6 – 7 месяцев в году. Однако наиболее интенсивно процесс размножения происходит в мае и особенно в июне. На этот период приходятся и максимальные показатели плодовитости полёвки-экономки (табл. 2). Этому есть своё объяснение. В это время формируется самая продуктивная часть популяции, обеспечившая её рост – молодые полёвки первых выводков, родившиеся и выросшие в наиболее благоприятное время года. Растения в это время интенсивно вегетируют, и зверьки в изобилии получают полноценные корма, обеспечивающие их быстрый рост и развитие (Карасева, 1979). В августе процесс размножения начинает затухать, первыми из репродукции выбывают перезимовавшие самки, размножение которых завершается к середине этого месяца. Размножение самок-сеголеток заканчивается к концу августа. Осенью их участие в размножении носит единичный характер.

Таблица 2. Сезонная динамика плодовитости полёвки-экономки Южного Зауралья
Table 2. Seasonal dynamics of the root vole fecundity in the Southern Trans-Urals region

Самки / Females	n	Май / May	n	Июнь / June	n	Июль / July	n	Август / August	n	Сентябрь – октябрь / September–October
Взрослые / Adult	15	6.73±0.37	26	6.96±0.34	32	6.22±0.24	7	6.43±0.43	–	Участие в размножении не зарегистрировано / No breeding participation is registered
Сеголетки / Young	7	5.43±0.65	23	6.87±0.30	24	5.38±0.27	11	5.36±0.41	–	

В разных частях ареала полёвки-экономки наблюдается неодинаковое число помётов (Тавровский и др., 1971; Ивантер, 1975; Слудский и др., 1978, Соломонов, 1984, Шубин, 1991; Бобрецов, 2016) как для взрослых, так и самок-сеголеток. В Южном Зауралье для перезимовавших самок возможно до 4 помётов, для прибылых самок – 3 – 4. Так, в феврале – марте – первый помёт для перезимовавших самок, в середине мая – второй помёт перезимовавших самок и первый помёт для самок возраста subadultus. Третий помёт для перезимовавших самок в конце июня, в это же время второй помёт для прибылых самок. В конце июля – первой половине августа четвёртый помёт для перезимовавших самок и третий помёт для прибылых самок. Прибылые самки частично могут размножаться и осенью, однако существенного влияния на пополнение численности популяции этот процесс не оказывает.

Плодовитость взрослых полёвок-экономок Южного Зауралья варьировала от 3 до 11 эмбрионов и плацентарных пятен. С. С. Шварц с соавторами (1957) приводили близкие значения (по эмбрионам) – от 4 до 11. Сравнение средней плодовитости прибылых и взрослых самок проведено с помощью критерия Манна – Уитни. В результате была установлена статистически значимая более высокая плодовитость взрослых самок ($U_{(65, 80)} = 2017$ при $p = 0.02$). Более низкая плодовитость прибылых самок находит своё объяснение. По мнению И. М. Громова и И. Я. По-

лякова (1977), они ещё тратят много энергии на свой незавершенный рост, и поэтому у них число детёнышей меньше, чем у сформировавшихся. Известно, что роды и выкармливание молодняка взрослыми самками также сопряжено с большими затратами энергии, они сами по себе становятся фактором некоторого их угнетения. Поэтому при частых повторных родах число эмбрионов уменьшается. Это подтверждается и на материале из Южного Зауралья. (см. табл. 2), но противоречит данным, полученным по размножению полёвки-экономки Барабы (Глотов и др., 1978) и Крайнего Северо-Востока страны (Юдин и др., 1976). В последнем случае авторы это объясняют тем, что средняя величина выводка у экономок постепенно возрастает от мая до августа. Так происходит потому, что в августе в популяции экономок участвуют в размножении преимущественно более крупные по размерам самки, средняя величина выводка у них больше, чем у меньших по весу.

Многие авторы указывают на незначительную эмбриональную смертность у полёвки-экономки, или вообще на её отсутствие (Шварц и др., 1957; Ивантер, 1975; Слудский и др., 1978). Мы отмечали резорбцию эмбрионов у полёвки-экономки во все летние месяцы в 1991, 2020 – 2022 гг. Среди перезимовавших самок с резорбцией эмбрионов встречено 7% особей, а резорбирующихся эмбрионов – 1.2%. Среди самок возрастной группы *subadultus* их меньше, соответственно 2.6 и 0.4%. Отсюда можно заключить, что имеющаяся смертность эмбрионов у полёвки-экономки в Южном Зауралье не может существенным образом сказываться на интенсивности размножения этого грызуна. По мнению С. С. Шварца с соавторами (1957), решающим фактором нарастания численности популяции полёвки-экономки (как и других грызунов) является не общая продолжительность периода размножения, а время его наступления.

Сравнение плодовитости прибылых самок в зависимости от подзональных особенностей территории проводили с помощью *U*-критерия Манна – Уитни. Статистически значимых различий в плодовитости сеголеток ($U_{(4, 15)} = 15.5$ при $p = 0.15$) и взрослых зверьков ($U_{(10, 21)} = 101.5$ при $p = 0.90$) подтайги и разнотравно-дерновинно-злаковой степи не выявлено. Отсюда, популяция полёвки-экономки Южного Зауралья сравнительно однородна (табл. 3). Это определяется относительной близостью подзон (протяженность Курганской области с севера на юг не превышает 300 км).

Таблица 3. Подзональные особенности плодовитости полёвки-экономки Южного Зауралья (2020 – 2022 гг.)

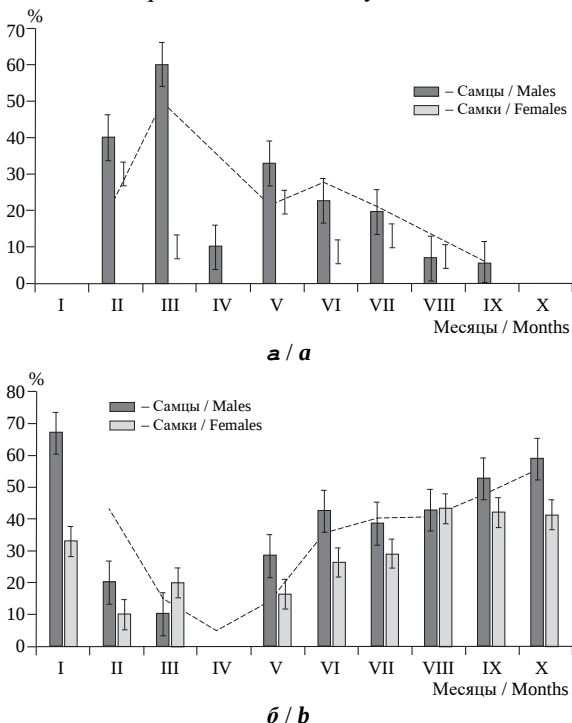
Table 3. Subzonal features of the root vole fecundity in the Southern Trans-Urals region (2020–2022)

Подзона / Subzone	Год / Year	<i>n</i>	Взрослые / Adult	Сеголетки / Young	Независимо от возраста / Independent of age
Подтайга / Subtaiga	2021	14	6.10±0.38	4.50±0.87	5.64±0.40
Лесостепь / Forest steppe	2020	56	6.60±0.26	5.85±0.34	6.43±0.21
Разнотравно-дерновинно-злаковая степь / Herb-bunchgrass steppe	2022	36	6.14±0.27	6.00±0.47	6.08±0.25

Структура популяции. Сезонные изменения возрастного состава популяции полёвки-экономки Южного Зауралья характеризовались следующим. Общеизвестно, что в зимнее время грызуны не растут, бурный их рост и половое созревание приходится на весну. В нашем случае этот период наблюдался в конце зимы. Если в январе средняя масса тела зверьков была чуть более 26 г, длина тела не превышала 95 мм, то в феврале эти показатели были существенно больше (соответственно 31.7 г и 110.3 мм). В это время часть популяции уже начала размножаться. В марте доля взрослых животных может достигать до 70%, в апреле популяция наиболее однородна, нами учитывались только взрослые животные (рисунок). В мае ещё преобладали взрослые животные, а в июне и последующие летне-осенние месяцы доминировали сеголетки (68 – 100%).

В монографии В. Н. Большакова и Б. С. Кубанцева (1984), посвященной половой структуре популяций млекопитающих, на большом фактическом материале показано, что у многих видов грызунов в одних популяциях могут численно преобладать самцы, в других – самки и даже в пределах одной популяции соотношение полов как в целом, так и в отдельных возрастных группах может иногда изменяться на противоположное за относительно короткий промежуток времени. Наши данные по половозрастной структуре популяции полёвки-экономки показали, что среди перезимовавших и прибылых зверьков во все сезоны и во всех подзонах, как правило, преобладали самцы (см. рисунок), лишь в августе соотношение полов приближалось 1:1. Подобную особенность в соотношении полов полёвки-экономки в Карелии наблюдал Э. В. Ивантер (1975), на юго-востоке Западной Сибири – Н. Г. Шубин (1991).

В отловах канавками (заборчиками) большинство отловленных грызунов были представлены сеголетками, более 60% (самки – 26.3%, самцы – 38.0%). В учётах давилками преобладали взрослые зверьки, около 60% (табл. 4).



Доля перезимовавших (а) и прибылых (б) особей полёвки-экономки; пунктирная линия – скользящая средняя (для самцов)

Figure. Share of adult (a) and young (b) individuals of the root vole; the dotted line is the moving average (for males)

Таблица 4. Половозрастная структура полёвки-экономки в зависимости от методов учётов в Южном Зауралье (апрель – август 2020 – 2022 гг.)**Table 4.** Sex and age structure of the root vole depending on catching methods in the Southern Trans-Urals region (April–August of 2020–2022)

Метод учёта / Method of capture	Взрослые / Adult				Сеголетки / Young			
	Самки / Female		Самцы / Male		Самки / Female		Самцы / Male	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
Учеты в конусы / Catching into cones	58	14.7	83	21.00	104	26.3	150	38.0
Учеты давилками / Catching into snap trap	24	33.8	19	26.8	13	18.3	15	21.1
Конусы и давилки / Cones and snap trap	82	17.6	102	21.9	117	25.1	165	35.4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Размножение полёвки-экономки в Южном Зауралье происходит в более растянутые сроки, чем в северных частях ареала, что сказывается на относительно низких показателях плодовитости. Репродуктивный период может длиться 6 – 7 месяцев, сроки его начала могут быть смещены на конец зимы. Отсюда, в отдельные годы у полёвки-экономки наблюдается подснежное размножение. Судя по состоянию генеративных органов, перезимовавшие самцы сохраняют половую активность на протяжении всего бесснежного периода. Максимум участия в размножении прибылых самцов приходится на май (100%) и июнь (89.3%), прибылых самок – также на эти месяцы (соответственно 63.4 и 32.8%). В июне и мае отмечаются и наибольшая величина выводков. Перезимовавшие самки за сезон размножения могут приносить до 4 выводков, прибылые – 3-4. В феврале – мае в популяции полёвки-экономки Южного Зауралья преобладают взрослые перезимовавшие животные, в июне и последующие месяцы – сеголетки. На протяжении зимне-весенне-летнего периода как среди перезимовавших, так и прибылых животных доминируют самцы. В конце лета (август) и осенью соотношение полов выравнивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бердюгин К. И., Большаков В. Н., Балахонов В. С., Павлинин В. В., Пасхальный С. П., Штро В. Г. Млекопитающие Полярного Урала. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2007. 384 с.

Бобрецов А. В. Популяционная экология мелких млекопитающих равнинных и горных ландшафтов Северо-Востока европейской части России. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. 381 с.

Большаков В. Н., Кубанцев Б. С. Половая структура популяций млекопитающих и её значение. М.: Наука, 1984. 233 с.

Глотов И. Н., Ердаков Л. Н., Кузякин В. А., Максимов А. А., Мерзлякова Е. П., Николаев А. С., Сергеев В. Е. Сообщества мелких млекопитающих Барабы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 231 с.

Григорьев С. Е. Фауна и экология серых полевок бассейна нижнего течения р. Яны и западной части Яно-Индигирского междуречья // Териофауна России и сопредельных территорий (VII съезд Териологического общества): материалы Международного совещания. М.: ИПЭЭ РАН, 2003. С. 98 – 99.

РАЗМНОЖЕНИЕ И СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ ПОЛЁВКИ-ЭКОНОМКИ

- Громов И. М., Поляков И. Я. Полевки (Microtinae). Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. 504 с. (Сер. Фауна СССР. Млекопитающие. Т. 3, вып. 8).
- Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Севера Запада СССР. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. 247 с.
- Ильина И. С., Лапина Е. И., Лавренко Н. Н., Мельцер Л. И., Романова Е. А., Богоявленский Б. А., Махно В. Д. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985. 251 с.
- Ильина И. С., Лапина Е. И., Махно В. Д., Романова Е. А. Геоботаническое районирование. Врезка на карте «Растительность Западно-Сибирской равнины». М.: ГУГК, 1976. 1 л.
- Карасева Е. В. Экологические особенности млекопитающих – носителей лептоспироза *Griptrutyrhosa* и их роль в природных очагах лептоспироза // Фауна и экология грызунов. М.: Изд-во Московского университета, 1971. Вып. 10. С. 30 – 144.
- Карасева Е. В. *Microtus oeconomus* Pallas, 1779 – полёвка-экономка // Медицинская териология. М.: Наука, 1979. С. 121 – 129.
- Карасева Е. В., Нарская Е. В., Бернштейн А. Д. Полёвка-экономка, обитающая в окрестностях озера Неро // Бюллетень МОИП. Отдел Биологический. 1957. Т. LXII, вып. 3. С. 5 – 18.
- Карасева Е. В., Телицына А. Ю., Жигальский О. А. Методы изучения грызунов в полевых условиях. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 416 с.
- Кислый А. А. Распределение полёвки-экономки *Alexandromys oeconomus* (Pallas, 1776) в Западной Сибири // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139, № 6. С. 613 – 621.
- Крыльцов А. И. Материалы по экологии и размножению мышевидных грызунов Северного Казахстана // Труды Республиканской станции защиты растений. Алма-Ата: Казахское гос. изд-во, 1954. Т. 2. С. 131 – 150.
- Кучерук В. В. Количественный учёт важнейших видов вредных грызунов и землероек // Методы учёта численности и географического распределения наземных позвоночных. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 9 – 46.
- Ларина Н. И., Лапинов В. А. К методике выделения возрастных групп у некорнезубых полевок // Физиологическая и популяционная экология животных. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1974. Вып. 2. С. 92 – 97.
- Литвинов Ю. Н., Чупин И. И. Фауно-экологические исследования на Таймыре: млекопитающие и птицы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 389 с.
- Марвин М. Я. Фауна наземных позвоночных Урала. Вып. 1. Млекопитающие. Свердловск: Уральский государственный университет, 1969. 155 с.
- Науменко Н. И. Флора и растительность Южного Зауралья. Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2008. 512 с.
- Науменко Н. И. Растительность // География Курганской области. Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2019. С. 80 – 104.
- Наумов Н. П. Изучение подвижности и численности мелких млекопитающих с помощью ловчих канавок // Вопросы краевой, общей и экспериментальной паразитологии и медицинской зоологии. М.: Изд-во АМН СССР, 1955. Т. 9. С. 179 – 202.
- Никифоров Л. П. Опыт биосъёмки населения млекопитающих Тоболо-Ишимской лесостепи // География населения наземных животных и методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 7 – 22.
- Никифоров Н. И., Чибывев В. Ю. К экологии полёвки-экономки (*Microtus oeconomus* Pallas, 1778) в биоценозах таежно-аласных экосистем Центральной Якутии // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. 2015. Т. 12, № 2. С. 19 – 23.
- Охотина М. В., Костенко В. А. Полиэтиленовая пленка – перспективный материал для изготовления ловчих заборчиков // Фауна и экология наземных позвоночных юга Дальнего Востока СССР. Владивосток: ДВО АН СССР, 1974. С. 193 – 196.

- Пантелеев П. А. Родентология. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 221 с.
- Попов В. А. Млекопитающие Волжско-Камского края. Казань: Казанский филиал АН СССР, 1960. 468 с.
- Прокопьев Н. П. О подснежном размножении полёвки-экономки (*Microtus oeconomus*) в Центральной Якутии // Зоогеографические и экологические исследования териофауны Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. С. 3 – 23.
- Пястолова О. А. Эколого-морфологические особенности субарктических популяций полёвки-экономки: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1967. 20 с.
- Пястолова О. А., Яскин В. А. Новые данные о размножении субарктической популяции полёвки-экономки // Экология, 1975. № 5. С. 69 – 73.
- Равкин Ю. С., Богомолова И. Н., Ердаков Л. Н., Панов В. В., Буйдалина Ф. Р., Добровольский А. К., Вартапетов Л. Г., Юдкин В. А., Торопов К. В., Лукьянова И. В., Покровская И. В., Жуков В. С., Цыбулин С. М., Фомин Б. Н., Стариков В. П., Шор Е. Л., Чернышова О. Н., Соловьев С. А., Чубыкина Н. Л., Ануфриев В. М., Бобков Ю. В., Ивлева Н. Г., Тертицкий Г. М. Особенности распределения мелких млекопитающих Западно-Сибирской равнины // Сибирский экологический журнал. 1996. Т. 3, № 3-4. С. 307 – 317.
- Русаков В. А., Стариков В. П. Зимнее размножение мышевидных грызунов Южного Зауралья // Словцовские чтения-2001: тезисы докладов и сообщений научно-практической конференции. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2001. С. 165 – 166.
- Свириденко П. А. К методике определения величины выводка у грызунов по плацентарным пятнам // Бюллетень МОИП. Отдел Биологический. 1958. Т. 63, № 2. С. 49 – 54.
- Скалон В. Н. Материалы к изучению грызунов севера Сибири // Труды по защите растений Сибири. Новосибирск, 1931. Т. 1, № 8. С. 183 – 207.
- Слудский А. А., Борисенко В. А., Капитонов В. И., Махмутов С., Мокроусов Н. Я., Орлов Г. И., Слудский Ал. А., Страутман Е. И., Федосенко А. К., Шубин И. Г. Млекопитающие Казахстана. Алма-Ата: Наука КазССР, 1978. Т. 1, ч. 3. 492 с.
- Снигиревская Е. М. Наблюдения над полевой-экономкой на островах Средней Волги // Труды Зоологического института АН СССР. 1961. Т. 29. С. 215 – 241.
- Соломонов Н. Г. Полёвка-экономка в долине Средней Лены // Вид и его продуктивность в ареале. Ч. 1. Млекопитающие (насекомоядные, грызуны): материалы 4-го Всесоюзного совещания. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 69 – 70.
- Стариков В. П., Кочуров В. Н. Терионаселение Курганской области // Фауна позвоночных Урала и сопредельных территорий. Свердловск: Уральский государственный университет, 1986. С. 13 – 22.
- Стариков В. П., Кравченко В. Н., Володина О. Ю., Муртазин Д. И. Фауна и население мелких млекопитающих лесостепного Зауралья // Вестник ИрГСХА, 2021. № 2 (103). С. 85 – 100. <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-103-85-100>
- Тавровский В. А., Егоров О. В., Кривошеев В. Г., Попов М. В., Лабутин Ю. В. Млекопитающие Якутии. М.: Наука, 1971. 660 с.
- Тупикова Н. В. Изучение размножения и возрастного состава популяций мелких млекопитающих // Методы изучения природных очагов болезней человека. М.: Медицина, 1964. С. 154 – 191.
- Тупикова Н. В., Заклинская В. П., Евсеева В. С. Учёт численности и массовый отлов мелких млекопитающих при помощи заборчиков // Организация и методы учёта птиц и вредных грызунов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 231 – 236.
- Хлебников А. И. Зимнее размножение мышевидных грызунов в Западном Саяне // Грызуны: материалы V Всесоюзного совещания. М.: Наука, 1980. С. 294 – 295.
- Шадрина Е. Г., Вольперт Я. Л. Экология полёвки-экономки долины р. Индигирки // Наука и образование. 2013. № 2. С. 94 – 100.

РАЗМНОЖЕНИЕ И СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ ПОЛЁВКИ-ЭКОНОМКИ

Шварц С. С., Большаков В. Н. Экология субарктических Micromammalia Западной Сибири и их роль в экосистемах // Популяционная экология и изменчивость животных. Свердловск: УМЦ АН СССР, 1979. С. 3 – 20.

Шварц С. С., Павлинин В. Н., Сюзюмова Л. М. Теоретические основы построения прогнозов численности мышевидных грызунов в лесостепном Зауралье // Труды Института биологии УФАН СССР. 1957. Вып. 8. С. 3 – 59.

Шубин Н. Г. Экология млекопитающих юго-востока Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 263 с.

Шубин Н. Г., Сучкова Н. Г. Зимнее размножение мышевидных грызунов в Западной Сибири // Зоологический журнал. 1973. Т. 52, № 5. С. 790 – 791.

Юдин Б. С., Кривошеев В. Г., Беляев В. Г. Мелкие млекопитающие севера Дальнего Востока. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 270 с.

Balciauskas L., Balciauskiene L., Janonyte A. Reproduction of the root vole (*Microtus oeconomus*) at the edge of its distribution range // Turkish Journal of Zoology. 2012. Vol. 36, № 5. P. 668 – 675. <https://doi.org/10.3906/zoo-1111-20>

Tast J. The Roll vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), as an inhabitant of seasonally flooded land // Annales Zoologici Fennici. 1966. Vol. 3, № 3. P. 127 – 171.

Tast J., Kaikusalo A. Winter breeding of the root vole, *Microtus oeconomus*, in 1972/1973 at Kilpisjärvi, Finnish Lapland // Annales Zoologici Fennici. 1976. Vol. 13, № 3. P. 174 – 178.

**Breeding and population structure of the root vole
Alexandromys oeconomus Pallas, 1776 (Cricetidae, Rodentia)
in the Southern Trans-Urals region**

V. P. Starikov , V. N. Kravchenko, O. Yu. Volodina

*Surgut State University
1 Lenin St., Surgut 628412, Russia*

Received: 18 November 2022 / revised: 27 January 2023 / accepted: 4 March 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. Features of the breeding and population structure of the root vole inhabiting the Southern Trans-Urals region during the periods of 1981–2001 and 2020–2022 are considered. Animals were captured during both winter and snowless periods. A total of 754 root voles were captured using ditches with pitfalls (guide fences made of polyethylene film) and trap lines. As in the other parts of their range, root voles in the Southern Trans-Urals region prefer near-water habitats. Winter breeding is characteristic of this rodent in the Southern Trans-Urals region, but the most intensive breeding is observed in May–June. These months are also characterized by the maximum fecundity for both overwintered and young females. Overwintered females can produce up to 4 litters during their reproductive period, while young females can produce 3–4 litters. The fecundity of overwintered females is statistically significantly higher than that of young ones. In February–May, overwintered animals dominate in the root vole population, while in June and the following summer and autumn months, underyearlings predominate. Males dominate among the overwintered and underyearling animals; at the end of summer and in the autumn, the sex ratio among these age groups of root voles levels off.

Keywords: root vole, abundance, breeding, population structure, Southern Trans-Urals region

For citation: Starikov V. P., Kravchenko V. N., Volodina O. Yu. Breeding and population structure of the root vole *Alexandromys oeconomus* Pallas, 1776 (Cricetidae, Rodentia) in the Southern Trans-Urals region. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 229–245 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-229-245>

REFERENCES

- Berdyugin K. I., Bolshakov V. N., Balakhonov V. S., Pavlinin V. V., Paskhalny S. P., Shtro V. G. *Mlekopitaiushchie Poliarnogo Urala* [Mammals of the Polar Urals]. Ekaterinburg, Ural State University Publ., 2007. 384 p. (in Russian).
- Bobretsov A. V. *Populatsionnaya ekologiya melkikh mlekopitaiushchikh ravнинных i горных ландшафтов Северо-Востока европейской части России* [Population Ecology of Small Mammals of Lowland and Mountainous Landscapes of the North-East of the European Part of Russia]. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2016. 381 p. (in Russian).

 *Corresponding author.* Department of Biology and Biotechnology of the Institute of Natural and Technical Sciences, Surgut State, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Vladimir P. Starikov: <https://orcid.org/0000-0003-4849-2158>, vp_starikov@mail.ru; Veronika N. Kravchenko: <https://orcid.org/0000-0002-6516-1580>, kioreis@mail.ru; Oksana Yu. Volodina: <https://orcid.org/0000-0003-4960-6807>, oxa9209@mail.ru.

Bol'shakov V. N., Kubantsev B. S. *Polovaya struktura populiatsii mlekopitaiushchikh i ee znachenie* [Sexual Structure of Mammal Populations and Its Significance]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 233 p. (in Russian).

Glotov I. N., Erdakov L. N., Kuziakin V. A., Maksimov A. A., Merzliakova E. P., Nikolaev A. S., Sergeev V. E. *Soobshchestva melkikh mlekopitaiushchikh Baraby* [Small Mammal Communities of Baraba]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 231 p. (in Russian).

Grigoryev S. E. Fauna and ecology of gray voles in the lower Yana River basin and the western part of the Yana-Indigir interfluvies. *Theriofauna of Russia and Adjacent Territories (VII Congress of the Theriological Society): Proceedings of the International Meeting*. Moscow, A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS Publ., 2003, pp. 98–99 (in Russian).

Gromov I. M., Polyakov I. Ya. *Polevki (Microtinae)* [Voles (Microtinae)]. Leningrad, Nauka Publ., 1977. 504 p. (Ser. Fauna of the USSR. Mammals. Vol. 3, iss. 8) (in Russian).

Ivanter E. V. *Populatsionnaya ekologiya melkikh mlekopitaiushchikh taezhnogo Severo-Zapada SSSR* [Population Ecology of Small Mammals of the Taiga Northwest of the USSR]. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 247 p. (in Russian).

Il'ina I. S., Lapshina E. I., Lavrenko N. N., Mel'tser L. I., Romanova E. A., Bogoiavlenskiy B. A., Makhno V. D. *Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny* [Vegetation of the West Siberian Plain]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 251 p. (in Russian).

Il'ina I. S., Lapshina E. I., Makhno V. D., Romanova E. A. *Geobotanicheskoe raionirovanie. Vrezka na karte "Rastitel'nost' Zapadno-Sibirskoi ravniny"* [Geobotanical Zoning. Inset on the Map "Vegetation of the West Siberian Plain"]. Moscow, GUGK Publ., 1976. 1 p. (in Russian).

Karaseva E. V. Ecological characteristics of mammals – carriers of *Grippyotyphosa leptospira* and their role in natural foci of leptospirosis. *Fauna and Ecology of Rodents*. Moscow, Moscow State University Publ., 1971, iss. 10, pp. 30–144 (in Russian).

Karaseva E. V. *Microtus oeconomus* Pallas, 1779. In: *Meditinskaya teriologiya* [Medical Theriology]. Moscow, Nauka Publ., 1979, pp. 121–129 (in Russian).

Karaseva E. V., Narskaya E. V., Bernstein A. D. The *Microtus oeconomus* inhabiting the neighbourhood of lake Nero in Yaroslav region. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Biological series*, 1957, vol. LXII, iss. 3, pp. 5–18 (in Russian).

Karaseva E. V., Telitsina A. Yu., Zhigal'skiy O. A. *The Methods of Studying Rodents in the Wild Nature*. Moscow, Izdatel'stvo LKI, 2008. 416 p. (in Russian).

Kislyi A. A. Distribution of the Tundra vole *Alexandromys oeconomus* (Pallas, 1776) in Western Siberia. *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2019, vol. 139, no. 6, pp. 613–621 (in Russian).

Kryltsov A. I. Materials on ecology and reproduction of mouse-like rodents of Northern Kazakhstan. *Trudy Respublikanskoi stantsii zashchity rastenii* [Proceedings of the Republican Plant Protection Station]. Alma-Ata, Kazakhskoe gosudarstvennoe izdatel'stvo, 1954, vol. 2, pp. 131–150 (in Russian).

Kucheruk V. V. Quantitative accounting of the most important species of harmful rodents and shrews. In: *Metody ucheta chislennosti i geograficheskogo raspredeleniia nazemnykh pozvonochnykh* [Methods of Accounting for the Abundance and Geographical Distribution of Terrestrial Vertebrates]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1952, pp. 9–45 (in Russian).

Larina N. I., Lapshov V. A. To the method of age grouping in uncorrupted voles. *Fiziologicheskaya i populatsionnaya ekologiya zhivotnykh* [Animal Physiology and Population Ecology]. Saratov, Saratov State University Publ., 1974, iss. 2, pp. 92–97 (in Russian).

Litvinov Yu. N., Chupin I. I. *Fauno-ekologicheskie issledovaniya na Taimyre: mlekopitayushchie i pritsy* [Fauna-Ecological Studies in Taimyr Peninsula: Mammals and Birds]. Novosibirsk, Publishing House Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2018. 389 p. (in Russian).

Marvin M. Y. *Fauna nazemnykh pozvonochnykh Urala. Vyp. 1. Mlekopitaiushchie* [The Fauna of Terrestrial Vertebrates of the Urals. Vol. 1. Mammals]. Sverdlovsk, Ural State University Publ., 1969. 155 p. (in Russian).

Naumenko N. I. *Flora i rastitel'nost' Yuzhnogo Zaural'ya* [Flora and Vegetation of the Southern Trans-Urals]. Kurgan, Izdatel'stvo Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008. 512 p. (in Russian).

Naumenko N. I. Vegetation. In: *Geografiya Kurganskoi oblasti* [Geography of the Kurgan Region]. Kurgan, Izdatel'stvo Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta, 2019, pp. 80–104 (in Russian).

Naumov N. P. Study of motility and number of small mammals by means of traps. *Voprosy kraevoi, obshchei i eksperimental'noi parazitologii i meditsinskoi zoologii* [Questions of Regional, General and Experimental Parasitology and Medical Zoology]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii meditsinskikh nauk SSSR, 1955, vol. 9, pp. 179–202 (in Russian).

Nikiforov L. P. Experience of mammal population biosurvey of the Tobol-Ishim forest-steppe. In: *Geografiya naseleniya nazemnykh zhivotnykh i metody ego izucheniya* [Geography of Terrestrial Animal Population and Methods of Its Study]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1959, pp. 7–22 (in Russian).

Nikiforov N. I., Chibiyev V. Yu. Ecology of the Tundra Vole (*Microtus oeconomus* Pallas, 1778) in biogeocenosis of taiga-and-alas ecosystems of Central Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 19–23 (in Russian).

Okhotina M. V., Kostenko V. A. Polyethylene film – a promising material for the manufacture of trapping fences. In: *Fauna i ekologiya nazemnykh pozvonochnykh yuga Dal'nego Vostoka SSSR* [Fauna and Ecology of Terrestrial Vertebrates of the Southern Far East of the USSR]. Vladivostok, Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1974, pp. 193–196 (in Russian).

Panteleev P. A. *Rodentology*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2010. 221 p. (in Russian).

Popov V. A. *Mlekopitaiushchie Volzhsko-Kamskogo kraya* [Mammals of the Volga-Kama Region]. Kazan, Kazan Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1960. 468 p. (in Russian).

Prokopyev N. P. On the snow-breeding of the Tundra vole (*Microtus oeconomus*) in Central Yakutia. In: *Zoogeograficheskie i ekologicheskie issledovaniya teriofauny Yakutii* [Zoogeographical and ecological studies of Yakutian theriofauna]. Yakutsk, Yakutsk Branch of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1988, pp. 3–23 (in Russian).

Pyastolova O. A. *Ecological and Morphological Features of the Subarctic Populations of the Root Vole*. Thesis Diss. Cand. Sci. (Biol.). Sverdlovsk, 1967. 20 p. (in Russian).

Pyastolova O. A., Yaskin V. A. New data on the reproduction of the subarctic population of the root vole. *Ekologiya*, 1975, no. 5, 69–73 (in Russian).

Ravkin Yu. S., Bogomolova I. N., Erdakov L. N., Panov V. V., Buidalina F. R., Dobrotvorsky A. K., Vartapetov L. G., Yudkin V. A., Toropov K. V., Lukyanova I. V., Pokrovskaya I. V., Zhukov V. S., Tsybulin S. M., Fomin B. N., Starikov V. P., Shor E. L., Chernyshova O. N., Solov'ev S. A., Chubykina N. L., Anufriev V. M., Bobkov Yu. V., Ivleva N. G., Tertitsky G. M. Peculiarities of distribution of small mammals of West Siberian plain. *Siberian Journal of Ecology*, 1996, vol. 3, no. 3–4, pp. 307–317 (in Russian).

Rusakov V. A., Starikov V. P. Winter reproduction of mouse-like rodents of the Southern Trans-Urals. *Slovtsovskie chteniia-2001: tezisy dokladov i soobshchenii nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Slovtsov Readings-2001: Abstracts of Reports and Communications of Scientific and Practical Conference]. Tyumen, Izdatel'stvo Tiimenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2001, pp. 165–166 (in Russian).

Sviridenko P. A. Method of establishing the number of progeny in a brood of rodents according to placental stains. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Biological series*, 1958, vol. 63, iss. 2, pp. 49–54 (in Russian).

Skalon V. N. Materials for the study of rodents in the north of Siberia. *Proceedings on the Protection of Plants in Siberia*. Novosibirsk, 1931, vol. 1, no. 8, pp. 183–207 (in Russian).

Sludskiy A. A., Borisenko V. A., Kapitonov V. I., Makhmutov S., Mokrousov N. Y., Orlov G. I., Sludskiy A. I., Strautman E. I., Fedosenko A. K., Shubin I. G. *Mammals of Kazakhstan*. Alma-Ata, Nauka of KazSSR, 1978, vol. 1, pt. 3. 492 p. (in Russian).

Snigirevskaya E. M. Observations on the Tundra vole on the islands of the Middle Volga. *Proceedings of the Zoological Institute of the USSR Academy of Science*, 1961, vol. 29, pp. 215–241 (in Russian).

Solomonov N. G. The Tundra Vole in the Middle Lena valley. *Vid i ego produktivnost' v areale. Ch. 1. Mlekopitaiushchie (nasekomoiadnye, gryzuny): materialy 4-go Vsesoiuznogo soveshchaniya* [Species and Its Productivity in the Area. Part. 1. Mammals (Insectivores, Rodents): Proceedings of the 4th All-Union Meeting]. Sverdlovsk, Urals Research Center of the USSR Academy of Sciences Publ., 1984, pp. 69–70 (in Russian).

Starikov V. P., Kochurov V. N. Teriopopulation of the Kurgan region. In: *Fauna pozvonochnykh Urala i sopredel'nykh territorii* [Fauna of Vertebrates of the Urals and Adjacent Territories]. Sverdlovsk, Ural State University Publ., 1986, pp. 13–22 (in Russian).

Starikov V. P., Kravchenko V. N., Volodina O. Yu., Murtazin D. I. Fauna and community of small mammals of the forest-steppe Trans-Ural region. *Vestnik IrGSHA*, 2021, no. 2 (103), pp. 85–100 (in Russian). <https://doi.org/10.51215/1999-3765-2021-103-85-100>

Tavrovsky V. A., Egorov O. V., Krivosheev V. G., Popov M. V., Labutin Yu. V. *Mlekopitaiushchie Yakutii* [Mammals of Yakutia]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 660 p. (in Russian).

Tupikova N. V. Analysis of reproduction and age composition of small mammal populations. In: *Metody izucheniya prirodnikh ochagov boleznei cheloveka* [Methods of Studies on Natural Foci of Human Diseases]. Moscow, Meditsina Publ., 1964, pp. 154–191 (in Russian).

Tupikova N. V., Zaklanskaya V. P., Evseeva V. S. Accounting for the number and mass capture of small mammals using fences. In: *Organizatsiya i metody ucheta ptits i vrednykh gryzunov* [Organization and methods of accounting for birds and harmful rodents]. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR, 1963, pp. 231–236 (in Russian).

Khlebnikov A. I. Winter reproduction of mouse-like rodents in the Western Sayan. *Gryzuny: materialy V Vsesoiuznogo soveshchaniya* [Rodents: Materials of the V All-Union Meeting]. Moscow, Nauka Publ., 1980, pp. 294–295 (in Russian).

Shadrina E. G., Vol'pert Ya. L. Ecology of the root vole of the Indigirka river valley. *Nauka i obrazovanie*, 2013, no. 2, pp. 94–100 (in Russian).

Shvarts S. S., Bol'shakov V. N. Ecology of subarctic Micromammalia in Western Siberia and their role in ecosystems. In: *Populyatsionnaya ekologiya i izmenchivost' zhivotnykh* [Population Ecology and Variability of Animals]. Sverdlovsk, Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences Publ., 1979, pp. 3–20 (in Russian).

Shvarts S. S., Pavlinin V. N., Syuzyumova L. M. Theoretical foundations for making forecasts of the number of murine rodents in the forest-steppe Trans-Urals. *Trudy Instituta biologii Ural'skogo filiala AN SSSR*, 1957, iss. 8, pp. 3–59 (in Russian).

Shubin N. G. *Ekologiya mlekopitaiushchikh yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri* [Ecology of Mammals of the Southeast of Western Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 263 p. (in Russian).

Shubin N. G., Suchkova N. G. Winter breeding of murine rodents in Western Siberia. *Zoologicheskii zhurnal*, 1973, vol. 52, no. 5, pp. 790–791 (in Russian).

Yudin B. S., Krivosheev V. G., Belyaev V. G. *Melkie mlekopitaiushchie severa Dal'nego Vostoka* [Small Mammals of the North of the Far East]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 270 p. (in Russian).

Balciauskas L., Balciauskiene L., Janonyte A. Reproduction of the root vole (*Microtus oeconomus*) at the edge of its distribution range. *Turkish Journal of Zoology*, 2012, vol. 36, no. 5, pp. 668–675. <https://doi.org/10.3906/zoo-1111-20>

Tast J. The Roll vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), as an inhabitant of seasonally flooded land. *Annales Zoologici Fennici*, 1966, vol. 3, no. 3, pp. 127–171.

Tast J., Kaikusalo A. Winter breeding of the root vole, *Microtus oeconomus*, in 1972/1973 at Kilpisjärvi, Finnish Lapland. *Annales Zoologici Fennici*, 1976, vol. 13, no. 3, pp. 174–178.

Оригинальная статья

УДК 504:579.6

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

КОМПЛЕКСНАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЁННОЙ ПОЧВЫ

Т. Н. Щемелинина , Е. М. Анчугова

*Институт биологии Федерального исследовательского центра
Коми научного центра Уральского отделения РАН
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28*

Поступила в редакцию 05.10.2022 г., после доработки 27.01.2023 г., принята 26.02.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Решением проблемы загрязнения почвы нефтью и нефтепродуктами является использование технологий с комплексным применением материалов. На основе оценки загрязненного нефтью участка на территории демонтированного резервуарного парка разработана биотехнология, включающая как отходы деревообработки, так и биологические агенты, способствующие усилению скорости процесса очистки. Эффективность очистки почвы с применением технологии внесения биопрепарата «БИОТРИН», биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®», кородревесной смеси и трав-рекультивантов составила 92 – 95% за 60 суток. Высокая дегидрогеназная активность подтверждает эффективные процессы окисления органического загрязнителя. Проектное покрытие высеянными травами рекультивированного участка спустя 60 суток после посева трав составляет 85%, что характеризует очищенный грунт как не токсичный для роста и развития злаков.

Ключевые слова: почва, загрязнение нефтью, биопрепарат, биогеосорбент, кородревесная смесь, травы-рекультиванты, биотехнология очистки

Финансирование. Работа выполнена при финансировании Государственного задания Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН по теме «Научно обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере» (№ 1021051101411-4-1.6.23), ООО «БИОЭКОБАЛАНС».

Для цитирования. Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М. Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязнённой почвы // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 246 – 256. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами (НП) в России признана на государственном уровне. Особенно интенсивному загрязнению нефтью и продуктами ее переработки подвержены территории, где ведется

 Для корреспонденции. Лаборатория биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра УрО РАН.

ORCID и e-mail адреса: Щемелинина Татьяна Николаевна: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424>, shemelinina@ib.komisc.ru; Анчугова Елена Михайловна: <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518>, anchugova@ib.komisc.ru.

активная добыча нефти, осуществляется ее транспортировка и хранение. Потери нефтяного сырья при добыче и транспортировке в России по разным оценкам составляют от 1 до 3.5 – 4.5%. Соответственно, при уровне добычи в 555 млн т в 2018 г. (Klerikov et al., 2022) потери составляют от 18 до 23 млн т. Самоочищение экосистем возможно, однако, скорость этого процесса слишком мала и несопоставима с темпами антропогенного загрязнения.

Среди известных технологий восстановления нефтезагрязненных грунтов и водных систем наиболее безопасной для окружающей среды является биоремедиация (Коршунова и др., 2019; Ławniczak et al., 2020). Биоремедиация может быть основана как на стимуляции аборигенной микробиоты, так и на внесении на загрязненный участок биопрепаратов с подобранными штаммами микроорганизмов. Для повышения эффективности закрепления клеток микроорганизмов, сохранения их жизнеспособности и активности внеклеточных ферментов, для решения проблем утилизации сорбирующих материалов применяется способ иммобилизации микроорганизмов на сорбенты. Кроме того, в экологически неблагоприятных условиях сорбенты выступают в качестве базы-транспорта для микроорганизмов, позволяющей жить в анабиозе до 10 лет. Биопрепараты на основе микроорганизмов-нефтедеструкторов и биогеосорбенты (микроорганизмы, иммобилизованные на цеолиты) неоднократно подтвердили свою эффективность (Артюх и др., 2014; Shchemelinina et al., 2019). При сильном нефтяном загрязнении недостаточно внесения только биопрепаратов и биосорбентов. Для достижения положительного результата необходимо проводить комплексную биорекультивацию, включающую в том числе разрыхление и аэрацию почвы для улучшения ее структуры и повышения однородности загрязнения, внесение минеральных удобрений как дополнительного источника питания микроорганизмов (Трусей и др., 2016), посев трав-рекультивантов (Емельянова и др., 2015). В качестве структуратора почв могут послужить кородревесные отходы (КДО) лесопромышленного производства (Ташкинова, 2017).

Целью исследования – оценка технологии совместного применения биопрепарата «БИОТРИН», биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®», кородревесной смеси и трав-рекультивантов в почве, загрязненной нефтью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследования была нефтезагрязненная почва на территории демонтированного резервуарного парка (рис. 1). Площадь участка загрязненной нефтью почвы для проведения опытно-промышленного эксперимента составила 100 м².

Описание применяемых материалов в технологии рекультивации. Биопрепарат «БИОТРИН» состоит из нетоксичного симбиотического альго-бактериально-дрожжевого консорциума: дрожжей *Rhodotorula glutinis* Fresen, Harrison, 1928, штамм VKM Y-2998D; бактерий *Pseudomonas yamanorum* Migula, 1894, штамм VKM B-3033D; микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer f. *globosa* V. Andr. (Beijer, 1890) IPPAS-2024. Лабораторные эксперименты выявили эффективность очистки воды, почвы, щебеночного балласта от нефти и НП с применением биопрепарата

«БИОТРИН». Биопрепарат «БИОТРИН» увеличивал деструкцию углеводов по сравнению в вариантами без обработки: в воде на 54 – 92% от 3 до 14 суток (Нефтеокисляющий биопрепарат..., 2019), в почве на 35 – 86% от 7 до 30 суток, в щебеночном балласте на 87 – 99% до 15 мин (Способ очистки отходов..., 2020).



Рис. 1. Вид экспериментального участка и схема отбора проб
Fig. 1. A view of the experimental plot and the sampling scheme

Биогеосорбент «ГЕОЛЕКС®» представляет собой штаммы биопрепарата «БИОТРИН», иммобилизованные на глауконитовом сорбенте. Биогеосорбент зарекомендовал себя в лабораторных и промышленных экспериментах как эффективное средство для ремедиации водных, почвенных объектов от НП и в технологии очистки щебеночного балласта. Биогеосорбент «ГЕОЛЕКС®» увеличивал разложение углеводов по сравнению с контрольными образцами: в воде на 37 – 76% от 4 до 14 суток (Нефтеокисляющий биопрепарат..., 2019), в почве на 43 – 95% от 14 до 60 суток (Щемелинина и др., 2022), в щебеночном балласте на 82 – 93% до 15 минут (Способ очистки отходов..., 2020).

Кордревесная смесь – хорошо разложенный почвоподобный органический материал, отобранный со склада коры, возрастом более 60 лет со следующими эколого-агрохимическими свойствами: $pH_{(вод.)}$ 8.15, $pH_{(сол.)}$ 7.56; массовая доля азота общего – 6300 мг/кг; подвижных соединений фосфора (в пересчете на P_2O_5) – 7000 мг/кг, калия (в пересчете на K_2O) – 1030 мг/кг, Mg – 3500 мг/кг, Ca – 130 000 мг/кг. Общее микробное число в кордревесной смеси достигало 1.41×10^6 КОЕ/г.

Виды *трав-рекультивантов* для посева, подобранные в соответствии с рекомендациями зональной системы земледелия (Melekhina et al., 2020), обладали до-

статочной устойчивостью к содержащимся в почве загрязнителям, быстрым ростом, надежным вегетативным или семенным размножением. При использовании в целях фитомелиорации выделяли пионерные виды – однолетники и растения с коротким циклом развития, способствующие быстрому захвату территории, так как они обладают низкими конкурентными свойствами в фитоценозе, и со временем замещаются на аборигенные виды, более приспособленные к климатическим и почвенным условиям. Для тяжелых суглинистых почв были выбраны мятлик луговой *Poa pratensis* Linnaeus, 1753 (норма высева 40 – 80 кг/га), овес *Avena sativa* Linnaeus, 1753 (норма высева 200 кг/га), канареечник тростниковидный *Phalaris arundinacea* Linnaeus, 1753 (норма высева 25 – 60 кг/га) и клевер гибридный *Trifolium hybridum* Linnaeus, 1753 (норма высева 30 – 60 кг/га).

Внесение *минеральных удобрений* предполагает обеспечение нефтеокисляющих микроорганизмов и трав-рекультивантов усвояемыми формами азота, фосфора, калия и требуется практически на всех почвах. В технологию рекультивации экспериментального участка было выбрано минеральное удобрение – нитроаммофоска (NPK 16:16:16).

Образец условно незагрязненной почвы (УНП) был отобран в 200 м от экспериментального участка – на не загрязненной нефтью территории, покрытой смешанным березово-сосновым лесом. Фрагменты мохового и лишайникового покрова представлены видами рода *Polytrichum*, *Hylocomium*, преобладали многолетние травы (родов *Carex*, *Cirsium*, *Deschampsia*, *Trifolium*). В понижениях рельефа – сообщества болотных осок.

Отбор проб почвы проводился методом конверта (см. рис. 1) согласно нормативным документам, регламентирующим процедуру, за 30 суток до начала эксперимента, в день постановки эксперимента, спустя 14 и 60 суток ($n = 3$).

Количественный химический анализ был проведен в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН с применением следующих методов: НП – гравиметрическим методом, РД 52.18.647-2003 (Методические..., 2003); pH водной вытяжки – потенциометрическим методом (Методика..., 2018). Для биохимических анализов за основу были взяты методы почвенной энзимологии (Хазиев, 2005).

Статистическую обработку полученных данных проводили непараметрическими методами с помощью пакета программ STATISTICA 10.0 (StatSoft Inc., OK, USA). Параметры выборки представлены в виде медианы, 1 и 3 квартилей, минимальных и максимальных значений выборки и отражены на диаграммах размаха.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка рекультивационного потенциала почв участка. Рекультивационным работам на территории демонтированного резервуарного парка предшествовало изучение рекультивационного потенциала почвенно-грунтового слоя, который включает оценку состояния техногенной поверхности, степени зарастания, определение концентрации загрязнения по фрагментам участка, глубины загрязнения, наличие поверхностной нефти, pH почвы, определение биологической активности.

Площадь участка для проведения опытно-промышленного эксперимента была огорожена сигнальными лентами.

Оценка состояния техногенной поверхности и степени зарастания. В почвенно-грунтовым покрове, трансформированном в результате хозяйственной деятельности, преобладали в основном отложения тяжелого механического состава – суглинки, обуславливающие низкую скорость разложения поллютантов. Особенностью участка являлось отсутствие растительного покрова и плодородного слоя для проведения биоремедиации. Исходные растительные сообщества по периметру участка замещены разреженными пионерными группировками сорняков и кустарников. Ближе к точкам 1 и 2 участка наблюдали переувлажнение, сопровождавшееся накоплением воды с образовавшейся на ней нефтяной пленкой в неровностях рельефа, наполняемых посредством поверхностного стока.

Определение концентрации загрязнения по фрагментам участка, глубины загрязнения, pH почвы. Концентрация нефти УНП согласно обзору А. А. Околеловой с соавторами (2019) оценивалась как средняя, а в почве, отобранной на экспериментальном участке, – как очень высокая. Содержание НП в почве эксперимента в 3.5 – 5.7 раза превышало содержание нефтепродуктов УНП (рис. 2). Глубина проникновения нефти в сформированной на техногенном ландшафте почве составляла 0.15 – 0.25 м. Небольшой фактический размер «ящика» (50%) объема выборки и распределение, близкое к нормальному, в точках свидетельствует о консервации поллютанта в пределах территории обследования.

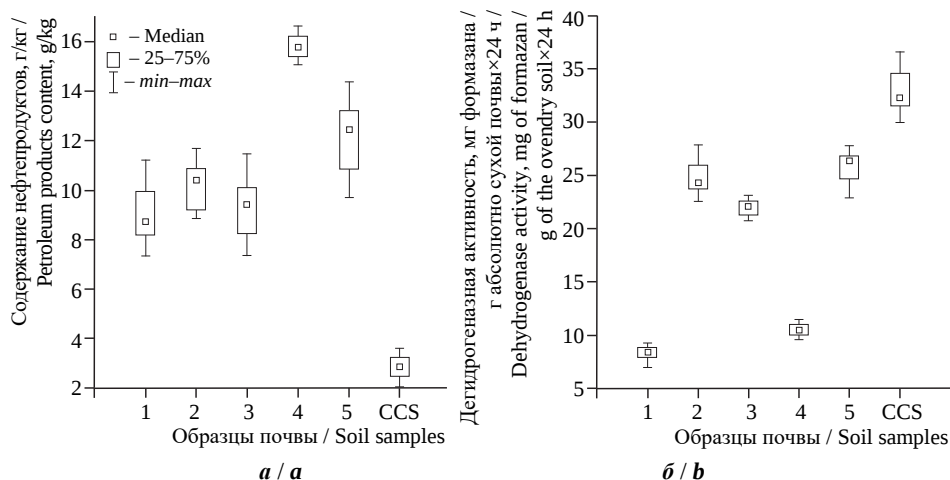


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов (а) и дегидрогеназная активность (б) в образцах почвы при оценке рекультивационного потенциала участка; CCS – образец условно незагрязненной почвы

Fig. 2. The total petroleum hydrocarbon content (a) and the dehydrogenase activity (b) in soil samples while assessing the recultivation potential; CCS is a sample of conditionally clean soil

Уровень кислотности в почве экспериментального участка был нейтральный (рН 6.86 – 7.32), благоприятный для использования микроорганизмов в составе биопрепарата и биогеосорбента.

Определение биологической активности. Изучение ферментативной активности широко используется в экологическом мониторинге при анализе содержания НП и других техногенных органических веществ (Поляк, Сухаревич, 2020). Распад нефти и нефтяных углеводородов в почве связан с окислительно-восстановительными процессами, происходящими при участии различных ферментов (Рябцева и др., 2016). По результатам ранее проведенных исследований на загрязненных НП почв северных территорий установлен индикаторный фермент – дегидрогеназа, наиболее остро реагирующий на любые процессы, происходящие в почве (Anchugova et al., 2016).

Дегидрогеназная активность в загрязненных нефтью образцах почвы, отобранных за 30 суток до постановки эксперимента, варьировала от 8.4 до 25.8 мг формазана / 1 г абсолютной сухой почвы за 24 часа по вариантам и не превышала уровень УНП (см. рис. 2).

Технология рекультивации экспериментального участка. На основании комплексной оценки экспериментального нефтезагрязненного участка (100 м²) была разработана биотехнология очистки почвы, включающая последовательные производственные этапы рекультивации, проведенные друг за другом в течение 3 суток.

1-й этап (в первые сутки): биостимуляция: внесение кородревесной смеси (покрытие загрязненного участка не менее 5 см) → биоаугментация: внесение биопрепарата «БИОТРИН» в количестве 2 дм³ → внесение минеральных удобрений в количестве 10 кг;

2-й этап (на третьи сутки): биоаугментация: внесение активированного биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®» в количестве 10 кг → проведение вспашки мотокультиватором на глубину 0.3 м → посев смеси семян трав-рекультивантов в количестве 10 кг.

Расчет вносимых количеств кородревесной смеси, биопрепарата «БИОТРИН», биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®» был сделан исходя из оценки рекультивационного потенциала почвы участка: концентрации загрязнения (18.4 г/кг), глубины загрязнения (0.15 – 0.25 м), рН почвы (6.86 – 7.32), дегидрогеназной активности и оценки результатов предыдущих исследований (Нефтеоокисляющий биопрепарат..., 2019; Способ очистки отходов..., 2020; Щемелинина и др., 2022; Anchugova et al., 2016; Shchemelinina et al., 2019; Melekhina et al., 2020).

Свежеприготовленная суспензия биопрепарата «БИОТРИН» (активные живые клетки) ускоряла процессы деструкции нефтепродуктов в почве, активировала почвенную микробиоту, приводила к уменьшению срока очистки и снижению количества вносимого биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®». Биогеосорбент «ГЕОЛЕКС®» выполнял 2 функции – сорбирование НП на глауконите и их деструкция иммобилизованными клетками микроорганизмов. Биопрепарат и биогеосорбент, дополняя друг друга, показали высокую нефтеоокисляющую способность в относительно короткие сроки.

Результаты внедрения биотехнологии. Кородревесная смесь на основе КДО оценивалась в качестве структуратора нефтяного шлама в лабораторном эксперименте. При внесении в шлам кородревесной смеси происходило разрыхление почвы, повышение дегидрогеназной активности по сравнению с нефтезагрязненным контрольным вариантом в 1.5 раза, снижение содержания НП на 34.5%, стимулирование роста овса. Исходя из результатов, кородревесная смесь включена в биотехнологию очистки экспериментального участка для разрыхления суглинистой почвы тяжелого гранулометрического состава с целью улучшения воздушного режима, привнесения микрофлоры, стимулирующей рост и развитие растений овса.

Эффективность очистки почвы экспериментального участка на территории демонтированного резервуарного парка от НП за 14 суток составила 18 – 37.5% (рис. 3). Содержание НП в почве имеет асимметричное распределение, дающее основание полагать, что на 14-е сутки произошла мобилизация загрязнения. Эффективность очистки почвы за 60 суток составила 92 – 95% (см. рис. 3).

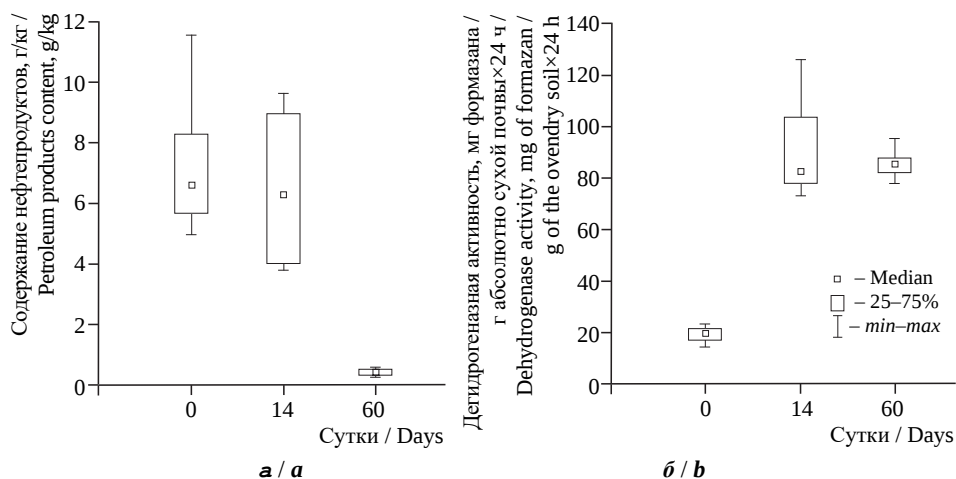


Рис. 3. Содержание нефтепродуктов (а) и дегидрогеназная активность (б) в почве участка в ходе эксперимента

Fig. 3. The total petroleum hydrocarbon content (a) and the dehydrogenase activity (b) in soil samples during the experiment

Дегидрогеназная активность отражала интенсивность процессов окисления нефти. В ответ на инокуляцию микроорганизмов биопрепарата, биогеосорбента и активацию почвенной микробиоты на экспериментальном участке активность почвенной дегидрогеназы повышалась в 4 – 6 раз (см. рис. 3). Процессы дегидрирования к концу эксперимента усиливались, что свидетельствовало об интенсивных процессах трансформации в почве.

Проективное покрытие смесью трав-рекультивантов экспериментального участка составило 85% за 60 суток (рис. 4).

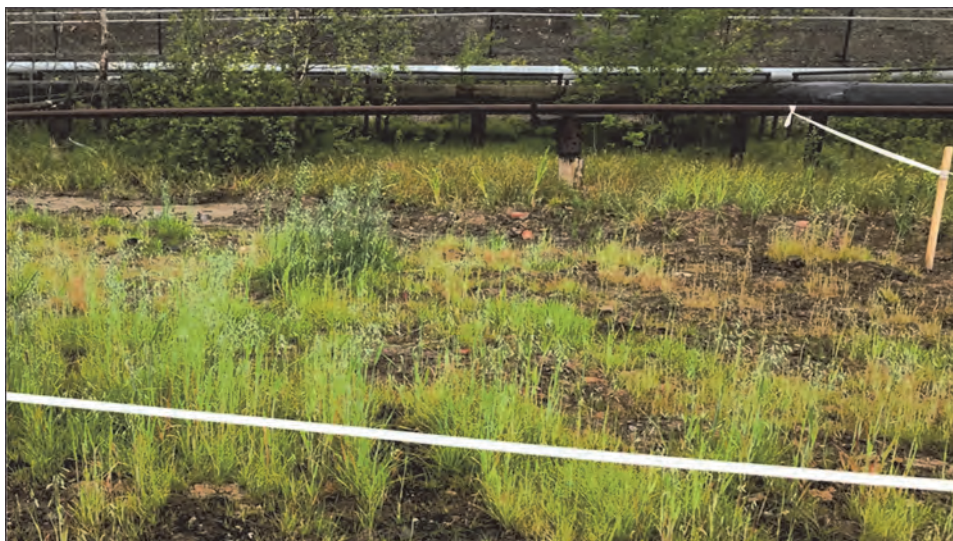


Рис. 4. Проектное покрытие экспериментального участка

Fig. 4. Plant cover of the experimental plot

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что предложенная комплексная биотехнология очистки загрязненной нефтью почвы участка на территории демонтированного резервуарного парка эффективна: снижение содержания НП в почве за 60 суток составило 92 – 95%. Повышение дегидрогеназной активности почвы свидетельствовало об интенсивных процессах окисления органического загрязнителя. Проектное покрытие высевными травами рекультивированного участка спустя 60 суток достигло 85%, что характеризует очищенную почву как не оказывающую ингибирующего действия на рост и развитие растений.

Рекомендовано внедрение разработанной комплексной биотехнологии очистки нефтезагрязнённой почвы на территориях со сходными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артюх Е. А., Мазур А. С., Украинцева Т. В., Костюк Л. В. Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти // Известия СПбГТИ(ТУ). 2014. № 26. С. 58 – 66.

Емельянова Е. К., Алексеев А. Ю., Шестопалов А. М., Забелин В. А. Экологические подходы к биорекультивации нефтезагрязненных грунтов и водоемов в условиях Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 2, № 3. С. 70 – 73.

Коришнюкова Т. Ю., Четвериков С. П., Бакаева М. Д., Кузина Е. В., Рафикова Г. Ф., Четверикова Д. В., Логинов О. Н. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. Т. 55, № 4. С. 338 – 349. <https://doi.org/10.1134/S0555109919040093>

Нефтеокисляющий биопрепарат, биосорбент на его основе и способ его приготовления: пат. 2703500 Рос. Федерация: МПК, C12N 1/26, C02F 3/34, B09C 1/10, C02F 101/32, C12R 1/38,

C12R 1/89 / Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М.; заявитель и патентообладатель Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова. № 2018120922; заявл. 06.06.18; опубл. 17.10.19, Бюл. № 29. 14 с.

Околелова А. А., Капля В. Н., Лапченков А. Г. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43, № 1. С. 76 – 86.

Поляк Ю. М., Сухаревич В. И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3. С. 83 – 93.

РД 52.18.647-2003. Определение массовой доли нефтепродуктов. Методика выполнения измерений гравиметрическим методом. Методические указания. Сыктывкар: Комитет государственной статистики Республики Коми, 2003. 10 с.

Рябцева Н. Д., Никитина В. С., Абдуллин М. И., Багаутдинов Р. Ф., Кадилов А. А. Изучение каталитических процессов микробного окисления нефтяных углеводородов // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21, № 2. С. 308 – 313.

Способ очистки отходов щебневого балласта, применяемого на железной дороге: пат. 2711162 Рос. Федерация: МПК, Е01В 27/06, В08В 3/08 / Некрасова В. Н., Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «БИОЭКОБАЛАНС». № 2019102645; заявл. 30.01.19; опубл. 15.01.20, Бюл. № 2. 10 с.

Ташинова И. Н. Исследование экологической безопасности структуратора на основе отходов строительства и сноса, содержащих amino- и нитроароматические соединения // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 14. С. 139 – 142.

Трусей И. В., Гуревич Ю. Л., Ладыгина В. П. Влияние агрохимической обработки нефтезагрязненной почвы на динамику численности мезофильных и психрофильных микроорганизмов // Поволжский экологический журнал. 2016. № 4. С. 467 – 475.

ФР.1.31.2018.31639. Почвы, грунты, донные отложения, торф. Методика измерений pH, удельной электропроводности водной вытяжки и массовой доли плотного остатка в исследуемых материалах. Методика измерения. Сыктывкар, 2018. 27 с.

Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М., Котова О. Б. Биогeосорбент «Гeолекс»: внедрение технологий в практику // Вестник геонаук. 2022. № 4. С. 51 – 56. <https://doi.org/10.19110/geov.2022.4.3>

Anchugova E. M., Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Shchemelinina T. N. Approaches to the assessment of the efficiency of remediation of oil-polluted soils // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49, no. 2. P. 234 – 237. <https://doi.org/10.1134/S1064229316020022>

Klepikov V. P., Klepikova L. V., Shahbaz M. Oil tank farm emission trends of Russian refineries // Energy Reports. 2022. Vol. 8, suppl. 9. P. 1236 – 1244. <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2022.07.068>

Lawniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A. P., Heipieper H. J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons – basic principles for bioremediation: A review // Molecules. 2020. Vol. 25, no. 4. Article number 856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>

Melekhina E. N., Kanev V. A., Markarova M. Yu., Nadezhkin S. M., Nowakowski A. B., Taskaeva A. A., Tarabukin D. V., Velegzhaninov I. O., Rasova E. E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: A multidisciplinary approach // Theoretical and Applied Ecology. 2020. № 2. P. 123 – 129. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-123-129>

Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M., Shushkov D. A., Harja M., Ignatiev G. V., Anchugova E. M. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: modelling and properties // Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2019. Vol. 71, no. 4. P. 131 – 137. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>

Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup

T. N. Shchemelinina ✉, E. M. Anchugova

*Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar 167982, Russia*

Received: 5 October 2022 / revised: 27 January 2023 / accepted: 26 February 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. Technologies with integrated resource applications are probable solutions to the problem of soil pollution with oil and petroleum products. Based on our assessment of the potential for the recultivation of a plot on the territory of a rigged out reservoir tank storage, a biotechnology, including both forestry residues and biological agents capable of enhancing soil remediation processes, was developed. After having been applied, the technology comprising the BIOTRIN biopreparation, the GEOLEX® biogeosorbent, bark-and-wood waste and seeds to promote revegetation showed a soil cleanup efficiency of 92–95% for 60 days. The dehydrogenase activity increased, confirming intense processes of pollutant oxidation. After 60 days, the plant cover with sown herbs reached 85%, which characterized the purified soil as having no inhibitory effect on the growth and development of plants.

Keywords: soil, oil pollution, biopreparation, biogeosorbent, bark-and-wood waste, herbs to promote revegetation, cleanup technology

Funding. The study was supported by the State Task of the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on “Scientifically Justified Biotechnologies to Improve the Ecological Situation and Human Health in the North” (no. 1021051101411-4-1.6.23), BIOECOBALANCE LLC.

For citation: Shchemelinina T. N., Anchugova E. M. Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 246–256 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

REFERENCES

Artyukh E. A., Mazur A. S., Ukrainitseva T. V., Kostyuk L. V. Looking forward to biosorbents future application for ponds’ cleaning after emergency oil spills. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2014, no. 26, pp. 58–66 (in Russian).

Emel’yanova E. K., Alekseev A. Yu., Shestopalov A. M., Zabelin V. A. Ecology-based approaches to bio-remediation of oil-contaminated soil and water in Siberia. *Interexpo GEO-Siberia*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 70–73 (in Russian).

Korshunova T. Yu., Chetverikov S. P., Bakaeva M. D., Kuzina E. V., Rafikova G. F., Chetverikova D. V., Loginov O. N. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 344–354. <https://doi.org/10.1134/S0003683819040094>

Oil-Oxidizing Biopreparation, Biosorbent Based on it and Method for its Preparation. Patent RU 2703500. Int. Cl. C12N 1/26, C02F 3/34, B09C 1/10, C02F 101/32, C12R 1/38, C12R 1/89.

✉ *Corresponding author.* Laboratory of Biochemistry and Biotechnology of the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Tatiana N. Shchemelinina: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424>, shchemelinina@ib.komisc.ru; Elena M. Anchugova: <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518>, anchugova@ib.komisc.ru.

Shchemelinina T. N., Anchugova E. M.; Proprietor: Tatyana N. Shchemelinina, Elena M. Anchugova. Application: 2018120922, Published: 06.06.2018, Date of publication 17.10.2019, Bulletin no. 29. 14 p. (in Russian).

Okolelova A. A., Kaplya V. N., Lapchenkov A. G. Evaluation of oil content in soils. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 2019, vol. 43, no. 1, pp. 76–86 (in Russian).

Polyak Yu. M., Sukharevich V. I. Soil enzymes and soil pollution: Biodegradation, bioremediation, bioindication. *Agrokhimiya*, 2020, no. 3, pp. 83–93 (in Russian).

RD 52.18.647-2003. *Opreделение massovoj doli nefteproduktov. Metodika vypolneniya izmenenij gravimetricheskim metodom. Metodicheskie ukazaniya* [Regulation Document 52.18.647-2003. Determination of the Total Petroleum Hydrocarbons Mass Concentration. The Measurement Procedure Based on the Gravimetric Method]. Syktyvkar, State Statistic Committee of the Republic of Komi Publ., 2003. 10 p. (in Russian).

Ryabtseva N. D., Nikitina V. S., Abdullin M. I., Bagautdinov R. F., Kadirov A. A. The research on catalytic processes of the microbial oxidation of petroleum hydrocarbons. *Bulletin of Bashkir University*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 308–313 (in Russian).

Method of Cleaning Crushed Ballast Wastes Used on Railway. Patent RU 2703500. Int. Cl. E01B 27/06, B08B 3/08. Nekrasova V. N., Shchemelinina T. N., Anchugova E. M.; Proprietor: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu “BIOEKOBALANS”. Application: 2019102645, Published: 30.01.2019, Date of publication 15.01.2020, Bulletin no. 2. 10 p. (in Russian).

Tashkinova I. N. The research on the environmental compatibility of the structure-forming agent based on mineral construction and demolition waste containing aminoaromatics and nitroaminoaromatics. *Herald of Technological university*, 2017, vol. 20, no. 14, pp. 139–142 (in Russian).

Trusey I. V., Gurevich Y. L., Ladygina V. P. Influence of the agrochemical treatment of oil-contaminated soil on the abundance dynamics of mesophilic and psychrophilic microorganisms. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2016, no. 4, pp. 467–475 (in Russian).

FR.1.31.2018.31639. *Pochvy, grunty, donnye otlozheniya, torf. Metodika izmerenij pH, udel'noj elektroprovodnosti vodnoj vytyazhki i massovoj doli plotnogo ostatka v issleduemyh materialah. Metodika izmereniya* [Federal Register 1.31.2018.31639. Soils, Sediments, Peat. The Measurement Procedure for pH, Specific Conductivity of a Soil-Water Extract and Dissolved Solids in Sampling Materials. The Measurement Procedure]. Syktyvkar, 2018. 27 p. (in Russian).

Khaziev F. Kh. *Metody pochvennoi enzimologii* [Methods of Soil Enzymology]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 252 p. (in Russian).

Shchemelinina T. N., Anchugova E. M., Kotova O. B. The Geolex biogeosorbent: Practical application of technologies. *Vestnik of Geosciences*, 2022, no. 4, pp. 51–56. <https://doi.org/10.19110/geov.2022.4.3>

Anchugova E. M., Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Shchemelinina T. N. Approaches to the assessment of the efficiency of remediation of oil-polluted soils. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 2, pp. 234–237. <https://doi.org/10.1134/S1064229316020022>

Klepikov V. P., Klepikova L. V., Shahbaz M. Oil tank farm emission trends of Russian refineries. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, suppl. 9, pp. 1236–1244. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.068>

Ławniczak Ł., Woźniak-Karczevska M., Loibner A. P., Heipieper H. J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons – basic principles for bioremediation: A review. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 4, article number 856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>

Melekhina E. N., Kanev V. A., Markarova M. Yu., Nadezhkin S. M., Nowakowski A. B., Taskaeva A. A., Tarabukin D. V., Velegzhaninov I. O., Rasova E. E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: A multidisciplinary approach. *Theoretical and Applied Ecology*, 2020, no. 2, pp. 123–129. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-123-129>

Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M., Shushkov D. A., Harja M., Ignatiev G. V., Anchugova E. M. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: modelling and properties. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2019, vol. 71, no. 4, pp. 131–137. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>

Редактор *А. Б. Мамаев*
Редактор английского текста *С. Л. Шмаков*
Художник обложки *И. Е. Табачишина*
Оригинал-макет подготовлен *В. Г. Табачишиным*
Корректор *Ю. И. Астахова*

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-23682 от 16.03.2006 г.
в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Учредители: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

ООО «Товарищество научных изданий КМК».
при участии ИП Михайлова К.Г.
123100 Москва, а/я 16; mikhailov2000@gmail.com

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных материалов в ООО «Фотоэксперт».
109316 Москва, Волгоградский проспект, д.42, корп.5, эт.1, пом. I, комн. 6.3-23Н.
Подписано в печать 17.06.2023. Подписано в свет 21.06.2023.
Формат 70х100/16. Объём 8,0 печ.л. Бум. мелов. Тираж 40 экз. Цена свободная

ISSN 1684-7318



9 771684 731009 >

ISSN 1684-7318 ПОВОЛЖСКИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ 2023 №2



ТОВАРИЩЕСТВО
НАУЧНЫХ
ИЗДАНИЙ КМК