



**Издатель**

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

Научный электронный журнал

**ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ**

<http://ecopri.ru>

**№ 2 (40). Июнь, 2021**

**Главный редактор**

А. В. Коросов

**Редакционный совет**

В. Н. Большаков  
А. В. Воронин  
Э. В. Ивантер  
Н. Н. Немова  
Г. С. Розенберг  
А. Ф. Титов

**Редакционная коллегия**

Г. С. Антипина  
В. В. Вапиров  
Т. О. Волкова  
Е. П. Иешко  
В. А. Илюха  
Н. М. Калинкина  
А. М. Макаров  
А. Ю. Мейгал  
В. К. Шитиков  
В. Н. Якимов  
A. Gugolek B.  
J. B. Jakovlev  
R. Krasnov  
J. P. Kurhinen

**Службы поддержки**

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

**ISSN 2304-6465**

**Адрес редакции**

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

E-mail: [ecopri@psu.karelia.ru](mailto:ecopri@psu.karelia.ru)

<http://ecopri.ru>





## Содержание № 2. 2021

### От редакции

*Точнее*

3

### Аналитический обзор

- Полякова О. С.,  
Семенов С. Ю.      *Эмергетический анализ и опыт его использования для оценки антропогенных и природных систем*      4 – 20
- Mazanaeva L. F.,  
Gichikhanova U. A.      *Status of populations of the spur-thighed tortoise Testudo graeca Linnaeus, 1758 (Testudinidae, Reptilia) in Dagestan*      21 – 37

### Оригинальные исследования

- Головатюк Л. В.,  
Зинченко Т. Д.,  
Шитиков В. К.      *Пространственное распределение разнообразия донных сообществ лотических систем среднего и нижнего Поволжья*      38 – 53
- Деревенская О. Ю.,  
Галлямова Р. Р.      *Оценка восстановления сообщества зоопланктона озера Чишмяле после мероприятий по экореабилитации*      54 – 66
- Морозов Н. В.,  
Ганиев И. М.      *Технология биоочистки производственных сточных вод от отработанных смазочных (моторных) масел*      67 – 78
- Снегин Э. А.,  
Бархатов А. С.,  
Снегина Е. А.      *Особенности питания лягушки озерной (Pelophylax ridibundus Pallas, 1771) в условиях урбанизированной территории г. Белгорода (Россия)*      79 – 87
- Татаринов А. Г.,  
Кулакова О. И.      *Видовой состав и структура населения булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Papilionoidea) национального парка «Нечкинский» (Удмуртская Республика)*      88 – 101

### Методы экологических исследований

- Румянцев Д. Е.,  
Фролова В. А.      *Проблемы диагностики аварийности деревьев в урбанизированной среде*      102 – 119

### Синописис

- Горбач В. В.      *Практическое введение в среду R*      120 – 122



Выпуск № 2

От редакции

## ТОЧНЕЕ

*Уважаемые читатели, авторы и рецензенты!*

Редколлегия журнала в очередной раз обращает ваше внимание на необходимость подготовки научных рукописей, точнее соответствующих нашей политике.

Статьи должны рассматривать экологические объекты с целью выявления закономерностей их функционирования. Для доказательства необходимо использовать количественные методы и компьютерные технологии. Именно в этом случае есть шанс выяснить некоторые *принципы* организации экологических природных объектов.

Конечно, при этом невозможно обойтись без фактологического описания характеристик изучаемых объектов, но это описание не должно превращаться в самоцель. Мы не хотим публиковать факты, мы стремимся доказывать закономерности.

Для иллюстрации того, какие статьи нам нужны, а какие нет, рассмотрим статьи Л. Ф. Mazanaeva и Л. В. Головатюк. Обе статьи вызвали критическое обсуждение в редколлегии. Статья Л. Ф. Mazanaeva содержит яркие, интересные, уникальные сведения, однако без всякой аналитической компоненты. Больше мы не будем публиковать рукописи со сводками пусть даже и очень интересных фактов. Статья Л. В. Головатюк вызвала дискуссии методического характера об адекватности и точности применения весьма сложных аналитических методов. Это именно то, что нам хочется видеть на своих страницах. Нашим авторам необходимо понять, что тематическая и теоретическая однородность является ведущим требованием Scopus к нашему журналу, из-за чего до сих пор мы не вошли в эту базу. Редколлегия призывает авторов полнее следовать нашей политике, конкретизировать тематическую направленность на поиск закономерностей, тем самым помочь повысить статус журнала и его публикаций.

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



УДК УДК 502.15:574.635.15:574.635

# ЭМЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПЫТ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

**ПОЛЯКОВА**  
Оксана Сергеевна

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, oksanochka84@list.ru*

**СЕМЕНОВ**  
Сергей Юрьевич

*кандидат биологических наук, Томский государственный университет, p9138009960@gmail.com*

**Ключевые слова:**

эксергия  
эмергия  
канализационные  
очистные сооружения  
экологическая  
инженерия  
экологический эффект

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы оснований и развития эмергетического анализа (ЭМАН), понятийный аппарат и методики расчета основных эмергетических показателей. Эмергия – это величина эксергии одного вида, которая прямо или косвенно необходима для поддержания процесса или накопления энергии другого вида или вещества. По мере усложнения системы величина энергии, заключенной в объекте (услуге), уменьшается, а степень ее преобразованности (трансформированности) возрастает. Эмергия измеряется в солнечных Дж, которые могут быть оценены с помощью трех различных эмергетических единиц: степенью трансформированности, специфической эмергией и эмергией денежной единицы. В опубликованных русскоязычных работах в качестве эквивалента английского термина *transformity* используется термин «трансформация». Более адекватным является термин «degree of transformation», объединяющий *transformity, specific emergy and emergy on money*. Подход Г. Одума к оценке предприятий для защиты окружающей среды от загрязнений основан на понимании сточных вод как высокоценного ресурса. Но, в отсутствие экономических технологий возвращения отходов в производственные циклы, сточные воды, например, сегодня большей частью обезвреживаются, а не утилизируются. Целью создания и функционирования канализационных очистных сооружений в настоящее время является снижение загрязнения природы. Ряд исследователей (Вассало, Цзо, Чен) в эмергетическую стоимость функционирования природоохранного объекта включают экосистемные траты на нейтрализацию негативного воздействия образующихся отходов. Поляковой и Семеновым предложен эмергетический индекс для оценки экологической эффективности природозащитных предприятий, характеризующий снижение (увеличение) нагрузки на биосферу за счет создания и функционирования канализационных очистных сооружений. В методологии эмергетического анализа отсутствует оценка замены одних экосистем другими. Поэтому дальнейшее развитие анализа должно включать разработку специального аппарата для такой оценки.

© Петрозаводский государственный университет

**Рецензент:** А. В. Поздняков

Получена: 03 декабря 2020 года

Подписана к печати: 15 июня 2021 года

## Введение

Общественным структурам (государствам, поселениям, предприятиям и пр.) для успешного осуществления хозяйственно-экономической деятельности необходимо объективно оценивать понесенные в ходе этой деятельности издержки и образующуюся прибыль. Поэтому для анализа экономических (производственных, логистических, финансовых), образовательных, здравоохранительных, культурных и др.) систем к настоящему времени разработаны методы, которые можно разделить на два типа: стоимостные (собственно стоимостной, анализ жизненного цикла) и энергетические (собственно энергетический, эксергетический, эмергетический).

Стоимостной анализ широко критикуется специалистами за свою конъюнктурность. Часть товаров и услуг, особенно связанную с природными системами, адекватно выразить через денежный эквивалент не представляется возможным. Для характеристики этой категории товаров (объектов) был предложен термин «нематериальные» (Булатов, 2004). Таким образом, широко распространенный и давно применяемый в экономике стоимостной анализ (затраты-выгоды) не может достаточно корректно работать с нематериальными товарами. Это выражается в неспособности стоимостного анализа дать денежную оценку многим природным эффектам, причем даже таким, которые предсказуемы в количественном выражении. Например, инженеры способны вычислить понижение уровня нижнего течения реки (вследствие строительства плотины), а биологи способны предсказать влияние на гидробионтов, которые подвергнутся наибольшему вымиранию. Однако никто не может корректно рассчитать стоимость каждого утраченного вида.

Можно привести еще один пример несостоятельности стоимостного анализа. Так, солнечное лето с умеренным количеством осадков характеризуется хорошим урожаем пшеницы, и закупочные цены на нее снижаются. То есть при максимальном вкладе природной энергии образуются низкие цены: рынок низко ценит «хорошую погоду» в любой отрасли экономики, при ней происходит резкое увеличение предложения и обесценивание продукта (Иванова, 2002). Использование денежной платы для оценки ресурса окружающей среды сильно недооценивает сделанные в него вложения.

Несмотря на обозначенные недостатки стоимостного анализа, он занимает главенствующее место среди существующих анализов. Все технико-экономические обоснования реализуются через стоимостные характеристики. Стоимостной анализ подвергся серьезной корректировке с течением времени, появился «анализ жизненного цикла», представляющий собой разновидность стоимостного анализа, но со своими особенностями и чертами. Примером «анализа жизненного цикла» может послужить следующая иллюстрация: приобретение автотранспортного средства требует от его владельца учитывать не только стоимость авто, но и эксплуатационные издержки (расход горюче-смазочного материала (ГСМ), частота поломок, цена комплектующих деталей, страховка), а также траты на утилизацию. Таким образом, полная стоимость использования автомобиля будет в разы выше, чем затраты на его приобретение.

При наличии замечаний, предъявляемых к стоимостному анализу, исследователи пытались разработать альтернативный подход к оценке функционирования природных и антропогенных систем. Таким новым подходом явился энергетический анализ, а выгодным отличием его от стоимостного анализа выступает то, что энергия не подвержена никакой конъюнктуре в отличие от финансовых потоков. Поэтому энергетический подход является более адекватным для оценки экосистем. Но и у энергетического анализа есть свои недостатки.

Традиционный энергетический анализ не учитывает «качества» энергии. Например, эффективность превращения электрической энергии в тепловую, механическую, в свет гораздо выше, а при преобразовании топлив в эти же виды энергий коэффициент полезного действия (КПД) в разы ниже. Для того, чтобы этот недостаток исключить, используется эксергетический анализ, который учитывает КПД тех или иных энергетических преобразований (Yunus, 2015). В расчет берется не вся энергия, а только полезная энергия, выражаемая как доля от затраченной. Так, на тепловых электростанциях от полной теплоты сгорания угля около 50 % превращается в электроэнергию, при преобразовании электрического тока в свет (люминесцентными лампами) не более 30 %. Эксергетический анализ учитывает только эти доли. Результат – это количество джоулей эксергии, затраченных на единицу продукции. В целом этот тип анализа позволяет вычислить полную

эксергию производственного цикла. В то же время, будучи свободным от антропоцентризма, характерного для стоимостных методов, эксергетический анализ достаточно жестко ориентирован на исследование техносферы (Казаков и др., 2013), а природные экосистемы трудно поддаются описанию с помощью законов термодинамики. Природные материалы играют существенную роль в технологическом цикле, и этот вклад или вообще не учитывается, или плохо учитывается.

Эту проблему призван решать эмергетический анализ Г. Одума. Поскольку научно-исследовательских работ, излагающих сущность ЭМАН, на русском языке представлено минимальное количество, то целесообразно предложить наше понимание подхода Г. Одума для оценки систем.

Цель работы – представить краткое изложение концепции ЭМАН, выявить тенденции и элементы развития для расширения практики его использования в различного типа обоснованиях проектов создания и модернизации систем защиты окружающей среды, а также определения экологического ущерба природе от антропогенной деятельности.

## Аналитический обзор

Материалами исследования являются англо- и русскоязычные публикации о разработке, критике и применении эмергетического анализа, период написания которых – с 1971 по 2019 г. При написании работы в разной степени изучено более 300 публикаций, включая статьи, индексируемые в РИНЦ, Web of Science, Scopus, а также проанализированы диссертации, учебные пособия и материалы конференций. В настоящей статье упоминается 60 основополагающих статей. Количество англоязычных статей, в которых обсуждается и применяется ЭМАН, превышает 2000. Статьи публикуются в таких журналах, как *Journal of Cleaner Production*, *Ecological Modelling*, *Fuel and Energy Abstracts*, *Ecological Indicators*, *Agriculture, Ecosystems & Environment* и др., с численными показателями цитируемости (импакт-фактором) от 2 до 7. Русскоязычных статей подобного плана в 75 раз меньше (31 статья).

Метод исследования материала включает хронологический и логический анализы содержания этих публикаций на предмет расширения и уточнения понятийного аппарата анализа, а также модернизацию классических эмергетических индексов относительно

исследуемого объекта. В статье изучаются методики расчета основных эмергетических показателей (индекс эмергетического выхода, индекс нагрузки на окружающую среду, индекс устойчивости), а также исследуются примеры использования ЭМАН в практике оценки товарообмена между странами, влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения, функционирование природоохранных объектов.

Основоположником ЭМАН является Г. Одум, который показал неравноценность разных видов энергии (механической, тепловой, электрической) (Odum, 1971) и предложил единую методику оценки не только разных типов энергии, но и вещества, информации, природных, антропогенных, в том числе и культурных, процессов. В продолжение своей работы Г. Одум разработал модель, в которой объекты и процессы распределены в соответствии с их энергосодержанием (все затраты энергии на возникновение или создание объекта или процесса) (Odum, 1996). В модели используется понятие эксергии, учитывающее деградацию энергии в любых процессах в соответствии со вторым началом термодинамики. Базовым понятием модели объявлена эмергия – величина эксергии одного вида, которая прямо или опосредованно используется для поддержания процесса или накопления энергии другого вида или вещества. В качестве единицы измерения эмергии в модели принят джоуль солнечного излучения – эмджоуль. Основой модели выступает закон максимизации эмергетической мощности, в соответствии с которым все самоорганизующиеся системы (включая экономику) в своем развитии увеличивают поток используемой эмергии (эмергетическую мощность).

Примером обозначенной модели служит иерархия информации (рис. 1) в течение человеческой жизни и по категориям образованных граждан в Соединенных Штатах Америки за 1998 г. (Odum, 1996). Жизнедеятельность большей части населения страны является основой для жизни меньшего числа людей, но работающих на более высоких уровнях социальной организации, а на вершине иерархии находятся политические лидеры. Трансформация в каждой категории граждан была получена путем деления годового совокупного эмергетического потока на количество людей в каждой категории и годовую метаболическую энергию на человека. На протяжении всей биологической и последующей культурной эволюции чело-

вещество двигалось к более высоким трансформациям, поскольку все больше солнечной эмергии поступало в общую информа-

ционную сеть общества. Человеческий прогресс оценивается переходом слева направо по информационной иерархии.

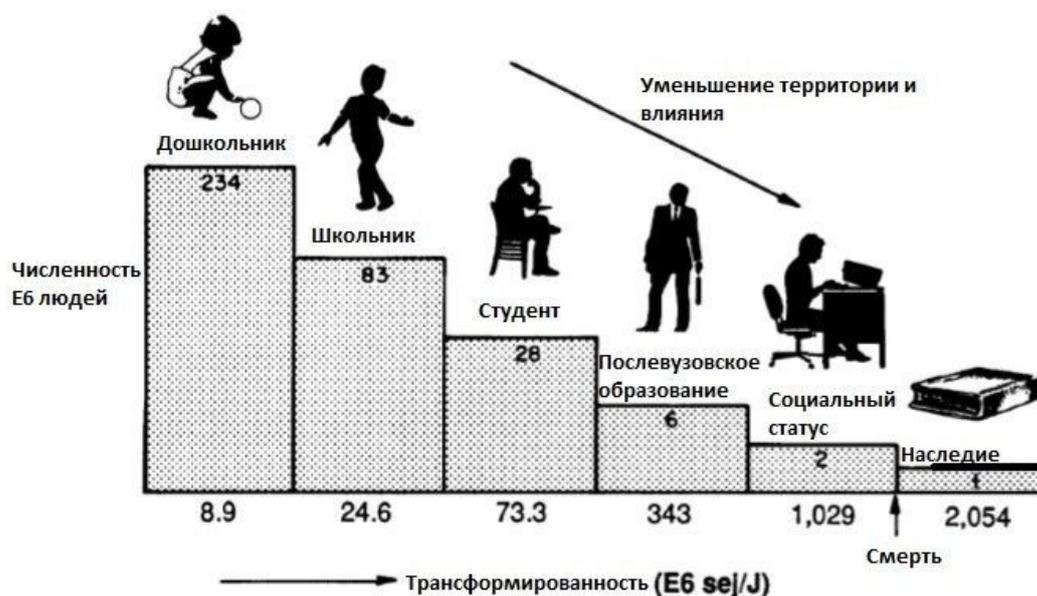


Рис. 1. Иерархические уровни образования, достигаемые по мере человеческого взросления и развития. Население Соединенных Штатов в каждой категории представлено как функция солнечной трансформированности

Fig. 1. Hierarchical levels of education achieved as a person grows and develops. The US population in each category is graphed as a function of solar transformity

По мере усложнения системы величина заключенной в объекте (услуге) энергии уменьшается, а степень ее преобразованности (трансформированность) возрастает. Так, консументы заключают в себе более трансформированную (преобразованную) энергию в сравнении с продуцентами, а электрическая энергия в сравнении с тепловой энергией, информация в сравнении с трудом и др. (Odum, Odum, 1983) (рис. 2).

Г. Одумом разработан алгоритм учета эмергии, при котором ежегодный эмергетический поток, поступающий в биосферу от Солнца, луны, внутреннего тепла Земли, является базовым уровнем (Odum, 1996). Эмергия этого уровня представляет собой движущую силу для всех последующих физических процессов в биосфере, а запасается она в объектах (ископаемое топливо, руды, биомасса леса, органический компонент почвы) и используется в дальнейшем. Доля поступающей эмергии, необходимая на создание единицы исходящей эксергии, представляет собой солнечную трансформацию (сэДж/Дж).

Совокупная солнечная эмергия ( $U$ ), управ-

ляющая производственным процессом продукта ( $P$ ), выражается как:

$$U = \sum_{i=1}^n E_i \cdot Tr_i = E_i \cdot Tr_i, \quad (1)$$

где  $E_i$  – эксергия,  $Tr_i$  – трансформация солнечного излучения  $i$ -ого входящего потока  $P_i$ .  $U$  считается от всех независимых входящих потоков (т. е. потоки, которые не происходят от схожих источников),  $E_i$  и  $Tr_i$  – это  $n$ -пространственные векторы, зависящие от входящих потоков в процесс.

Трансформация солнечного излучения  $Tr_i$  входящего потока  $P_i$  определяется следующим образом:

$$Tr_i = \frac{U_i}{E_i} = \sum_j E_{ij} \cdot \frac{Tr_{ji}}{E_i} = E_j \cdot \frac{Tr_j}{E_i} \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

где  $U_i$  – солнечная эмергия, управляющая производством  $P_i$  в то время как  $E_{ij}$  – эксергия и  $Tr_{ji}$  – солнечная трансформация  $j$ -го входящего потока, содействующего  $P_i$ . По определению, трансформация солнечного излучения равна 1. Замена (2) на (1) дает следующую формулу:

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot Tr_{ji} = E \cdot Tr, \quad (3)$$

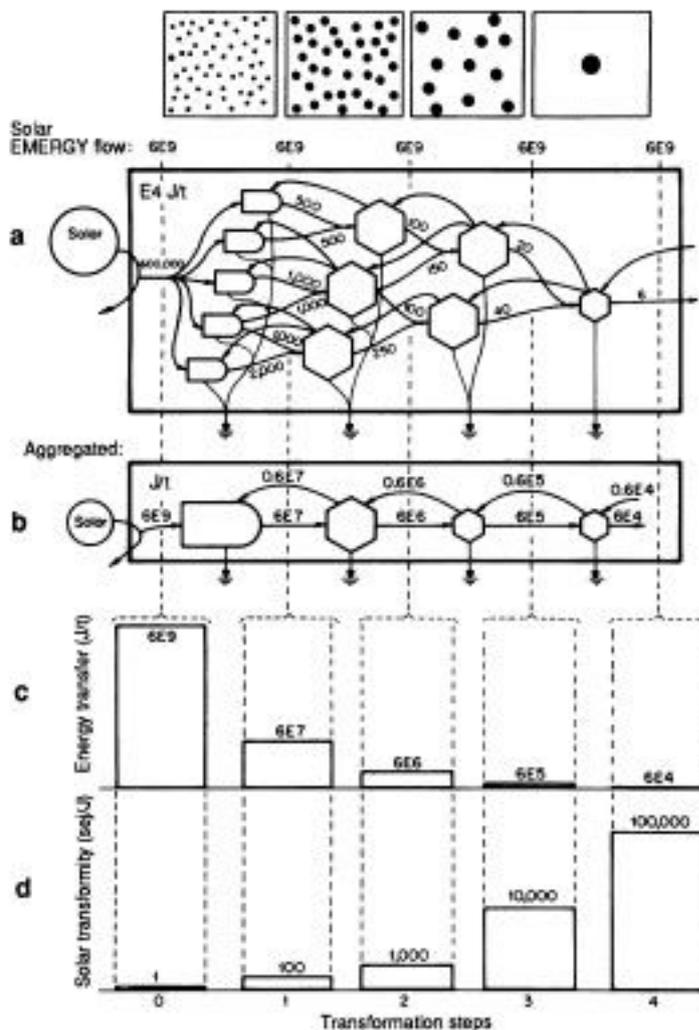


Рис. 2. Иерархия энергий: а – сеть с энергетическими потоками, б – преобразованная энергетическая сеть в цепь, с – график энергетических потоков на каждом уровне энергетической иерархии, д – солнечные трансформации на каждом уровне иерархии

Fig. 2. The energy hierarchy: a – network with energy flows, b – converted energy network to a circuit, c – graph of energy flows at each level of the energy hierarchy, d – solar transformations at each level of the hierarchy

где  $E$  – матрица всех косвенных эксергетических входящих потоков, поддерживающих производственные процессы,  $Tr$  – матрица «трансформация», которая соединяет каждый поток с совокупной эмергией  $U$ .

Поступающие потоки  $E_i$  в процесс могут

быть локально возобновимыми ( $R_i$ ), локально невозобновимыми ( $N_i$ ) или привнесенными извне ( $F_i$ ; обратные связи, привнесенные извне, усиливают процесс). Поэтому эквивалентная формула для (1) это:

$$U = \sum_{i=1}^n Tr_i \cdot R_i + \sum_{j=1}^{n'} Tr_j \cdot R_j + \sum_{k=1}^{n''} Tr_k \cdot R_k. \quad (4)$$

Совокупная солнечная эмергия  $U$ , управляющая процессом, определяется как мера

потребленного ресурса.

Трансформация исходящего потока – это:

$$Tr_{out} = \frac{\text{совокупная эмергия } U \text{ управляющая процессом}}{\text{доступная энергия (эксергия) исходящего потока}} = \frac{\sum_i Tr_i \cdot R_i + \sum_j Tr_j \cdot R_j + \sum_k Tr_k \cdot R_k}{E_{out}} \quad (5)$$

Эмергия обычно измеряется в солнечных Дж, которые могут быть оценены с помощью трех различных эмергетических единиц: степенью трансформированности, специфической эмергией и эмергией на денежную единицу. Степень трансформированности – это затраченная эмергия на единицу энергетического потока, обычно выражаемая в единицах эмДж/Дж. Специфическая эмергия – затраченная на создание единицы определенного вещества (массы) (сэДж/г). Эмергия на денежную единицу (сэДж/\$) – это отношение эмергии, используемой для создания продукта, к соответствующим финансовым затратам. В некоторых случаях

имеет смысл использовать эмергозатраты на единицу рабочего времени (сэДж/час) (Brown, Herendeen, 1996). Transformity энергии солнечного излучения большинства товаров, объектов и услуг вычислены Г. Одумом (Odum, 1988), примеры некоторых из них приведены в табл. 1.

В опубликованных русскоязычных работах в качестве эквивалента английского термина transformity используется термин «трансформация», который по смыслу обозначает процесс, содержание же transformity ближе к значению «результат». Поэтому более адекватным переводом был бы термин «степень трансформированности».

Таблица 1. Степень трансформированности и удельная эмергозатратность энергетических потоков

Наименование потока	Степень трансформированности (сэДж/Дж) и удельная эмергозатратность
Потоки из окружающей среды	
Солнечная радиация	1 [13]
Ветер	1.5E + 03 [13]
Геопотенциал дождя	1.0E + 04 [13]
Химический потенциал дождя	1.8E + 04 [13]
Кинетическое воздействие дождя	2.4E + 05 сэДж/Дж
Энергия приливов	7.39E + 04 сэДж/Дж
Почвы	1.18E + 04 сэДж/Дж
Растительность	6.7E + 03 сэДж/Дж
Биомасса леса	3.6E + 04 сэДж/Дж
Торф	5.7E + 04 сэДж/Дж
Рыба	8.4E + 06 сэДж/Дж
Рогоз	6.9E + 03 сэДж/Дж
Строительные материалы	
Кирпичи	2.00E + 09 сэДж/г
Бетон	4.7E + 09
Оборудование	6.7E + 09
Железо	1.78E + 09 сэДж/г
Полезные ископаемые	
Уголь	9.7E + 04 сэДж/Дж
Нефть	1.5E + 05 сэДж/Дж
Известняк	1 E9 сэДж/г [12]
Природный газ	43500
Ядерная энергия	5.4E + 05 сэДж/Дж
Экономические показатели	
Прибыль	1.31E + 12 сэДж/\$
Работа операторов по обслуживанию очистных сооружений	1.31E + 12 сэДж/\$
Поступающие стоки (Дж)	3.73E + 06
Вода, необходимая на разбавление ТБК (Дж)	48000

Как видно из таблицы, по мере усложнения организации объекта степень трансформированности увеличивается.

Методологией эмергетического анализа является системный подход, осуществляемый сверху вниз. Первый этап анализа – это составление детальной энергетической диаграммы, являющейся начальной сетью (схемой) общего представления о системе, которая позволяет сравнивать величины поступающих, исходящих потоков и их аккумуляцию. Диаграмма является эскизным проектом взаимоотношений между компонентами, направлениями обмена и ресурсными потоками. Это достигается за счет:

а) определения границы системы для правильного учета поступающих потоков;

б) составления списка главных компонентов, которым придается большое значение на изучаемом уровне;

в) знания количественных характеристик процессов, происходящих в пределах границы (потоков, взаимоотношений, взаимодействий, процессов производства и потребления, обязательно включающих финансовые операции и труд);

г) использования языка символов.

Г. Одумом был предложен ряд символов, которые широко используются с 1965 г. для написания системных диаграмм. В русскоязычной литературе эти символы представлены в работе (Фаминская, Потехина, 2011).

На основании разработанной энергетической системной диаграммы осуществляется второй этап анализа – составление эмергетической таблицы, в которой отражаются поступающие в систему потоки, их энергетическое значение, трансформации этих потоков и вычисленная величина эмергии.

Последний этап эмергетического анализа – это расчет эмергетических индексов, на основании которых делаются выводы о преимуществах и недостатках сравниваемых систем.

Основными эмергетическими индексами, используемыми в работах Г. Одума и сотрудников, являются коэффициент эмергетического выхода ( $EYR$  – energy yield ratio), коэффициент нагрузки на окружающую среду ( $ELR$  – environmental loading ratio) и индекс эмергетической устойчивости ( $ESI$  – energy sustainability index) (Odum, 1996).

Коэффициент эмергетического выхода ( $EYR$ ) – это отношение суммы эмергий

возобновляемых ( $R$ ), невозобновляемых ( $N$ ) и закупленных ( $F$ ) ресурсов к эмергии приобретенных ресурсов ( $F$ ):

$$EYR = \frac{R + N + F}{F} \quad (6)$$

Коэффициент выступает обязательным параметром анализа производственных и экономических систем, характеризуя эмергетическую целесообразность создания и функционирования рассматриваемой системы в конкретных условиях. Система, имеющая более высокие значения индекса, является экономически предпочтительной.

Коэффициент нагрузки на окружающую среду ( $ELR$ ) определяется как отношение суммы невозобновляемой и закупленной эмергии к возобновляемой эмергии:

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad (7)$$

Коэффициент нагрузки на окружающую среду характеризует ресурсную истощительность технологии (системы). Предпочтительными являются более низкие значения индекса.

Индекс  $ESI$  (эмергетический индекс устойчивости), равный отношению экономичности ( $EYR$ ) к истощительности ( $ELR$ ), определяет степень жизнеспособности объекта:

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} = \frac{R^2 + NR + FR}{FN + F^2} \quad (8)$$

В целом три рассмотренных параметра дают наиболее общую, «эскизную» характеристику производственного объекта и являются, как отмечено выше, более объективными показателями в сравнении с такими аналогичными стоимостными параметрами, как рентабельность, общая ресурсоемкость и степень независимости от платных ресурсов (рынка).

Количественная оценка всех потоков энергии и вещества в единой размерности (энергия солнечного излучения), не подверженной конъюнктуре, позволяет использовать ее в разнообразных комбинациях для создания достаточно информативных индексов, коэффициентов, параметров. Применение эмергетического анализа на практике отображено в проанализированных ниже работах.

Первой работой с применением ЭМАН выступает исследование Г. Одума по реальной (действительной) оценке международной торговли креветками между Эквадором и США (Odum, Arding, 1991). Результатом исследования являются данные по импорту и экспорту. Так, импортируется в страну  $62E + 20$  сЭДж/год, а экспортируется  $314E + 20$  сЭДж/год, соответственно, разница составляет 252, что свидетельствует об неэквивалентности обмена.

Следующее исследование, основанное на эмергетическом анализе, выполнено Г. Одумом с коллегами в рамках проекта «Биосфера 2» (Nelson et al., 2001). С целью выбора оптимальной системы жизнеобеспечения людей в замкнутом пространстве космического корабля проведена сравнительная оценка ресурсной эффективности трех систем очистки сточных вод: компактных аэрационных очистных сооружений на 40 жителей, конструированного болота в Акумале (Мексика) на 40 жителей и традиционных очистных сооружений Университета штата Флорида, рассчитанных на 40 тыс. жителей. По результатам проведенной работы исследователи делают вывод о том, что наиболее приемлемой системой для функционирования в замкнутом пространстве космического корабля выступает конструированное болото, т. к. оно потребляет минимальное количество закупленных (приобретенных) ресурсов. Конструированные болота также выгодны и с экономической точки зрения, т. к. меньше используют электричества по сравнению с двумя другими анализируемыми системами.

Комплексную эмергетическую оценку хозяйственной жизни г. Макао (Китайская Народная Республика), включая анализ обращения с отходами, выполнили К. Леи и Ж. Ванг (Lei et al., 2008; Lei, Wang, 2008). Анализ проводился по двум показателям: «эмергия, затрачиваемая на управление отходами / эмергия отхода», «эмергия сточных вод / эмергия приобретенных ресурсов». Интересным является пример по оценке энергетической безопасности Китая с использованием эмергетического анализа Х. Лу (Lu, Xu, 2019). Так, анализ свидетельствует об улучшении энергетической безопасности Китая в течение последних 50 лет относительно доступности ресурсов, экономической эффективности и воздействия на окружающую среду.

В последнее десятилетие ЭМАН широко

используется для оценки устойчивости многих систем, объединяющих в себе социоэкологические системы. Примеры включают оценку сельскохозяйственных систем (Lu et al., 2010; Wu et al., 2013; Yue et al., 2016), речных бассейнов (Chen et al., 2009; Campbell, Garmestani, 2012; Fonseca et al., 2017), городских систем (Jiang et al., 2009; Chen et al., 2010; Andric et al., 2017), болотных систем (Qin et al., 2000; Chen et al., 2009, 2011), инженерных сооружений (Han et al., 2014), экономических систем (Yang et al., 2010). Некоторые исследователи применяли ЭМАН для оценки процесса очистки сточных вод. Так, Бьёрклунд (Bjorklund et al., 2001) использует эмергетический анализ для оценки процесса обработки сточных вод. Гебер и Бьёрклунд (Geber, Bjorklund, 2002) анализируют использование ресурсов в трех системах обращения со стоками: традиционная трехступенчатая очистка стоков, очистные сооружения, дополненные технологией «constructed wetlands», и естественное болото. Паоло (Paolo et al., 2009) использует ЭМАН для оценки канализационных очистных сооружений на Лигурийском побережье. Дуан (Duan et al., 2011) применяет ЭМАН и анализ жизненного цикла для оценки городских водно-болотных угодий. Ян (Yang et al., 2016) использует эмергетический анализ для оценки скорости инфильтрации стоков через почвы в Циндао (Китай). Наибольшая интенсивность исследований по анализу ЭМАН наблюдается в Китайской Народной Республике (Zhang et al., 2009, 2010; Zuo et al., 2004).

Несмотря на растущую популярность и расширение сферы применения эмергетического анализа, в научной литературе имеется и достаточно большое количество публикаций с его обоснованной критикой. Анализ наиболее серьезных критических работ выполнен Броуном (Brown, Ulgiati, 2004). Он отмечает, что ряд авторов (Ayres, 1988; Cleveland et al., 2000; Mansson, McGlade, 1993; Spreng, 1988) характеризуют эмергетический анализ как упрощенный, алогичный, вводящий в заблуждение и не точный. Контраргументы указанной критике представлены в работах Г. Одума и М. Паттерсона (Odum, 1995; Patterson, 1993). Наиболее дискутируемым элементом эмергетического анализа является расчет величины трансформации, т. к. эмергетический метод не признает заключенной в ней некоторой доли неопределенности. Обобщенная трансформация про-

мышленных и геологических процессов используется в конкретных случаях без знания степени достоверности полученного результата. Например, трансформация природного газа представляет собой среднюю эффективность сгорания угля в котлах (Odum, 1996), но эта эффективность напрямую зависит от марки угля и типа природного газа, так же как и характеристик самого котла. Вычисление эмергии экономических процессов при помощи индекса эмергия/финансовые потоки тоже может быть некорректным и включать в себя двойные подсчеты (Ayres, 1988; Cleveland et al., 2000).

Развитие эмергетического анализа в постодумовский период для оценки функционирования природоохранных объектов привело к пониманию того, что эмергию, заключенную в отходах, необходимо включать в общую стоимость функционирования природоохранного предприятия. Для Г. Одума (такой) проблемы отходов не существовало, т. к. он рассматривал идеальную систему (замкнутое пространство космического корабля) с «нулевыми» отходами, но социально-экономическое развитие общества не соответствует обозначенной парадигме. Поэтому ряд исследователей (Вассалло, Цзо, Чен) в эмергетическую стоимость функционирования природоохранного объекта включают экосистемные траты на нейтрализацию негативного воздействия образующихся отходов. Вассалло (Vassallo, Paoli, 2009) предлагает оценивать не только все удельные эмергозатраты на территории очистных сооружений, но и экосистемные услуги, требуемые для полного обезвреживания стоков за пределами этой территории. Для иллюстрации методики объем таких природных услуг вычисляется им по количеству кислорода, необходимого для окисления остаточных концентраций органического вещества в приемном водоеме. При этом кислородный режим водоема является одним из важнейших параметров его функционирования. Но наличие кишечной микрофлоры, соединений фосфора, тяжелых металлов слабо связано с наличием кислорода в воде. Такой подход допустим, если все остальные параметры (кроме ХПК) в норме. Но на практике такие ситуации маловероятны, а значит, более общим подходом для оценки эмергетических затрат природы на обезвреживание воды в водоеме будет расчет разбавления.

Предложение Вассалло получило развитие в статье Му и соавторов (Mu et al.,

2009), где эмергетическая цена природных услуг, поступающих из окружающей среды на разбавление очищенных стоков, и экологические платежи предприятия за сброс загрязняющих веществ включаются в формулы классических индексов (*EYR*, *ELR*, *ESI*) и рассчитываются по формулам:

$$EYR_{iw} = \frac{R + N + F_1 + F_2 + F_3}{F_1 + F_2 + F_3 + E_w} \quad (9)$$

$$ELR_{iw} = \frac{N + F_1 + F_2 + E_w}{R + F_1 + F_3} \quad (10)$$

где *R* – возобновляемые ресурсы; *N* – невозобновляемые ресурсы; *F*<sub>1</sub> – вложения в продукцию (производство); *F*<sub>2</sub> – вложения в очистку сточных вод; *F*<sub>3</sub> – дополнительные вложения в защиту окружающей среды; *E<sub>w</sub>* – природные услуги, которые поступают из окружающей среды на разбавление сточных вод.

Понимание проблемы отходов остается на уровне работ Вассалло и Му, но дальнейшие поиски постоянно ведутся.

Неочевидным упущением существующих подходов в ЭМАН является отсутствие дифференцировки конструируемых (биоинженерных систем) экосистем, замещающих исходную (существующую) систему. Например, замещение пустыни степью или лесами – это положительный аспект, т. к. принято считать, что более сложные экосистемы предпочтительнее (с антропоцентрических позиций). Для объективной оценки такого замещения необходимо разработать специальный индекс, например «индекс замещения». Какой он будет по сути – открытый вопрос, в этом и видится развитие эмергетического анализа в будущем.

Первой публикацией результатов исследования с применением ЭМАН в России является работа О. В. Фельдмана с соавторами (Фельдман и др., 1998), в которой выполнена оценка эффективности агросистемы Центрально-Черноземного района за последние 200 лет. Анализируемый временной период характеризуется сменой применяемых в сельском хозяйстве технологий обработки пахотных земель, интенсификацией их распашки при одновременном сокращении площадей сенокосов и пастбищ. Это повлияло на смену структуры поступающих в систему потоков, поэтому увеличилась доля

приобретенных (закупленных) потоков и уменьшилась величина возобновляемых ресурсов. Эмергетическая эффективность растениеводства изменилась с 0.29 до 0.77, при этом увеличились затраты на единицу продукции. О. В. Фельдман делает вывод о том, что современные агросистемы при отсутствии вмешательства человека менее устойчивы в сравнении с доиндустриальными системами.

Далее, Б. В. Ларюшкин-Железный и И. А. Блохин (Ларюшкин-Железный, Блохин, 2008) впервые дали классификацию энергетическим методам и показали место в этой системе эмергетического анализа. Используя ЭМАН для расчета требуемой энергии на создание продуктов в сельском хозяйстве, авторы приходят к выводу, что на юге Российской Федерации целесообразно строительство оросительных систем, а на севере страны следует развивать животноводческий комплекс на основе увеличения местной кормовой базы.

В учебном пособии Н. В. Лисицына рассматриваются методы оценки функционирования крупных социо-экономико-экологических систем (Лисицын, 2010). В ряду энергетических методов рассмотрен и эмергетический анализ. Автор указывает, что ЭМАН строго базируется на физических началах и эмергия представляет собой энергию Гиббса солнечного излучения.

В Томске исследовательской группой А. В. Позднякова выполнен ряд работ, в которых намечается применение эмергетического анализа для оценки агроэкосистем (Поздняков, Шуркина, 2008), лесных экосистем (Иванова, 2002). В тезисах доклада М. Ю. Самуйленкова «Эмергетический подход к организации агроэкосистем» (Самуйленков, 2000) предложены русскоязычные эквиваленты терминов эмергетического анализа, приведены результаты О. В. Фельдмана и поставлена цель использовать их для создания модели сельскохозяйственного предприятия как саморегулирующейся агроэкосистемы. К сожалению, реализации автором поставленной задачи не последовало. В обзорной работе М. М. Ивановой (Иванова, 2002) вслед за М. Ю. Самуйленковым еще раз показывается несостоятельность оценки природных экосистем традиционными инструментами (стоимостной анализ) и раскрывается сущность эмергетического анализа. А. В. Поздняковым и К. А. Шуркиной применен эмергетический (без учета качества

энергии) анализ к хозяйству «СоМер-2» в Карагандинской области (Казахстан) (Поздняков, Шуркина, 2008). Переход на эмергетические единицы авторами не выполнен, т. к. они, вероятно, разделяют мнение А. С. Миндрин (Миндрин, 1997) о том, что заимствованные у Запада некоторые величины энергетических эквивалентов могут не соответствовать российским.

М. М. Ивановой заявлено о проведении эколого-энергетического анализа трех способов восстановления сосны на вырубках: посадкой сеянцев, посевом семян и естественным зарастанием (Иванова, 2009). В исследовании указывается, что природные потоки при трех системах восстановления оценены посредством эмергетического анализа Г. Одума. При этом в статье представлены лишь отдельные фрагменты ЭМАН изучаемых объектов. Приведены диаграмма поступающих в систему потоков на воссоздание 1 га сосны посевом семян и эмергетическая таблица по выращиванию 1 га сосны посевом семян. По двум другим способам лесовосстановления такие элементы не представлены. Финальные результаты ЭМАН – эмергетические индексы, на основании которых делаются заключения об устойчивости системы, степени ее истощительности и конкурентоспособности не приведены.

В диссертационной работе Т. Ш. Фузеллы (Фузелла, 2009) в очередной раз раскрыта сущность энергетического анализа, показаны его преимущества в сравнении со стоимостным анализом и использован этот вид анализа для оценки функционирования и оптимизации работы СПК «Нелюбино». Заявлено, что методологической базой диссертации выступают исследования Г. Одума по ЭМАН, но сама работа выполнена без учета качества энергии. ЭМАН требует перевода энергетических величин в эмергетические и вычисления соответствующих индексов, на основе которых будут сделаны выводы по эмергоэффективности, нагрузке на окружающую среду и устойчивости экономической системы.

Наибольшая доля исследовательских работ с использованием ЭМАН в РФ выполнена М. В. Фаминской, общее число публикаций которой более десятка. В работе (Фаминская, 2011) раскрывается сущность анализа, даются определения базовым понятиям, рассматриваются законы, лежащие в основе ЭМАН, а также указываются перспективы использования этого анализа в оценке това-

ров и услуг в экономике. Автор считает, что «подход Г. Одума является в каком-то смысле дополнительным к чисто экономическим подходам к качеству энергии: он применяет ту же методику «разложения на составляющие» энергетических потоков, но эти составляющие не экономические, а природные, к которым экономические подходы не могут подступиться». При проведении стоимостного и эмергетического исследований ценообразования на топливном рынке выявлена колоссальная (на порядок!) недооценка природных вложений в производстве топлива. Ряд работ (Фаминская, Потехина, 2011; Фаминская, 2013; Фаминская и др., 2017; Балтер и др., 2017) посвящен вопросам управления рисками для здоровья, обусловленными индустриальным загрязнением окружающей среды.

В последнее время в русскоязычной научной литературе появились работы, не только использующие ЭМАН, но и развивающие его инструментальную базу. Так, в продолжение подхода Вассалло и Му к оценке отходов производства и потребления О. С. Поляковой и С. Ю. Семеновым (Polyakova, Semenov, 2017, 2019) предложен эмергетический индекс для оценки экологической эффективности природозащитных предприятий, характеризующий снижение (увеличение) нагрузки на биосферу за счет создания и функционирования КОС. Природоохранная эффективность (EEE – *emergy ecological efficiency*) рассчитывается как отношение разницы между эмергетической оценкой предотвращаемого ущерба и нанесенного ущерба к предотвращаемому ущербу, выраженное в процентах:

$$EEE = \frac{ПУ - НУ}{ПУ} \cdot 100\% \quad (11)$$

где ПУ – предотвращаемый ущерб; НУ – нанесенный ущерб.

Предотвращаемый ущерб в самом грубом приближении – это природные услуги, которые поступают из окружающей среды на разбавление неочищенных стоков до предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющего вещества, по которому требуется наибольшее разбавление. При более точном расчете потребуются учитывать самоочищающуюся способность водного объекта, а в некоторых случаях и увеличение кормовой базы гидробиоценоза, а следовательно, и продуктивность экосистемы.

Нанесенный ущерб вычисляется как сумма амортизации канализационных очистных

сооружений, годовых затрат на функционирование, выраженных в эмджоулях, и эмергии чистой воды, требуемой для разбавления очищенных на КОС сточных вод до фоновых концентраций загрязняющих веществ в приемном водном объекте или нормативов для водных объектов определенной категории водопользования. Если предотвращаемый ущерб больше нанесенного, то экологическая эффективность положительна, и строительство КОС, использующих предложенную технологию, целесообразно. При наличии альтернатив выбирать следует технологию, имеющую наибольшую экологическую эффективность.

Таким образом, для эмергетической оценки КОС следует учитывать систему обращения с очищенными стоками. При их утилизации (на земледельческих полях орошения, в рыбоводных прудах и т. п.) эмергетический анализ следует выполнять с использованием в качестве базового параметра отношения эмергетического выхода (EYR), а в наиболее на сегодняшний день массовой практике – сброса очищенных стоков в природные водные объекты – природоохранную эффективность.

## Заключение

В предложенном варианте краткого изложения концепции и метода ЭМАН *transformity* – «степень трансформированности», в отличие от «трансформации», позволяет лучше понимать подход Г. Одума русскоязычному читателю и, следовательно, более широко использовать его в теории и практике защиты окружающей среды.

По мере развития ЭМАН происходит сближение по форме показателей эмергетического и стоимостного расчетов.

В классическом подходе Г. Одума отходы производства и потребления рассматриваются как рядовой элемент эмергетических потоков, утилизируемый в этой системе. Но в настоящее время отсутствуют технологии полной утилизации отходов и включения их в технологический или природный циклы, поэтому часть из них захоранивается, рассеивается, на что тратится дополнительная эмергия. При этом оказывается негативное воздействие на окружающую среду, «порча» природных экосистем. Поэтому отходы, систему обращения с ними и их влияние на окружающую среду необходимо учитывать при оценке функционирования (создания) объекта. Индекс экологической эмергетической эффективности (EEE) позволяет

оценить ущерб окружающей среде от строительства и функционирования природоохранного объекта и может быть полезным инструментом в обоснованиях при его проектировании.

В методологии эмергетического анализа отсутствует оценка замены одних экосистем другими. Поэтому дальнейшее развитие анализа должно включать разработку специального аппарата для такой оценки.

## Библиография

- Балтер Б. М., Фаминская М. В., Никитина Н. И., Романова Е. Ю., Яковлева Т. П., Подылин Н. Ю., Никишин И. Н. Теоретические и практические проблемы ноосферогенеза в условиях информатизации и глобализации современного общества. М.: РГСУ, 2017. 290 с.
- Булатов А. С. Экономика : Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. д-ра экон. наук проф. А. С. Булатова. М.: Экономистъ, 2004. 896 с.
- Иванова М. М. Эколого-энергетический анализ процессов восстановления лесов Томской области (на примере сосны обыкновенной) // Науки о Земле. 2009. № 4. С. 187–191.
- Иванова М. М. Энергетический анализ экосистем как один из аспектов их многокритериальной оценки // Проблемы устойчивого развития: иллюзии, реальность, прогноз: Материалы VI Всероссийского научного семинара «Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе». Томск: ТГУ, 2002. С. 143–147.
- Казаков В. Г., Луканин П. В., Смирнова О. С. Эксергетические методы оценки эффективности тепло-технологических установок: Учебное пособие. СПб.: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2013. 93 с.
- Ларюшкин-Железный Б. В., Блохин И. А. Эколого-энергетические методы: оценка эффективности использования природных ресурсов и величины техногенной нагрузки на окружающую среду // Инженерная экология. 2008. № 1. С. 29–39.
- Лисицын Н. В. Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения: Учебное пособие. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2010. 124 с.
- Миндрин А. С. Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции. М.: ЦНИИМ, 1997. 294 с.
- Поздняков А. В., Шуркина К. А. Новый методологический подход к анализу функционирования агроэкосистем // Вестник ТГУ. 2008. № 316. С. 206–212.
- Самуйленков М. Ю. Эмергетический подход к организации агроэкосистем // Самоорганизация и организация власти: Материалы 4-го Всерос. науч. семинара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. С. 162–164.
- Фаминская М. В. О циклической схеме управления риском для здоровья на основе экологического качества энергии // Российский государственный социальный университет. 2013. № 5. С. 92–98.
- Фаминская М. В., Балтер Д. Б., Балтер Б. М. Анализ возможности использовать показатель ущерба здоровью DALY в эмергетике // Моделирование информационных потоков, связанных с ноосферогенезом, глобализацией, индустриальным развитием, и их влияние на здоровье населения: Материалы II Международной научно-практической конференции: Сборник / Под науч. ред. Н. И. Никитиной. М., 2017. С. 174–183.
- Фаминская М. В., Потехина Е. В. Эмергия и экологическая иерархия качества энергии // Ученые записки Российского государственного социального университета. 2011. № 9 (97), ч. 1. С. 110–116.
- Фельдман О. В., Денисенко Е. А., Логофет Д. О. Эмергетический подход при оценке эффективности использования ресурсов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. М.: ВИНТИ, 1998. С. 66–81.
- Фузелла Т. Ш. Энергетический подход к определению эффективности и оптимизации функционирования агроэкосистем (на примере СПК «Нелюбино») : Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2009. 23 с.
- Andric I., Pina A., Ferrao P., Lacarriere B., Corre O. Le. On the performance of district heating systems in urban environment: an energy approach // J. Clean. Prod. 2017. № 142. P. 109–120.
- Ayres R. U. Ecology vs. Economics: Confusing Production and Consumption. Center of the Management of Environmental Resources, INSEAD, Fontainebleau, France, 1988.
- Brown M. T., Herendeen R. A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view // Ecological Economics. 1996. № 19. P. 219–235.
- Bjorklund J., Geber U., Rydberg T. Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge // Resour. Conserv. Recycl. 2001. № 31. P. 293–316.
- Brown M. T., Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems // Ecological Modelling. 2004. № 178. P. 201–213.
- Campbell D. E., Garmestani A. S. An energy systems view of sustainability: emergy evaluation of the San Luis Basin, Colorado // Environ. Manag. 2012. № 95. P. 72–97.
- Chen B., Chen Z., Zhou Y., Zhou J., Chen G. et al. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2009.

- № 14. P. 622–635.
- Chen G. Q., Chen B. Emergy-based energy and material metabolism of the Yellow River basin // *Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. № 14 (3). P. 923–934.
- Chen H., Chen G. Q., Ji X. Cosmic emergy based ecological systems model-ing // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2010. № 15. P. 2672–2700.
- Chen Z. M., Chen B., Chen G. Q. Cosmic emergy based ecological assessment for a wetland in Beijing // *Ecol. Model.* 2011. № 222 (2). P. 322–329.
- Cleveland C. J., Kaufmann R. K., Stern D. I. Aggregation and the role of energy in the economy // *Ecol. Econ.* 2000. № 32. P. 301–317.
- Duan N., Liu D., Dai J. et al. Evaluating the environmental impacts of an urban wetland park based on emergy accounting and life cycle assessment: a case study in Beijing // *Ecol. Model.* 2011. № 222 (2). P. 351–359.
- Fonseca C. R., Díaz-Delgado C., Esteller V., García-Pulid D. Geoinformatics tool with an emergy accounting approach for evaluating the sustainability of water systems: case study of the Lerma river, Mexico // *Ecol. Eng.* 2017. № 99. P. 436–453.
- Geber U., Bjorklund J. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems: a case study // *Ecol. Eng.* 2002. № 19. P. 97–117.
- Han M. Y., Shao L., Li J. S., Guo S., Meng J., Ahmad B., Hayat T., Alsaadi F., Chen G. Q. Emergy-based hybrid evaluation for commercial construction engineering: a case study in BDA // *Ecol. Indic.* 2014. № 47. P. 179–188.
- Hanfeng Mu, Xiao Feng, Khim Hoong Chu. Improved emergy indices for the evaluation of industrial systems incorporating waste management // *Ecological Engineering.* 2011. № 37. P. 335–342.
- Jiang M. M., Zhou J. B., Chen B., Yang Z., Ji F., Zhang L., Chen G. Q. Ecological evaluation of Beijing economy based on emergy indices // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. № 14. P. 2482–2494.
- Lei K., Wang Z., Ton S. Holistic emergy analysis of Macao // *Ecological Engineering.* 2008. № 32. P. 30–43.
- Lei K., Wang Z. Municipal wastes and their solar transformities: an emergy synthesis for Macao // *Waste Management.* 2008. № 28. P. 2522–2531.
- Lu H., Xu F. Emergy-based analysis of the energy security of China // *Energy.* 2019. № 181. P. 123–135.
- Lu H. F., Bai Y., Ren H., Campbell D. E. Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvialpaddy-fields, implications for agricultural policy in China // *Environ. Manag.* 2010. № 91. P. 2727–2735.
- Mansson B. A., McGlade J. M. Ecology, thermodynamics and H. T. Odum's conjectures // *Oecologia.* 1993. № 93. P. 582–596.
- Nelson M., Odum H. T., Brown M. T., Alling A. "Living off the land": resource efficiency of wetland wastewater treatment // *Adv. Space Res.* 2001. Vol. 27 (9). P. 1547–1556.
- Odum H. T., Arding J. E. Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador. Report to Coastal Studies Institute, University of Rhode Island, Narragansett. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, 1991. 114 p.
- Odum H. T., Odum E. C. Energy analysis overview of nation Working Paper WP-83-82. International Institute of Applied System Analysis, Laxenburg, Austria, 1983. 469 p.
- Odum H. T. *Emergy Systems Concepts and Self-Organization: A Rebuttal* // Springer. 1995. № 4. P. 518–522.
- Odum H. T. *Environment, Power, and Society*. NY: John Wiley, 1971. 336 p.
- Odum H. T. *Environmental accounting emergy and environmental decision making*. NY: Wiley, 1996. 370 p.
- Odum H. T. Self-organization, transformity and information // *Science.* 1988. № 25. P. 1132–1139.
- Paolo V., Chiara P., Mauro F. Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater // *Ecol. Eng.* 2009. № 35 (5). P. 687–694.
- Patterson M. Approaches to energy quality in energy analysis // *International Journal of global Energy Issues. Special Issue on Energy Analysis.* 1993. P. 19–28.
- Polyakova O. S., Semenov S. Y. Emergy analysis of wastewater treatment technology // *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences.* 2017. № 101. P. 784–791.
- Polyakova O. S., Semenov S. Yu. Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using "constructed wetlands" technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019. Vol. 400. P. 012020.
- Qin P., Wong Y. S., Tam N. F. Y. Emergy evaluation of Mai Po mangrove marshes // *Ecol. Eng.* 2000. № 16. P. 271–280.
- Spreng T. *Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. NY: Praeger Publishers, 1988. 289 p.
- Ulgiati S., Brown M. T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems // *Ecol. Model.* 1998. № 108. P. 23–36.
- Vassallo P., Paoli C. Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater // *Ecological engineering.* 2009. № 35. P. 687–694.
- Yang L., Kong F. L., Xi M., Li Y., Zi Y. Y. Emergy analysis of typical decen-tralized rural sewage treatment system: a case study of soil rapid infiltration in Qingdao, China // *Resour. Ecol.* 2016. № 7 (4). P. 309–316.

- Yang Z. F., Jiang M. M., Chen B., Zhou J. B., Chen G. Q., Li S. C. Solar energy evaluation for Chinese economy // *Energy Policy*. 2010. № 38 (2). P. 875–886.
- Yue J. S., Yuan X. Z., Li B., Ren Q., Wang X. F. Energy and exergy evaluation of a dike-pond project in the drawdown zone (DDZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) // *Ecol. Indic.* 2016. № 71. P. 248–257.
- Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, 2015. 323 p.
- Wu X., Wu F., Tong X., Jiang B. Exergy-based sustainability assessment of an integrated production system of cattle, biogas, and greenhouse vegetables: insight into the comprehensive utilization of wastes on a large-scale farm in Northwest China // *Eng.* 2013. № 61. P. 335–344.
- Zhang D., Gersberg R. M., Zhang D., Keat T. S. Constructed wetlands in China // *Ecological Engineering*. 2009. № 35. P. 1367–1378.
- Zhang X. et al. Exergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges // *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. № 55. P. 182–195.
- Zuo P., Wan S. W., Qin P., Du J. J., Wang H. A comparison of the sustainability of original and constructed wetlands in Yancheng Biosphere Reserve, China: implications from exergy evaluation // *Environmental Science & Policy*. 2004. № 7. P. 329–343.

## **Благодарности**

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0721-2020-0019).

Выражаю искреннюю благодарность коллективу лаборатории экологии, генетики и охраны окружающей среды НИИ биологии и биофизики Томского государственного университета за помощь в написании статьи, за конструктивную критику и ценные советы.

# EMERGETIC ANALYSIS AND EXPERIENCE OF ITS USE FOR THE ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC AND NATURAL SYSTEMS

**POLYAKOVA**  
Oksana Sergeevna

*National Research Tomsk State University, oksanochka84@list.ru*

**SEMENOV**  
Sergey Yurevich

*PhD, Tomsk State University, p9138009960@gmail.com*

## Keywords:

exergy  
emergy  
sewage treatment  
facilities  
environmental  
engineering  
ecological effect

**Summary:** The article deals with the issues of foundations and development of emergetic analysis (EMAN), the conceptual framework and methods for calculating the main emergetic indicators. An «emergy» is the amount of exergy of one type that is directly or indirectly necessary to maintain a process or store energy of another type or substance. As the system becomes more complex, the amount of energy contained in the object (service) decreases, and the degree of its transformation increases. The emergy is measured in solar units, which can be estimated using three different emergy units – the degree of transformation, specific emergy and emergy of the monetary unit. In published Russian-language works, the term «transformation» is used as the equivalent of the English term transformity. More adequate is the term «degree of transformation», which combines transformation, specific emergy and emergy of money. G. Odum's approach to the assessment of enterprises for the protection of the environment from pollution is based on the understanding of wastewater as a highly valuable resource. But, in the absence of cost-effective technologies for returning waste to production cycles, wastewater, for example, is now mostly neutralized, rather than disposed of. The purpose of the creation and operation of sewage treatment plants is currently to reduce environmental pollution. A number of researchers (Vassalo, Zuo, Chen) include ecosystem expenses for neutralizing the negative impact of the generated waste in the emergetic cost of operating a conservation facility. Polyakova and Semenov proposed an emergetic index for assessing the environmental efficiency of nature protection enterprises, which characterizes a reduction (increase) of the load on the biosphere due to the creation and operation of sewage treatment plants. In the methodology of emergetic analysis, there is no assessment of some ecosystems by others. Therefore, further development of the analysis should include the development of a special apparatus for such an assessment.

**Reviewer:** A. V. Pozdnyakov

**Received on:** 03 December 2020

**Published on:** 15 June 2021

## References

- Andric I., Pina A., Ferrao P., Lacarriere B., Corre O. Le. On the performance of district heating systems in urban environment: an emergy approach, *J. Clean. Prod.* 2017. No. 142. P. 109–120.
- Ayres R. U. *Ecology vs. Economics: Confusing Production and Consumption*. Center of the Management of Environmental Resources, INSEAD, Fontainebleau, France. 1988.
- Balter B. M., Faminskaya M. V., Nikitina N. I., Romanova E. Yu., Yakovleva T. P., Podylin N. Yu., Nikishin I. N. *Theoretical and practical problems of noospherogenesis in the conditions of informatization and globalization of modern society*. M.: RGSU, 2017. 290 p.
- Bjorklund J., Geber U., Rydberg T. Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge, *Resour. Conserv. Recycl.* 2001. No. 31. P. 293–316.
- Brown M. T., Herendeen R. A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view, *Ecological Economics*. 1996. No. 19. P. 219–235.
- Brown M. T., Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems, *Ecological Modelling*. 2004. No. 178. P. 201–213.
- Bulatov A. S. *Economics: Uchebnik*. 3-e izd., pererab. i dop., Pod red. d-ra ekon. nauk prof. A. P. Bulatova.

- M.: *Ekonomist'*, 2004. 896 p.
- Campbell D. E., Garmestani A. S. An energy systems view of sustainability: emergy evaluation of the San Luis Basin, Colorado, *Environ. Manag.* 2012. No. 95. P. 72–97.
- Chen B., Chen Z., Zhou Y., Zhou J., Chen G. et al. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. No. 14. P. 622–635.
- Chen G. Q., Chen B. Emergy-based energy and material metabolism of the Yellow River basin, *Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. No. 14 (3). P. 923–934.
- Chen H., Chen G. Q., Ji X. Cosmic emergy based ecological systems modeling, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2010. No. 15. P. 2672–2700.
- Chen Z. M., Chen B., Chen G. Q. Cosmic exergy based ecological assessment for a wetland in Beijing, *Ecol. Model.* 2011. No. 222 (2). P. 322–329.
- Cleveland C. J., Kaufmann R. K., Stern D. I. Aggregation and the role of energy in the economy, *Ecol. Econ.* 2000. No. 32. P. 301–317.
- Duan N., Liu D., Dai J. et al. Evaluating the environmental impacts of an urban wetland park based on emergy accounting and life cycle assessment: a case study in Beijing, *Ecol. Model.* 2011. No. 222 (2). P. 351–359.
- Faminskaya M. V. Balter D. B. Balter B. M. Analysis of the possibility of using the health damage indicator DALI in energetics, *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii: Sbornik, Pod nauch. red. N. I. Nikitinoy*. 2017. P. 174–183.
- Faminskaya M. V. Potehina E. V. Emergy and environmental hierarchy of energy quality, *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo social'nogo universiteta*. 2011. No. 9 (97), ch. 1. P. 110–116.
- Faminskaya M. V. On the cyclical scheme of health risk management on the basis of the environmental quality of energy, *Rossiyskiy gosudarstvennyy social'nyy universitet*. 2013. No. 5. P. 92–98.
- Fel'dman O. V. Denisenko E. A. Logofet D. O. Emergy approach to the assessment of the of resource efficiency, *Problemy okruzhayushey sredy i prirodnyh resursov*. M.: VINITI, 1998. P. 66–81.
- Fonseca C. R., Díaz-Delgado C., Esteller V., García-Pulid D. Geoinformatics tool with an emergy accounting approach for evaluating the sustainability of water systems: case study of the Lerma river, Mexico, *Ecol. Eng.* 2017. No. 99. P. 436–453.
- Fuzella T. Sh. Emergy approach to determining the efficiency and optimization of the functioning agroecosystems (on the example of SPK Nelubino): *Avtoref. dip. ... kand. geogr. nauk*. Tomsk, 2009. 23 p.
- Geber U., Bjorklund J. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems: a case study, *Ecol. Eng.* 2002. No. 19. P. 97-
- Han M. Y., Shao L., Li J. S., Guo S., Meng J., Ahmad B., Hayat T., Alsaadi F., Chen G. Q. Emergy-based hybrid evaluation for commercial construction engineering: a case study in BDA, *Ecol. Indic.* 2014. No. 47. P. 179–188.
- Hanfeng Mu, Xiao Feng, Khim Hoong Chu. Improved emergy indices for the evaluation of industrial systems incorporating waste management, *Ecological Engineering*. 2011. No. 37. P. 335–342.
- Ivanova M. M. Energy analysis of ecosystems as one of the aspects of their multi-criteria assessment, *Problemy ustoychivogo razvitiya: illyuzii, real'nost', prognoz: Materialy VI Vserossiyskogo nauchnogo seminara «Samoorganizaciya ustoychivyh celostnostey v prirode i obschestve»*. Tomsk: TGU, 2002. P. 143–147.
- Ivanova M. M. Environmental and energy analysis of the processes of forest restoration in the Tomsk oblast (on the example of common pine, *Nauki o Zemle*. 2009. No. 4. P. 187–191.
- Jiang M. M., Zhou J. B., Chen B., Yang Z., Ji F., Zhang L., Chen G. Q. Ecological evaluation of Beijing economy based on emergy indices, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2009. No. 14. P. 2482–2494.
- Kazakov V. G. Lukanin P. V. Smirnova O. S. Exergy methods of assessment of effectiveness of heat technology plants: Study guide. SPb.: Nacional'nyy issledovatel'skiy universitet «MEI», 2013. 93 p.
- Lei K., Wang Z. Municipal wastes and their solar transformities: an emergy synthesis for Macao, *Waste Management*. 2008. No. 28. P. 2522–2531.
- Lei K., Wang Z., Ton S. Holistic emergy analysis of Macao, *Ecological Engineering*. 2008. No. 32. P. 30–43.
- Lisicyn N. V. Theoretical foundations of energy and resource conservation: Study guide. SPb.: SPbGTI(TU), 2010. 124 p.
- Lu H. F., Bai Y., Ren H., Campbell D. E. Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvialpaddy-fields, implications for agricultural policy in China , *Environ. Manag.* 2010. No. 91. P. 2727–2735.
- Lu H., Xu F. Emergy-based analysis of the energy security of China, *Energy*. 2019. No. 181. P. 123–135.
- Mansson B. A., McGlade J. M. Ecology, thermodynamics and H. T. Odum's conjectures, *Oecologia*. 1993. No. 93. P. 582–596.
- Mindrin A. S. Energy-economic assessment of agricultural products. M.: CNIIM, 1997. 294 p.
- Nelson M., Odum H. T., Brown M. T., Alling A. "Living off the land": resource efficiency of wetland

- wastewater treatment, *Adv. Space Res.* 2001. Vol. 27 (9). P. 1547–1556.
- Odum H. T. *Energy Systems Concepts and Self-Organization: A Rebuttal*, Springer. 1995. No. 4. P. 518–522.
- Odum H. T. *Environment, Power, and Society*. NY: John Wiley, 1971. 336 p.
- Odum H. T. *Environmental accounting energy and environmental decision making*. NY: Wiley, 1996. 370 p.
- Odum H. T. *Self-organization, transformity and information, Science*. 1988. No. 25. P. 1132–1139.
- Odum H. T., Arding J. E. *Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador*. Report to Coastal Studies Institute, University of Rhode Island, Narragansett. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, 1991. P. 87.
- Odum H. T., Odum E. C. *Emergy analysis overview of nation Working Paper WP-83-82*. International Institute of Applied System Analysis, Laxenburg, Austria, 1983. 469 p.
- Paolo V., Chiara P., Mauro F. *Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater, Ecol. Eng.* 2009. No. 35 (5). P. 687–694.
- Patterson M. *Approaches to energy quality in energy analysis, International Journal of global Energy Issues. Special Issue on Energy Analysis*. 1993. P. 19–28.
- Polyakova O. S., Semenov S. Y. *Emergy analysis of wastewater treatment technology, The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences*. 2017. No. 101. P. 784–791.
- Polyakova O. S., Semenov S. Yu. *Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using «constructed wetlands» technology, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. STR??
- Pozdnyakov A. V., Shurkina K. A. *New methodological approach to the analysis of agroecosystem functioning, Vestnik TGU*. 2008. No. 316. P. 206–212.
- Qin P., Wong Y. S., Tam N. F. Y. *Emergy evaluation of Mai Po mangrove marshes, Ecol. Eng.* 2000. No. 16. P. 271–280.
- Samuylenkov M. Yu. *Emergy approach to the organization of agroecosystems, Samoorganizaciya i organizaciya vlasti: Materialy 4-go Vserop. nauch. seminaru. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN*, 2000. P. 162–164.
- Spreng T. *Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. NY: Praeger Publishers, 1988. 289 p.
- Ulgjati S., Brown M. T. *Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems, Ecol. Model.* 1998. No. 108. P. 23–36.
- Vassallo P., Paoli C. *Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater, Ecological engineering*. 2009. No. 35. P. 687–694.
- Wu X., Wu F., Tong X., Jiang B. *Emergy-based sustainability assessment of an integrated production system of cattle, biogas, and greenhouse vegetables: insight into the comprehensive utilization of wastes on a large-scale farm in Northwest China, Eng.* 2013. No. 61. P. 335–344.
- Yang L., Kong F. L., Xi M., Li Y., Zi Y. Y. *Emergy analysis of typical decen-tralized rural sewage treatment system: a case study of soil rapid infiltration in Qingdao, China, Resour. Ecol.* 2016. No. 7 (4). P. 309–316.
- Yang Z. F., Jiang M. M., Chen B., Zhou J. B., Chen G. Q., Li S. C. *Solar emergy evaluation for Chinese economy, Energy Policy*. 2010. No. 38 (2). P. 875–886.
- Yue J. S., Yuan X. Z., Li B., Ren Q., Wang X. F. *Emergy and exergy evaluation of a dike-pond project in the drawdown zone (DDZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR), Ecol. Indic.* 2016. No. 71. P. 248–257.
- Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, 2015. 323 p.
- Zhang D., Gersberg R. M., Zhang D., Keat T. S. *Constructed wetlands in China, Ecological Engineering*. 2009. No. 35. P. 1367–1378.
- Zhang X. et al. *Emergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges, Resources, Conservation and Recycling*. 2010. No. 55. P. 182–195.
- Zheleznyy B. V., Blohin I. A. *Environmental and energy methods: assessment of the effectiveness of using natural resources and the value of man-made burden on the environment, Inzhenernaya ekologiya*. 2008. No. 1. P. 29–39.
- Zuo P., Wan S. W., Qin P., Du J. J., Wang H. *A comparison of the sustainability of original and constructed wetlands in Yancheng Biosphere Reserve, China: implications from emergy evaluation, Environmental Science & Policy*. 2004. No. 7. P. 329–343.



УДК 598.132.4:591.9

# STATUS OF POPULATIONS OF THE SPUR-THIGHED TORTOISE *TESTUDO GRAECA* LINNAEUS, 1758 (TESTUDINIDAE, REPTILIA) IN DAGESTAN

MAZANAeva

Lyudmila Feizulaevna

PhD, Dagestan state University, mazanaev@mail.ru

GICHIKHANOVA

Uzlipat Adilmirzaevna

Dagestan state University, uzlipat92@mail.ru

## Keywords:

Dagestan  
costal lowland  
foothills  
*Testudo graeca*  
area  
abundance  
preservation

**Summary:** The article presents data on the current state of the spur-thighed tortoise, *Testudo graeca* populations from the Caspian region of Dagestan (North Caucasus). According to the latest literature data the subspecies *T. g. armeniaca* is widespread in the region. In Dagestan the spur-thighed turtle lives on the northern periphery of its range. The regional range of the species included the coast of the Caspian Sea ("Coastal lowland") and the adjacent foothills up to 700 m above sea level to the border with Azerbaijan. The area size is approximately 418100 ha. Since the end of the 20th century, there has been a decrease of the number and fragmentation of the range in Dagestan, as well as in general within the species range due to the impact of anthropogenic factors. On the coast of the Caspian Sea, the current number of turtles is 1 individuals per ha, in the foothills – about 0.21 ind./ha. In this connection, in 2013–2019 we studied the current distribution and abundance of tortoises in the preserved habitats within the study area. We have identified the most optimal habitats for this species, where populations with good reproductive potential have been preserved. According to our data, two isolated tortoise habitats have been preserved on the Costal lowland in the Samura delta and in the vicinity of Lake Adji (Papas), and three in the foothills – in the Shurdere area, in the vicinity of the village of Shalasi and on the slopes of the Narat-Tube ridge. Currently, the total area of the preserved habitats of this species in the region is about 106600 ha, that of degraded ones – 311500 ha. The main anthropogenic factor contributing to the sharp reduction in the number of tortoises is the destruction of their natural habitats, due to of the operation of numerous quarries for the extraction of sand, soil, gravel and stones on an industrial scale. The article provides recommendations for the preservation of the spur-thighed tortoise in the region.

**Reviewer:** A. G. Bakiev

**Reviewer:** N. B. Anan'eva

**Received on:** 21 June 2020

**Published on:** 21 June 2021

## Introduction

The spur-thighed tortoise, *Testudo graeca*, Linnaeus, 1758, has a vast area, including North Africa, Southern Europe, South-West Asia and the Caucasus (Ananjeva et al., 2004; Rhodin et al., 2017). It was previously thought that in the Caucasus the subspecies of *T. g. ibera* Pal-

las, 1814 dwells (Bannikov et al., 1977), however then three new subspecies were later described: *T.g. armeniaca*: Armenia: valley of the Araks river to the Zangezur gate (Chkhikvadze and Bakradze, 1991), *T. g. nikolskii*: Western part of the Caucasus (Chkhikvadze and Tuniyev, 1986), *T. g. pallasi*: Dagestan (Chkhikvadze and

Bakradze, 2002). According to the latest views, two subspecies are distributed in the Caucasus – *T. g. ibera* and *T. g. armeniaca*, from which the last taxon is found in the territory of Dagestan (Rhodin et al., 2017; <https://www.reptile-database.org>). However, the subspecific structure of the *T. graeca* is not fully elucidated and remains controversial in many respects (Van der Kuyl et al., 2002; Chkhikvadze, Bakradze, 2002; Korsunen et al., 2005; Fritz et al., 2007, 2009; Vasilyev et al., 2008; Parham et al., 2012; Mashkaryan et al., 2013; Chkhikvadze et al., 2011, 2014; Rhodin et al., 2017). In recent decades, a decline in the number of *T. graeca* throughout the area has been observed (Mazanaeva, 2001; Ananjeva et al., 2008; Mazanaeva et al., 2009; Pestov et al., 2009; Chkhikvadze, 2009; Orlova et al., 2011; Mazanaeva, 2013). Until the middle of the last century, it was fairly common throughout the Caucasian part of the area. At the end of the last century, the first information appeared about its decreasing number (Bannikov et al., 1977; Inozemtsev, Pereshkolnik, 1985; Kostina, Galichenko, 1998; Banik et al., 2001; Mazanaeva, 2001; Tuniyev, Tuniyev, 2007; Orlova et al., 2011 and others). It was included in the Red Books of the Russian Federation (2001), Chechen Republic (2007), Krasnodar Territory (2007, 2017), Republic of Dagestan (2009), Azerbaijan (2013), Georgia (1982) and Armenia (2010), as species with a steadily declining number and inhabitation area, individual populations of which are on the verge of extinction. In the IUCN Red List-2018, it is assigned the status of a vulnerable species (category VU) (<https://www.iucnredlist.org>).

*T. graeca* populations in Dagestan inhabit the northern periphery of the whole species' area. The northern boundary of the regional area runs along the Narat-Tyube Mountain Ridge 22 km east of the Sulak River (43°05'20.83 N, 47°05'00.46 E). Further, the ridge stretches South-East along the Primorskaya (terraced) lowland and the adjacent foothills (up to 700 meters above sea level) to the border with Azerbaijan (Mazanaeva, 2001; Mazanaeva et al., 2009; Mazanaeva, 2013; Mazanaeva, Gichikhanova, 2018). In the first half of the last century, the tortoise lived in various biotopes, its population was quite numerous – in places of accumulation about 100 individuals per 1 kilometer route, which is about 10 individuals per ha (Krasovskiy, 1932; Bannikov, 1951). In the second half of the 20th century, the first information appeared about a sharp decrease in the number of tortoises in the South-Eastern part of the area: its number in some biotopes was 1

individual per ha. At the same time, in the most optimal biotopes in places of accumulation, the density was estimated as 10 individuals per ha (Bannikov et al., 1977; Kostina, Galichenko, 1998; Dzhamirzoev, Tertyshnikov, 2000; Banik et al., 2001; Mazanaeva, 2001). The reduction in the number of tortoises was a consequence of the active migration of the population in the 1960–70s from the mountainous regions to the Primorskaya (terraced) lowland and the adjacent foothills, which resulted from the economic development of a large area of tortoise habitats. By the beginning of the 21st century, there had been a decrease in its numbers and a fragmentation of the area, lowland and foothill populations were isolated by anthropogenically transformed landscapes of various size, in some places – by several tens of kilometers (Mazanaeva, 2001; Mazanaeva et al., 2009; Mazanaeva, 2013). In recent decades, recreational and economic development of preserved natural landscapes where tortoises live has intensified, and therefore the tendency of decrease in its number and area fragmentation has continued (Mazanaeva, Gichikhanova, 2018; and others). The purpose of our work was to assess the current state of *T. graeca* populations in Dagestan and to give recommendations for developing a strategy for the conservation of this species in the region. We had the following tasks: to study the current distribution of *T. graeca* in Dagestan, to determine the main limiting factors, to determine the degree of area fragmentation, to determine viable populations and the area of habitats they occupy, to determine the approximate (relative) density of the tortoises in them, and to create protected areas.

## Analytical survey

**Characteristics of the research area.** The Republic of Dagestan is located in the north-eastern part of the Great Caucasus Mountain Ridge and in the South-Western Caspian lowland within 42°12' North latitude, 45°08' and 47°35' East longitude. In the North along the Kuma River it borders with Kalmykia, in the North-West – with the Stavropol region, in the West – with the Chechen Republic, in the South along the crest of the Main Range it borders with Georgia and Azerbaijan, with the latter the border continues along the Samur River to the Caspian Sea. The area of the republic is about 50300 square kilometers. According to the nature of the terrain, the territory of the republic can be divided into four physiographic regions: lowland, foothill, intramountain and alpine (Guyl et al., 1959; Gurlev, 1972, etc.).

The lowland of Dagestan is an extreme southwestern continuation of the Caspian lowland. It occupies a little less than half of the territory (about 42 %) of Republic. Its surface is represented by a flat, slightly sloping plain with alluvial-accumulative relief. Most of the lowland is below sea level. Within the borders of Dagestan, it is represented by the Tersko-Kumskaya lowland, the Tersko-Sulakskaya lowland and the Primorskaya lowland.

The Primorskaya (terraced) lowland is an elongated narrow coastal strip between the Caspian Sea and foothills, which stretches from the city of Makhachkala to the border with Azerbaijan. Its length is about 160 kilometers, its width does not exceed 10–25 kilometers anywhere, and in three places (near the city of Izberbash, the village of Kayakent and the city of Derbent) the spurs of the mountains closely approach the sea. Its height distribution ranges from –28 (to level of the Caspian Sea) to 150–200 meters at the foot of the mountains. The relief of the lowlands is characterized by the presence of ancient Caspian terraces, the ledges of which are interrupted by river valleys. The seashore is a narrow (100–500 meters) strip of the beach, covered with sand and shattered shells, forming almost all low (from 2 to 10 meters) ramparts and dunes. The natural dry-steppe and semi-desert landscapes occupy the first and second marine terraces, remaining only on areas of the lowland that are absolutely unsuitable for agricultural development. Within its areas there are landscapes that are not characteristic of this zone, they are floodplain forests along rivers flowing into the Caspian Sea. The climate is arid with relatively warm winter (average January temperature +1 °C), hot summer (average July temperature +28 °C) and the highest annual average temperature for Dagestan (+12.6 °C). The average annual rainfall is about 200 millimeters. Higher terraces represent cereal-wormwood dry steppe with freegan-type areas, the seaside strip is covered with wormwood-saltwort and saltwort, and in the lowlands there are meadow and meadow-forest combinations and flood-irrigated-type forests (oak, willow, poplar, etc.) (Schiffers, 1946; Chilikina, Schiffers, 1962; Gurlev, 1972; Eldarov, 1972; Ataev, 2002).

The foothills occupy the lower stages of the outer macro-slope of the forward ranges, stretching from the Northwest to the Southeast along the periphery of mountainous Dagestan in the form of a continuous chain interconnecting with the arrays of the Lateral Ridge. At altitudes from 150–200 to 500–600 meters above

sea level, arid landscapes are widespread (clay semi-deserts, dry foothill steppes, slips), and at 600–1200 meters above sea level – the piedmont forests. Mountainous xerophytes are common in steppe and forest landscapes; they occupy large areas in the most arid parts. The foothills are heavily dissected by the longitudinal and transverse valleys of the rivers flowing towards the Caspian Sea. The southeastern foothills between the Ulluchai River and Karchagsu River (tributaries of the Rubas River) have a dissected landscape, represented by small hills (200–350 meters above sea level) consisting of sandy-clayey Akchagyl (Paleogene) easily washable sediments. The climate of the foothills is usually moderately warm, with relatively mild winters and rather hot summers. The annual precipitation is 300–400 mm, the average air temperature in July is + 19.7–21.8 °C, in January - 0.8–1.0 °C (Schiffers, 1946; Guil, 1959; Chilikina, Schiffers, 1962; Gurlev 1972; Eldarov, 1972).

**Material.** The studies were conducted in 2013–2019 in the Primorskaya (terraced) lowland and in the foothills of Dagestan. All the habitats of the *T. graeca* known from literary data were studied from the spurs of the Narat-Tyube Ridge to the border with Azerbaijan. The territory with a total area of about 418100 ha was surveyed. During the study period, we had accounted 500–600 mature individuals of spur-thighed tortoise.

**Methods.** The study of distribution and biotopes was carried out according to generally accepted methods (Shlyakhtin, Golikova, 1986; Shcherbak, 1989; Heyer et al., 2003). In describing biotopes we used a geobotanical description of landscapes (Grossheim, 1949; Chilikina, Schiffers, 1962; Gulisashvili et al., 1975; Galushko, 1978; Murtazaliyev, 2009). We calculated the approximate area using the QGIS2.18 program. Counting the number of tortoises was carried out according to generally accepted methods. The length of the transect was 2000 meters, the width in semi-desert and dry-steppe landscapes was 200 meters, on the slopes with arid shrub vegetation and delta forests – 100 meters. The number of individuals in habitats with dissected relief was counted at sites measuring 50 x 50 meters (Novikov, 1949; Dinesman, Kaletskaya, 1952; Darevsky, 1987; Scherbak, 1989; Heyer et al., 2003). To exclude repetitions, tagging of individuals was carried out by marking the pleural shields of the carapace in a specific sequence: the right pleural shields were numbered as ones, and

the left ones were marked as tens (the method used by M. V. Pestov and passed to us in oral communication). The counts were carried out in the period of the greatest activity of the tortoises: in spring and early summer. Only mature individuals were taken into account due to the secretive way of life of immature and juvenile individuals. We conducted a survey of the population of villages and towns for the presence of land tortoises.

**Results.** For a convenient and consistent presentation of the obtained data, we conventionally divided the known area of distribution of *T. graeca* in the republic into three parts: South-East, Central and North-West.

The South-Eastern part of the area included the lower foothills, the coast of the Caspian Sea and the Samur River delta. Its area in the middle of the 20th century was 173600 ha, at the beginning of 21st century it was 129200 ha. The tortoise inhabited various biotopes: a sandy steppe covered with bushes at the base of coastal dunes, tugai thickets of coastal lowlands, clayey and stony semi-deserts with wormwood-grass and forb-grass vegetation, dry foothill steppes, arid light forests and thickets of xerophytic shrubs on the mountain slopes, areas of floodplain and delta forests, agricultural landscapes at altitudes from -20 to 500 meters above sea level (Krasovskiy, 1932; Bannikov, 1951; Bannikov et al, 1977; Kostina, Galichenko, 1998; Mazanaeva, 2001; Mazanaeva et al., 2009). During the study period, tortoise populations were found within the foothills between the Gyul'gerichay River and Samur River, as well as between the Gyul'gerichay River and Karchagsu River. To the North the tortoise inhabits the area named "Shurdere" (Fig. 1a), which is located between the Gyul'gerichay River and Rubas River. Another tortoise population lives on the slopes of the Sabnovo-Dzhalgansky ridge (near the city of Derbent). In these areas *T. graeca* inhabits clayey and stony semi-deserts with rare bushes of *Paliurus spina-christi*, *Cerasus incana*, *Tamarix ramosissima* (in the spring ephemerae and ephemeroids of *Poa bulbosa*, *Helianthemum saicifolium*, *Filago arvensis*, sp. *Bromus*, *Aegilops*, *Medicago*, *Trifolium*, *Alyssum*, *Xeranthemum* develop) (Fig. 1b), dry steppes (grassy wormwood and motley grass with *Teucrium* sp., *Eryngium*, *Salvia*, *Inula*, *Dianthus*, *Festuca*, *Artemisia*, *Andropogon*, *Stipa*), mountain slopes sprouted with xerophytic shrubs (*Rhamnus*, *Spiraea*, *Spiraea*, *Eriobotrya*) and rare oak woodlands (*Quercus* sp., *Carpinus*, *Crataegus*, *Acer*, *Fraxinus*) (Fig. 1d). The average tortoise density in these bio-

topes is 0.18 individuals per ha. On a lowland in the delta of the Samur River (on the Southern boundary of the regional area), *T. graeca* inhabits coastal semi-desert-steppe landscapes (Fig. 1c), as well as the outskirts and edges of the Samur forest. The average tortoise density in these habitats is 0.7 individuals per ha. This population and the foothill populations are isolated by the federal highway "Caucasus" and the associated agglomeration. In the biotopes of the South-Eastern part of the area *T. graeca* coexists with *Zamenis hohenackeri*, *Lacerta strigata*, *Pseudopus apodus*, *Paralaudakia caucasia*, *Eremias velox*, *Dolichophis schmidtii*, *Eirenis collaris*, *Typhlops vermicularis*, *Ophisops elegans*, *Eumeces schneideri*, *Macrovipera lebetina*, *Platycephalus najadum*, *Telescopus fallax*, *Vipera ursinii*, *Natrix natrix*, *N. tessellata*, *Mauremys caspica*, *Emys orbicularis* and others. We did not find the spur-thighed tortoise in the previously known habitats on the Caspian Sea coast between the mouths of the Rubas River and the Uluchay River, as well as in the foothills in the adjacent territories of the Derbent, Kaitag and Kayakent Districts. According to our data, the area of destroyed habitats is about 37540 ha. The main factors of changing the areas and the decrease in the tortoise number are the recreational use of the sea coast, the expansion of cities and towns, economic activity (development of the agricultural sector and overgrazing of livestock). However, the main factor leading to the reduction of the area of natural biotopes, and, accordingly, the number of this species, is the intensive removal of sand from the coast over the past two decades. The impact of all these factors continues at the present time. Building and fencing of sites of the Samur forest located outside the Samur Federal Reserve and the entire coast is also ongoing. The active agrarian (economic) development of the foothills remains.

The central part of the spur-thighed tortoise area includes the foothills and the Caspian Sea coast between the Ulluchay River and the Dzhangakaluchai River. This area in the middle of the 20th century was 119600 ha, at the beginning of 21st century it was already 57700 ha. The tortoise widely inhabits the fixed sands along the Caspian Sea coast, semi-desert and steppe lowland phytocenoses, floodplain forest massifs, dry foothill steppes, xerophytic thickets on the mountain slopes at heights from -18 to 550 meters above sea level, as well as household plots, vineyards and vegetable gardens (Bannikov, 1951; Mazanaeva, 2001; Dzhamirov, Tertysnikov, 2000; Bannik et al., 2001;

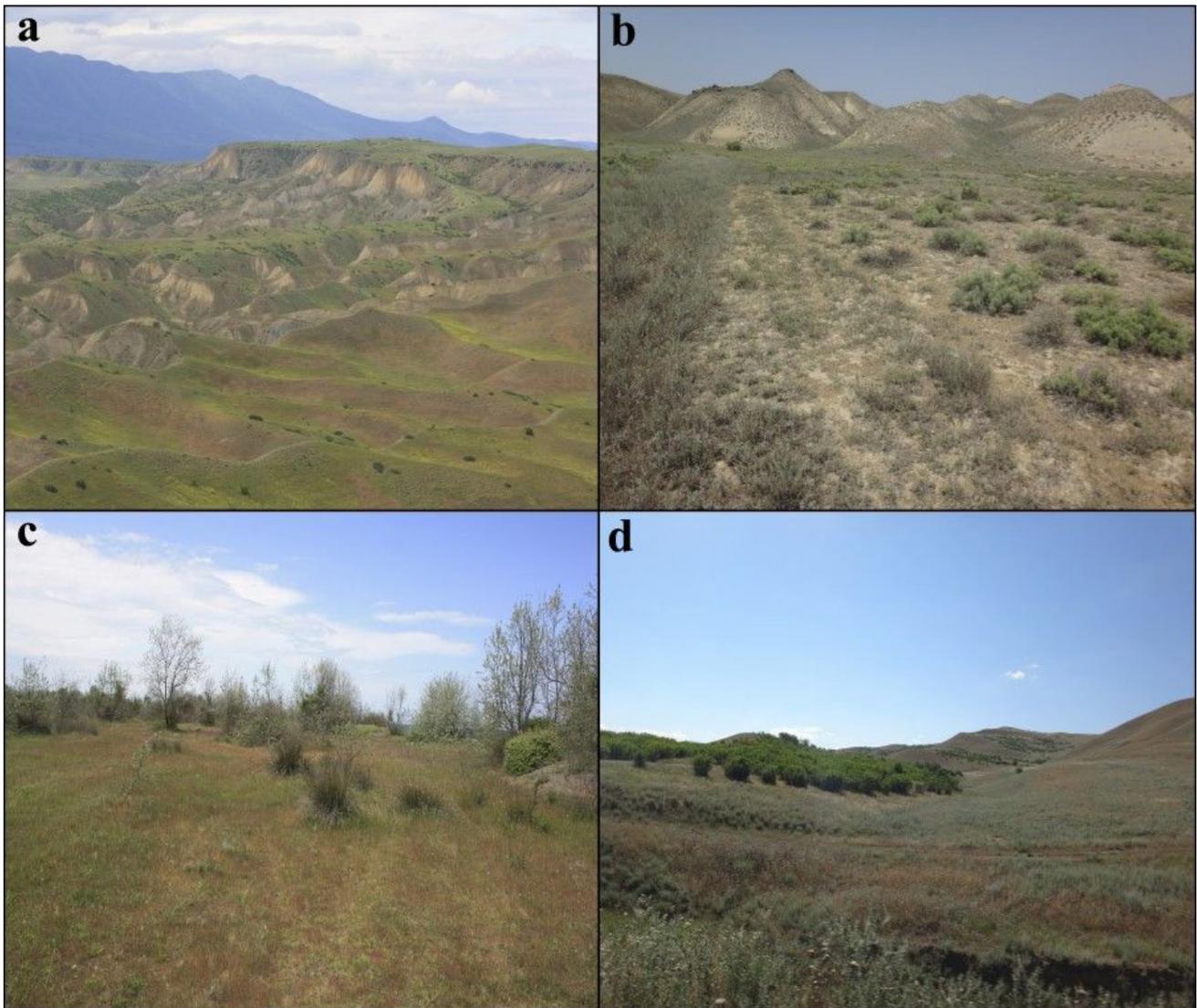


Fig. 1. Habitat of *T. graeca* in the south-eastern part of the area: a) foothill dry steppes in the Shurdere locality; b) foothill of the steppe semi-deserts in the vicinity of Gelinbotan; c) foothill of wormwood-grass steppe and oak woodlands in the vicinity of Gedzhuh; d) coastal semi-desert steppes in the Samur delta

Mazanaeva, 2001; Mazanaeva et al., 2009; Mazanaeva, 2013). The densities of *T. graeca* in places of accumulation were 8–11 individuals per ha (Bannikov, 1951; Bannikov et al., 1977). We found only two populations in this part of the area: in the foothills between the Bashlychay River and the Gamriozen' River (near the village of Shalasi) and on the coast of the Caspian Sea in the vicinity of the lagoon of Adji Lake (Papasa). The population of the foothills inhabits the slopes of mountains with wormwood-grass steppes, and along the slopes of the Northern and North-Western exposure it inhabits mixed grass steppes with thickets of xerophytic bushes (sp. *Kochia*, *Capparis*, *Paliurus*, *Rhamnus*, *Spiraea*, *Pyrus*). The average density of this population is 0.3 individuals per ha and the area of the remaining habitats is 6700 ha. In the vicinity of Adji Lake (Papasa), the tortoise lives on coastal dunes (Fig. 2) and on fixed sands at

their base (sp. *Pyrus*, *Rubus*, *Rhamnus*), as well as on semi-desert areas with wormwood-cereals (Fig. 3), their length is about 7 kilometers extending from the North to the South.

The average density of the tortoise is 1 individual per ha, with the area of the remaining habitats being 1300 ha. These populations are isolated from each other by the federal highway "Caucasus" and its associated agglomeration, as well as by extensive anthropogenically transformed landscapes. In this part of the area *T. graeca* coexists with *Pelobates syriacus*, *Lacerta strigata*, *Pseudopus apodus*, *Eremias arguta*, *Eremias velox*, *Dolichophis schmidtii*, *Elaphe sauromates*, *Eryx jaculus*, *Platyceps najadum*, *Macrovipera lebetina*, *Natrix natrix*, *N. tessellata*, *Mauremys caspica*, *Emys orbicularis*. We did not find a turtle in previously known habitats on the Caspian Sea coast between the Gamriozen' River and the Izberbash city, as well



Fig. 2. Habitat of *T. graeca* in the central part of the range on the coastal dunes of the Caspian Sea

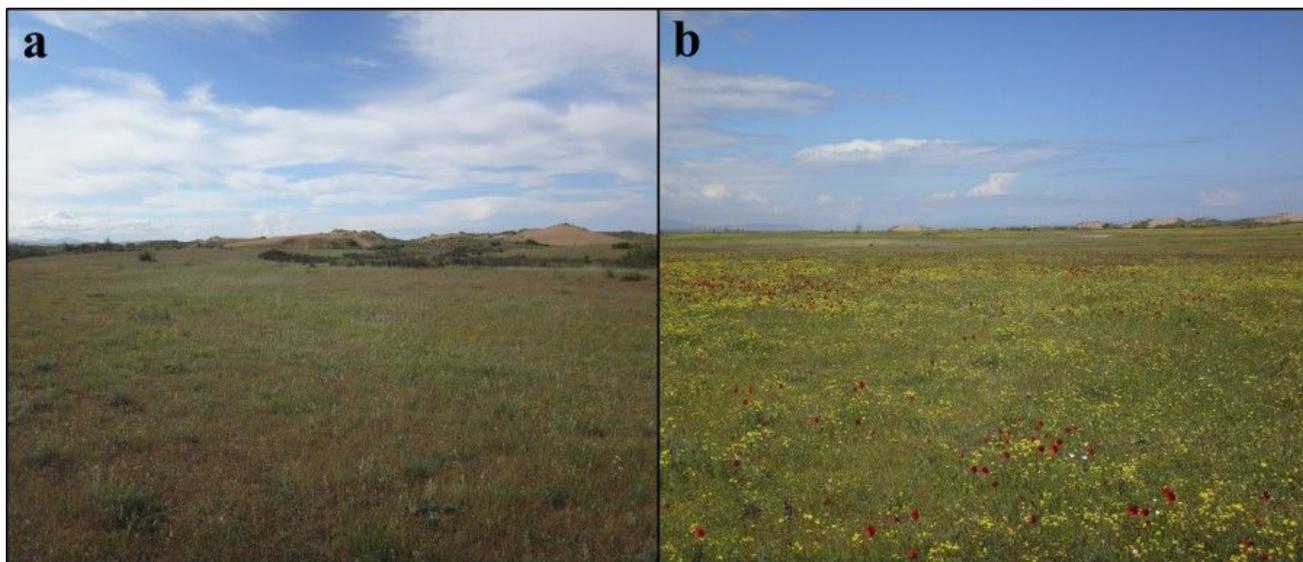


Fig. 3. Habitat of *T. graeca* in the central part of the area between Lake Adji (Papas) and the Caspian Sea: a) sandy wormwood-grass steppe; b) sandy mixed grass and cereal steppe

as on the foothills between the Incheozen' River and the Dzhangakaluchai River. According to our data, the area of destroyed and degraded biotopes is about 111600 ha. The main factors of it are the recreational pressure on the Caspi-

an Sea coast, the expansion of cities and towns, as well as the work of numerous sand and stone quarries, the development of the agricultural sector and overgrazing (Fig. 4, 5).

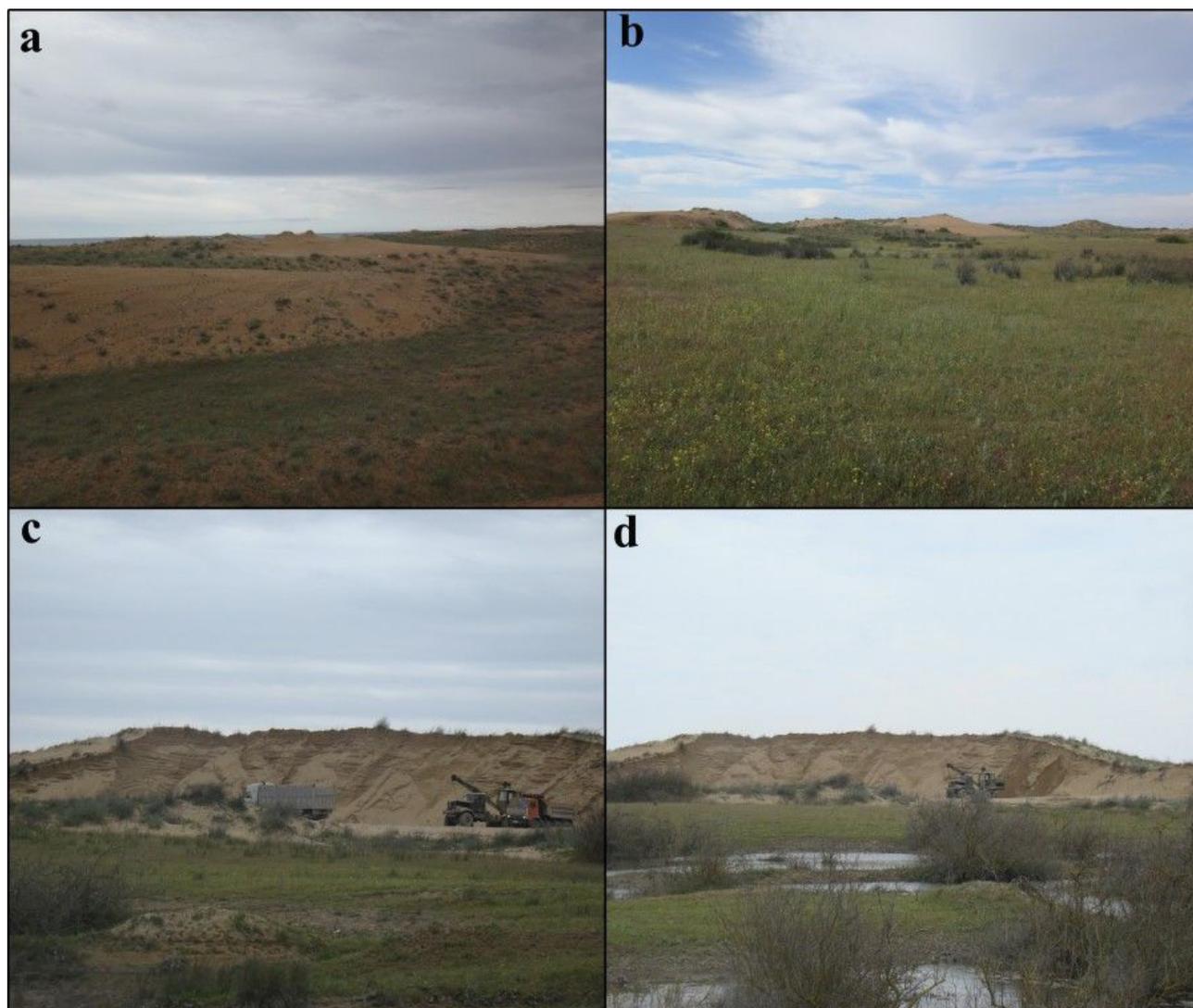


Fig. 4. Habitats of *T. graeca* in the central part of the area between Lake Adji (Papas) and the Caspian Sea in 2014 (a, b) and their state in 2019 due to sand removal (c, d)

The north-western part of the area included foothills from Cape Buinak near the Izberbash city (the Kanaburu and the Narat-Tyube Ranges) to the environs of the Sarykum Barkhan and the coast of the Caspian Sea between the Dzhangakaluchai River and the Southern edge of the Kaspiysk city. The area of the range in the middle of the 20th century was 124900 ha, and at the beginning of the 21st century it is 71600 ha. The tortoise inhabited the various habitats: sandy semi-desert, riparian thickets along the coast of the Caspian Sea, arid clay steppes of ancient Caspian terraces, river valleys, mountain slopes with xerophytic bushes and with oak woodlands, or pine, or juniper woodlands at altitudes from -20 to 600 meters regarding sea level (Bannikov, 1951; Bannikov et al., 1977; Leontyeva et al., 1998; Mazanaeva, 2001). We have marked the tortoise populations during our research of the foothills on the Eastern macroslope and Western macroslope of the Kanab-

uru Ridge, on the slopes of Mount Kukurtbash and on the north-eastern macroslope of the Narat-Tyube Ridge. According to our data, at present, within this part of the area, the tortoise is sporadically distributed, inhabiting various biotopes of the foothills. In this area, the tortoise inhabits the sandy steppes covered with bushes at the foot of the dune Sarykum, as well as dry foothill steppes (with *Koeleria*, *Poa*, *Festuca*, *Centaurea*, *Dictamnus*, *Sedum*, *Glycyrrhiza*, *Asplenium*, *Stipa*, *Andropogon*), river valleys, on mountain slopes with xerophytic shrubs (*Cotinus*, *Euonymus*, *Cerasus*, *Spiraea*, *Juniperus*, *Rhamnus*, *Lonicera*, *Celtis*, *Ephedra*, *Rosa*, *Ligustrum*, *Lonicera*, *Cotoneaster*), pine woodland and oak woodland (*Pinus*, *Juniperus*, *Quercus*, *Populus*, *Cotinus*, *Cotoneaster*, *Sorbus*), and juniper woodlands (*Kochia*, *Capparis*, *Paliurus*, *Acer*, *Cornus*, *Pyrus*, *Berberis*, *Rosa*, *Lonicera*, *Cotinus*) (Fig. 6).



Fig. 5. Habitat of *T. graeca* in the central part of the area on the slopes of the Kanaburu Ridge in 2016 (a) and the state of these biotopes in 2019 due to the stone quarry (b); littering of habitats in the central part of the range in the foothills (near the village of Murego) (c)

The average tortoise density in these habitats is 0.17 individuals per ha. In this part of the area *T. graeca* coexists with *P. apodus*, *Paralau-dakia caucasica*, *L. strigata*, *E. arguta*, *E. velox*, *N. natrix*, *N. tessellata*, *Eirenis collaris*, *Typhlops vermicularis*, *Telescopus fallax*, *Hemorrhhois ravergieri*, *M. lebetina*, *D. caspius*, *E. jaculus*, *P. najadum*, *E. orbicularis*, *M. caspica*. We did not find *T. graeca* in previously known habitats on the Caspian Sea coast between the mouth

of the Kolichi River and the Southern edge of the city of Kaspiysk (Fig. 8, 9, 10). According to our data, the area of degraded and destroyed habitats in the north-western part of the area is 87900 ha. The main factors are the recreational load on the coast, the expansion of cities and towns, the work of numerous sand pits, especially on the coast and stone pits in the foothills, as well as the development of the agricultural sector and overgrazing (Fig. 7, 8, 9).

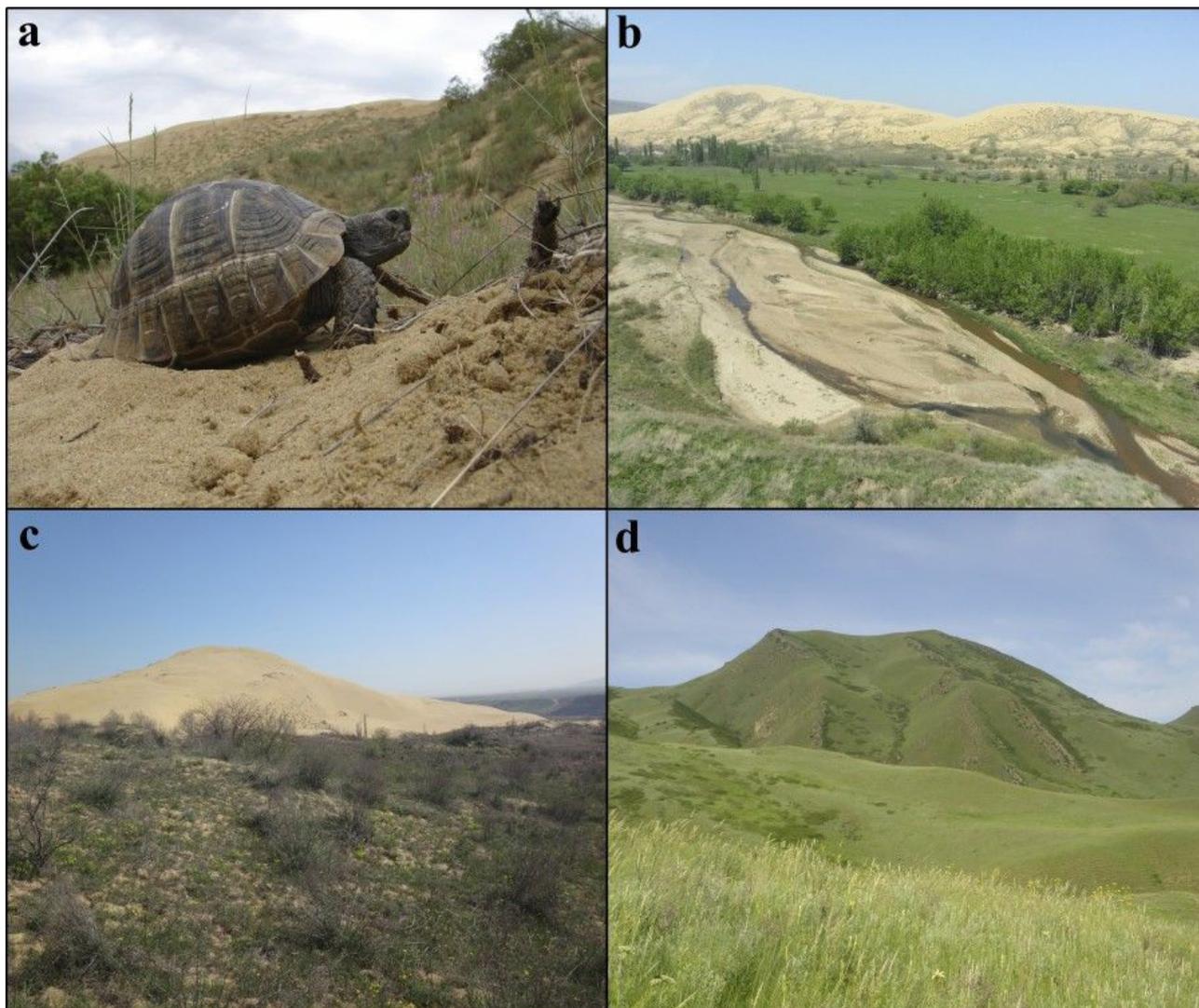


Fig. 6. Habitat of *T. graeca* in the north-western part of the range: a) on the mainland dune (Sarykum Dunes section of the Dagestan reserve); b) in the valley of the Shuraozen' River; c) in the sandy steppe at the base of the continental dune (the Sarykum Dunes section of the Dagestan reserve); d) on the slopes of the Narat-Tube Ridge to the West of the city of Makhachkala – dry steppes with thickets of arid shrubs



Fig. 7. Destruction of habitats of *T. graeca* in the north-western part of the range – the consequences of the operation of the quarry for the extraction of gravel and rubble (near the village of Karabudakhkent)

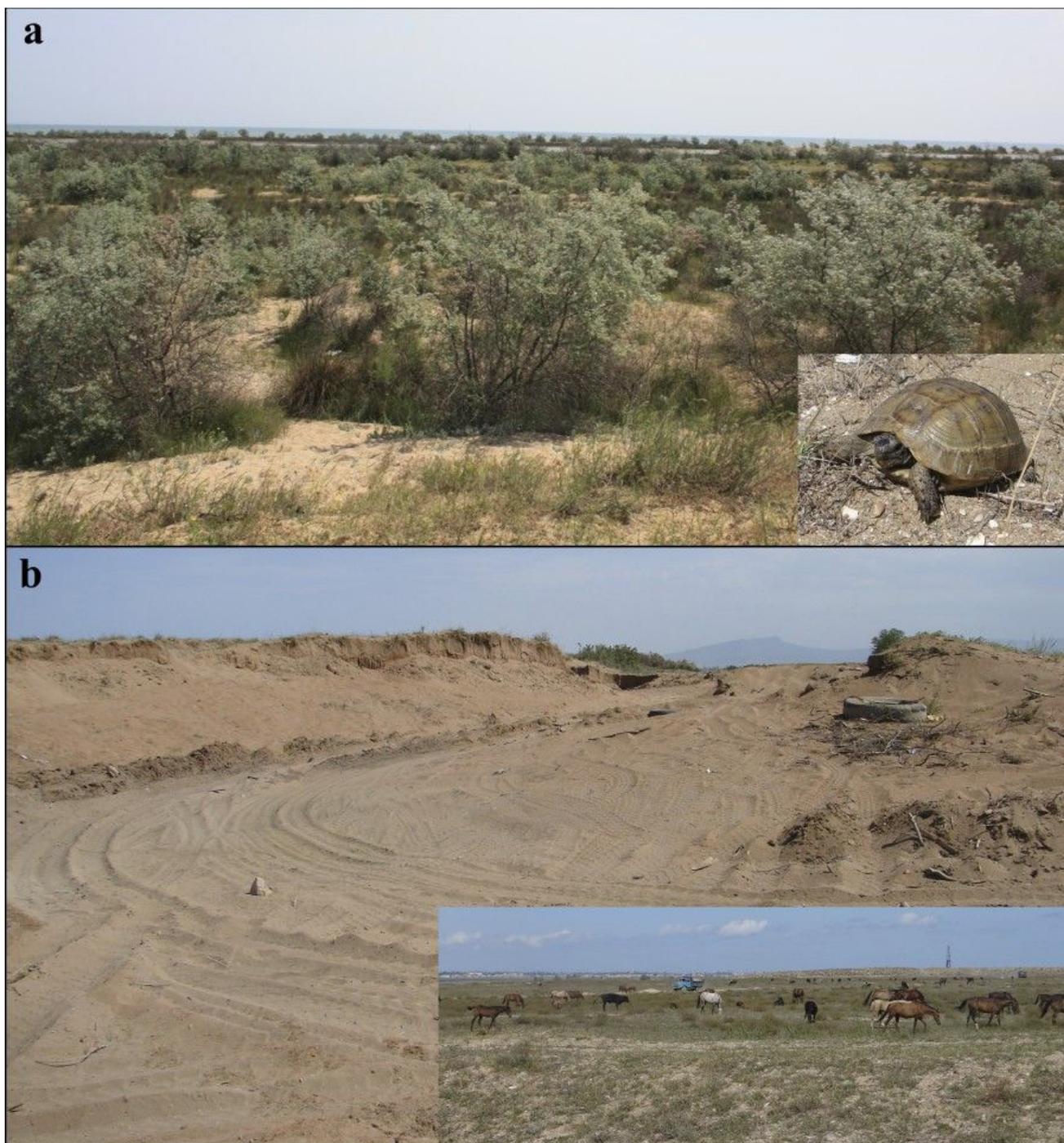


Fig. 8. Habitats of *T. graeca* in the north-western part of the ridge on the southern outskirts of the city of Kaspiysk between the Caspian Sea and lakes Big and Small Turali in 2014 (a) and the state of these biotopes in 2019 due to sand mining (b)

## Conclusion

The total area of the range of *T. graeca* in the middle of the 20th century was 418100 ha, at the beginning of the 21st century it is already 258500 ha. According to our data, the total area of habitats of this species currently left is about 106600 ha; by the beginning of the 21st century the regional area has decreased 1.6 times (about 62 % of the total area), and to date it declined by more than 3.9 times (about

74 % of the total area). These data indicate a progressive reduction of habitats and the number of the spur-thighed tortoise in Dagestan. The average number of tortoises on the coast of the Caspian Sea according to literary data in the middle of the 20th century was 8–11 individuals per ha, at the beginning of the 21st century it was 1.5 individuals per ha (Krasovsky, 1932; Bannikov, 1951), according to our data, currently the number of tortoises is 1 individual per ha. In the foothills, the average number



Fig. 9. Comparison of the habitat status of *T. graeca* in the north-western part of the area on the southern edge of the city of Kaspiysk between the Caspian Sea and lakes Big and Small Turali according to Google Earth Pro: a) in 1970; b) in 2018; 1 – coastal dunes, 2 – pits remained after sand removal, 3 – coastal buildings

at the beginning of the 21st century was about 0.33 individuals per ha (Mazanaeva, 2001), according to our data, the average number is currently about 0.21 individuals per ha. According to our expert assessment, at present, the total number of mature spur-thighed tortoises in Dagestan is about 700 individuals. Such a sharp reduction in the tortoise number by the beginning of the 21st century had been due to the increasing influence of different anthropogenic factors. In the 1960s–1970s, the people population resettles from mountainous areas to the foothills and lowlands. This led to the expansion of existing cities and towns, as well as the emergence of new villages and towns. As a result, the active recreational development of the coastal plain of the Caspian Sea began, the development of agriculture (the areas of agrophytocenoses increased significantly), and numerous quarries for the extraction of sand and stone arose. At the beginning of the 21st century, the main anthropogenic factor contributing to a significant reduction in the tortoise number is the destruction of its natural habitats, as a result of the work of numerous quarries for the extraction of sand, soil, gravel and stone on an industrial scale. Sand was extracted most extensively on the south-eastern coast of the Caspian Sea, where the most optimal biotopes were inhabited by viable populations of spur-thighed tortoise. Along with sand, the clutches, juveniles and often adult individuals were withdrawn. Many individuals died under the wheels of heavy cars with sand. The expansion of the agglomeration along the fed-

eral highway "Caucasus" led to the isolation of foothill and lowland tortoise populations. The work of numerous stone quarries contributed to the destruction of habitats in the foothills. All this led to a significant reduction in the habitat areas of *T. graeca* on the coast of the Caspian Sea and to the fragmentation of its area in the foothills. According to our data, at present, two small isolated areas of its habitat stay within the south-eastern coast: the first is located in the delta of the Samur River, the second is located in the vicinity of the largest lagoon of Adji Lake (Papas). Three relatively isolated habitat areas remained in the foothills – the area "Shurdere", in the Kayakent District South-East of the village of Shalasi, and on the slopes of the Narat-Tyube Ridge (Fig. 10).

Currently, in order to preserve these tortoise populations, it is necessary to ensure their effective territorial protection. The existing network of specially protected natural territories in the republic cannot contribute to the conservation of this species in the region. According to our data, the habitats of *T. graeca* are represented only in two Federal subordinate specially protected natural territories – in the Samursky and in the Dagestansky (Sarykum dunes) reserves. However, due to the small area of the tortoise' biotopes in them, they do not contribute significantly to the preservation of viable populations. To preserve this species in Dagestan, it is necessary to organize new protected areas and expand the boundaries of existing Federal subordinate protected areas. We believe that the preservation of the tortoise population in the

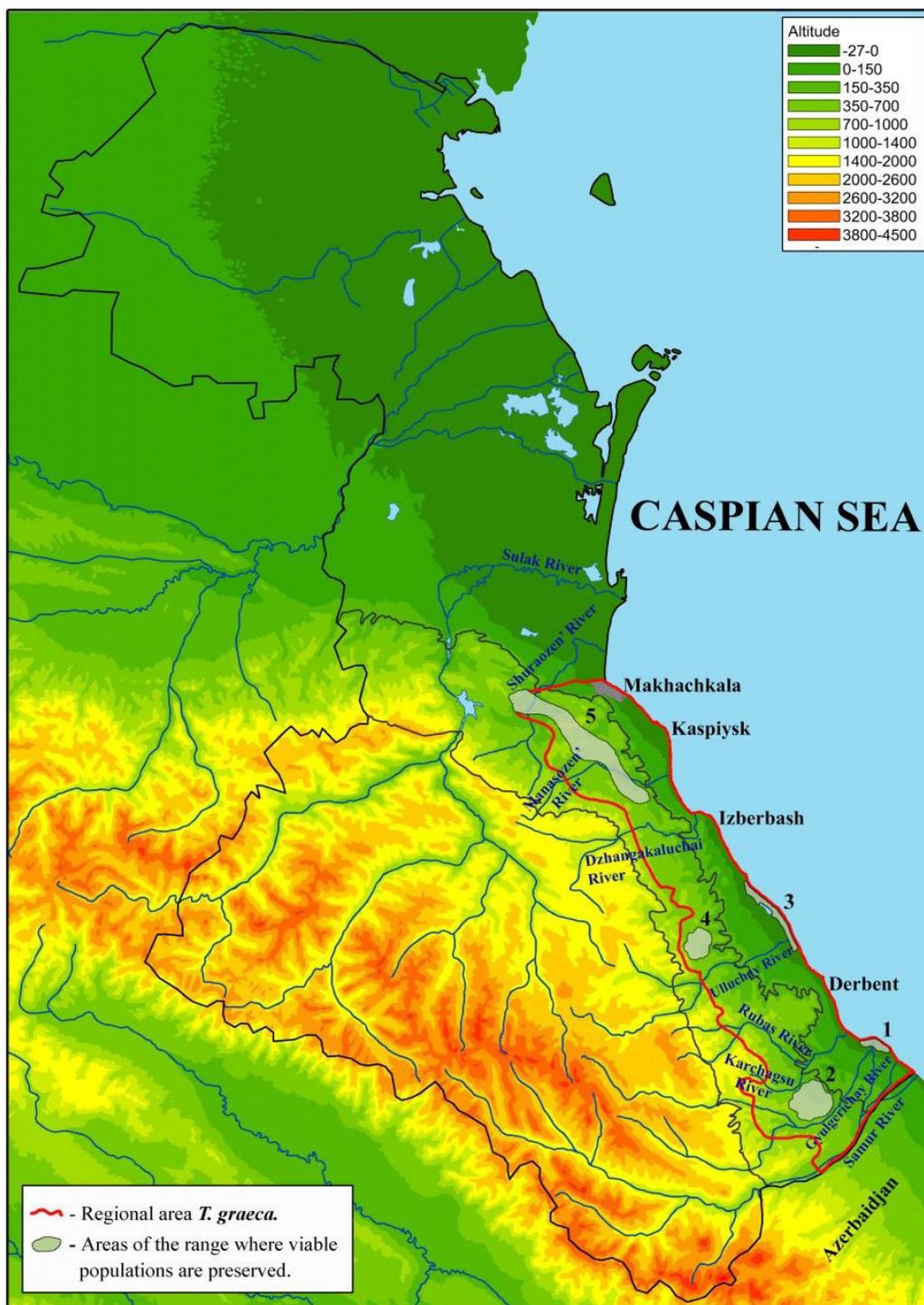


Fig. 10. Habitat of *T. graeca* in Dagestan in 2001 (according to Bannikov et al., 1977 with modifications and Mazanaeva, 2001) and the main surviving habitats in 2019: 1 – habitat in the Samur delta; 2 – habitats in the Shurdere locality, 3 – habitats in the vicinity of Adji Lake (Papas); 4 – habitats in the vicinity of the village of Shalasi, 5 – habitats on the slopes of the Narat-Tube Ridge

south-eastern part of the area will contribute to the expansion of the borders of the Samursky reserve by incorporating the remaining habitats in the coastal semi-desert landscapes. It is also necessary to include the foothill area Shurdere with an area of 16380 ha where the natural biotopes of the tortoise remained as a cluster into the Samursky reserve. In order to preserve the viable population of the spur-thighed tortoise in the central part of the area, it is necessary to create a specially protected natural area near Adji Lake (Papaz), including the remained coastal dunes and semi-desert-steppe landscapes of the coastal area of 1300 ha. In addition, it is necessary to create a protected area in the foothills in the Kayakentsky District South-East of the village of Shalasi, in an untapped territory of 6650 ha. To save the tortoise population in the North-Western part of the area, it is necessary to expand the boundaries of the Sarykum dunes section of the Dagestansky reserve by including there the Narat-Tyube ridge as a cluster. Transformation of the existing network of protected areas in the republic, taking into account our recommendations, will also contribute to the preservation of other rare spe-

cies of the region fauna, such as *P. syriacus*, *T. vermicularis*, *Eremias velox*, *Ophisops. elegans*, *Eumeces schneideri*, *Eryx jaculus*, *Eirenis collaris*, *E. modestus*, *D. schmidtii*, *H. ravergeri*, *M. lebetina*, *P. najadum*, *T. fallax* and others.

In addition to territorial protection, it is also necessary to monitor these populations within the entire area and to continue collecting inventory data on their distribution and abundance. Ecological education of the local people population will also contribute to the protection of the species. The protection of the tortoise from being destroyed by humans, that is its individual protection, should be promoted first of all by legislative protection, the instrument of which should be the Red Book of the Republic of Dagestan. This will prevent more effectively the disappearance of particularly rare and most vulnerable species. However, environmental legislation in the republic remains not fully demanded. Licenses for the extraction of generally accessible resources are issued without appropriate environmental impact assessments; environmental protection agencies do not provide adequate control over the status of populations of rare and endangered species.

## References

- Ananjeva, N. B., Milto, K. D., Ostrovsky, S. V., Pestov, G. M., Pestov, M. V. (2008): Project on the study and protection of the Mediterranean tortoise (*Testudo graeca nikolskii*) in the Western Caucasus – first results and prospects. Herpetology Issues: Proceedings of the Third Congress of the Herpetological Society named after A. M. Nikolsky. Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg.
- Ananjeva, N. B., Orlov, N. L., Khalikov, R. G., Darevsky, I. S., Ryabov, S. A., Barabanov, A. V. (2004): Atlas of Reptiles of Northern Eurasia (Taxonomic diversity, geographical distribution and conservation status). Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg.
- Ataev, Z. V. (2002): Landscapes of foothill Dagestan and questions of their agro-economic optimization. Abstract of dissertation and candidate of geographical sciences. Voronezh: VSU Publishing House. 27 p.
- Banik, M. V., Dzhamirzoev, G. S., Atemasov, A. A., Goncharov, G. L. (2001): Rare species of reptiles of Primorsky lowland of Dagestan: the state of populations and the need for protection. Geocological and bioecological problems of the Northern Black Sea region. Materials of the international scientific-practical conference. Tiraspol.
- Bannikov, A. G. (1951): Materials for the knowledge of the biology of the Caucasian turtles. Izvestiya of the Moscow City Pedagogical Institute named after V. Potemkin. 18: 129–167.
- Bannikov, A. G., Darevsky, I. S., Ishchenko, V. G., Rustamov, A. K., Shcherbak, N. N. (1977): The determinant of amphibious and reptilian fauna of the USSR. Moscow.
- Chilikina, L. N. (1962): DASSR vegetation map with explanatory text. USSR Academy of Sciences.
- Chilikina, L. N. (1962): DASSR vegetation map with explanatory text / L. N. Chilikina, E. V. Schiffers. M., L., USSR Academy of Sciences. 94 p.
- Chkhikvadze, B. M., Bakradze, M. A. (2002): New subspecies of land tortoise from Dagestan. Proceedings of the Institute of Zoology (Tbilisi). 21:276–279.
- Chkhikvadze, V. M. (2009): Status and Conservation of the Mediterranean Tortoise (*Testudo graeca*) in Georgia. "Status and protection of globally threatened species in the Caucasus". CEPF, WWF, Tbilisi.
- Chkhikvadze, V. M., Mazanaeva, L. F., Shammakov, S. M. (2011): Brief information about the new species of land tortoise from Dagestan. Biological diversity and problems of the protection of the fauna of the Caucasus. Materials of the international scientific conference, Yerevan, Armenia.
- Chkhikvadze, V. M., Mazanaeva, L. F., Shammakov, S. M. (2014): Land turtles of Dagestan. Problems of

- desert development. 1–2:42–46.
- Dzhamirzoev, G. S., Tertysnikov, M. F. (2000): Materials on the distribution and abundance of the Mediterranean tortoise (*Testudo graeca*, 1758) in Dagestan. Herpetological vestnik. 2(3/4):23–25.
- Dinesman, L. T. (1952): Quantitative accounting methods for amphibians and reptiles / L. T. Dinesman, M. L. Kaletskaya. Methods of accounting and the geographical distribution of terrestrial fauna. P. 329–340.
- Eldarov, M. M. (1972): Physical Geography of Lowland Dagestan. Makhachkala, Dagestan educational pedagogical publishing house.
- Fritz, U., Harris, D. J., Fahd, S., Rouag, R., Martínez, E. G., Casalduero, A. G., Siroky, P., Kalboussi, M., Jdeidi, T. B., Hundsdorfer, A. K. (2009): Mitochondrial phylogeography of *Testudo graeca* in the western Mediterranean: old complex divergence in North Africa and recent arrival in Europe. Amphibia–Reptilia. 30:63–80. URL: <https://doi.org/10.1163/156853809787392702>
- Fritz, U., Hundsdorfer, A. K., Siroky, P., Auer, M., Kami, H., Lehmann, J., Mazanaeva, L. F., Turkozan, O., Wink, M. (2007): Phenotypic plasticity leads to incongruence between morphology-based taxonomy and genetic differentiation in western Palaearctic tortoises (*Testudo graeca* complex; Testudines, Testudinidae). Amphibia–Reptilia. 28:97–121. URL: <https://doi.org/10.1163/15685380779799135>
- Galichenko, M. V., Pereshkolnik, S. L. (1985): Distribution of the Mediterranean turtle biotopes on the Black Sea coast of the Caucasus. 6th All-Union Herpetological Conference. Abstracts (Tashkent): Science.
- Galushko, A. I. (1978). Flora of the Northern Caucasus. The Field Guide. Vol. I, Izd. RGU, Rostov-on-Don. .
- Gurlev, I. A. (1972): Natural zones of Dagestan. Makhachkala, Dagestan educational pedagogical publishing house.
- Gyul, K. K., Vlasova, S. V., Kisin, I. M., Terterov, A. A. (1959): Physical geography of the Dagestan ASSR. Makhachkala.
- Gulisashvili, V. Z., Makhtadze L. B., and Prilipko L. I. (1975): The Vegetation of the Caucasus. Moscow. .
- Grossgeim, A. A. (1949): The Field Guide of the Plants of the Caucasus. Moscow. .
- Heyer, V. R., Donnelly, M. A., McDermid, R. V., Hayek, L.-E. S., Foster, M. S. (2003): Measurement and monitoring of biological diversity: standard methods for amphibians. M., KMK. 380 p.
- IUCN (2018): The IUCN Red List of Threatened Species. Available from: <https://www.iucnredlist.org>. .
- Inozemtsev, A. A., Pereshkolnik, S. L. (1985): The current state and prospects of protection inhabiting the Black Sea coast of the Caucasus turtles *Testudo graeca* The influence of anthropogenic gene factors on the structure and function Biogeocenosis: Collection of Scientific Works. Kalinin, Publishing Kalinin. State University.
- Korsunen, A., Vasilyev, V., Pereshkolnik, S., et al. (2005): DNA polymorphism and genetic differentiation of *Testudo graeca*, Russ. J. Herpetol. 12:40–42.
- Kostina, G. N., Galichenko, M. V. (1998): Some morphological features of the Mediterranean tortoise from Southern Dagestan. Influence of anthropogenic factors on the structure and functioning of biocenoses and their individual components. Interuniversity collection of scientific works.
- Krasovskiy, D. B. (1932): Materials for the knowledge of the fauna of terrestrial vertebrates of the Rutul canton of the Dagestan ASSR. Publ. 2nd North-Caucasian Pedagogical Institute. 9:185–218.
- Leontyeva, O. A., Gallamov, R. R., Slavinskaya, I. V. (1998): Comparative ecological and morphological characteristics of *Testudo graeca nikolskii* and *g. ibera* in the Caucasus. Miaud C. and Guyetant R. eds. Le Bourget du Lac. France, SEH.
- Mashkaryan, V., Vamberger, M., Arakelyan, M., et al. (2013): Gene flow among deeply divergent mtDNA lineages of *Testudo graeca* (Linnaeus, 1758) in Transcaucasia, Amphibia–Reptilia. URL: <https://doi.org/10.1163/15685381-00002895>
- Mazanaeva, L. F. (2001): Distribution, state of populations and problems of protection of *Testudo graeca ibera* in Dagestan (the south-eastern north Caucasus, Russia). Chelonii. 3:59–66.
- Mazanaeva, L. F. (2013): Mediterranean turtle, *Testudo graeca* Linnaeus, 1758. Rare vertebrate animals of the Dagestansky Reserve (Edited by G. S. Dzhamirzoev and S. A. Bukreev). Proceedings of the Dagestansky Reserve. 6:48–55.
- Mazanaeva, L. F., Gichikhanova, U. A. (2018): On the Reduction of the Area and Abundance of the Greek Tortoise *Testudo graeca* Linnaeus, 1758 (Testudinidae, Reptilia) on the Primorsky Lowland of Dagestan and Problems of its Conservation. Current Studies in Herpetology. 18(3/4):34–45. URL: <https://doi.org/10.18500/1814-6090-2018-18-3-4-135-145>
- Mazanaeva, L. F., Orlova, V. F., Iljina, E. V., Starkov, V. G. (2009): Distribution and Status of Mediterranean Tortoise (*Testudo graeca*, Linnaeus, 1758) in Russia. Status and Protection of Globally Threatened Species in the Caucasus. Tbilisi, CEPF, WWF. Contour Ltd.
- Murtazaliev, R. A. (2009): *Konspekt flori Dagestana* . Volume I–IV. Answ. Ed. Corr. RAS R. V. Camelin. Makhachkala, The Epoch Publishing House.
- Novikov, G. A. (1949): Field studies of the ecology of terrestrial vertebrates. M., Soviet science. 662 p.
- Orlova, V. F., Starkov, V. G., Mazanaeva, L. F. (2011): Distribution and state of populations of the Mediter-

- ranean turtle (*Testudo graeca nikolskii* Chkhikvadze and Tuniyev, in the Krasnodar Territory). Questions of herpetology, Proceedings of the Fourth Congress of the Herpetological Society. 203:203–207.
- Parham, J. F., Turkozan, O., Stuart, B. L., Arakelian, M., Shafei, S., Macey, J. R., Werner, Y. L., Papenfuss, Th. J. (2006): Genetic Evidence for Premature Taxonomic Inflation in Middle Eastern Tortoises. Proceedings of the California Academy of Sciences (fourth series). 57(33):955–964.
- Pestov, M. V., Malandziya, V. I., Milto, K. D., Dbar, R. S., Pestov, G. M. (2009): Mediterranean tortoise (*Testudo graeca nikolskii*) in Abkhazia. Modern herpetology. 9(1/2):41–51. .
- Red Book of Animals of the Republic of Armenia. (2010): Yerevan: Zangak.
- Rhodin, A. G. J., Iverson, J. B., Bour, R., Fritz, U., Georges, A., Shaffer, H. B., van Dijk, P. P. (2017): Turtles of the World: Annotated Checklist and Atlas of Taxonomy, Synonymy, Distribution, and Conservation Status. Conservation Biology of Freshwater Turtles and Tortoises. 8th Ed. Chelonian Research Monographs. URL: <https://doi.org/10.3854/crm.7.checklist.atlas.v8.2017>
- Schiffers, E. V. (1946): Natural fodder vegetation of mountainous Dagestan. Agriculture of Dagestan. Moscow, Leningrad, Publ. AN SSSR.
- Shlyahtin, G. V. (1986): Methods of field research on the ecology of amphibians and reptiles / G. V. Shlyahtin, V. L. Golikova. Saratov, Saratov University Publishing House. 77 p.
- Shcherbak N. N. (1989): Quantitative accounting. *Guide to the study of amphibians and reptiles*. Kiev. P. 121–125.
- The Red Book of Azerbaijan (2013): Baku, Institute of Zoology, National Academy of Science. 493 p. (in Azerbaydzhan).
- The Red Book of the Chechen Republic: Rare and Endangered Species of Plants and Animals (2007): Grozny, Southern Publishing House. 432 p.
- The Red book of the Krasnodar Territory. Animals. II Edition (2007): Krasnodar, Development Center PTR Krasnodar. 504 p.
- The Red book of the Krasnodar Territory. Animals. III Edition (2017): Krasnodar, Adm. Krasnodar. 720 p.
- The Red Data Book of the Georgian SSR: Rare and Endangered Species of Animals and Plants (1982): Some monuments are not logged of nature. Tbilisi, Sabchota Sakartvelo. 255 p.
- The Red Data Book of the Republic of Dagestan. (2009): Makhachkala, Republican newspaper and magazine printing house. 552 p.
- The Red Data Book of the Russian Federation. Animals (2001): M., AST-Astrel. 862 p. (in Russian).
- Tuniev, B. S., Tuniev, S. B. (2007): Reptiles. The Red Book of the Krasnodar Territory. Animals. Krasnodar
- Uetz, P., Freed, P. & Hošek, J. (eds.) (2019): The Reptile Database. URL: <http://www.reptile-database.org> .
- Van der Kuyl, A. C., Ballasina, D. L. Ph., Dekker, J. T., Maas, J., Willemsen, R. E., Goudsmit, J. (2002): Molecular Phylogenetics and Evolution. 22(2):174–183. URL: <https://doi.org/10.1006/mpev.2001.1052>
- Vasilyev, V. A., Bondarenko, D. A., Peregontsev, E. A., et al. (2008): Polymorphism of the 12S rRNA gene and phylogeography of the Central Asian tortoises *Agrionemys horsfieldii* Gray, 1844, J. Genet. 44(6):682–685. URL: <https://doi.org/10.1134/S1022795408060070>

# СОСТОЯНИЕ ПОПУЛЯЦИЙ СРЕДИЗЕМНО-МОРСКОЙ ЧЕРЕПАХИ *TESTUDO GRAECA* LINNAEUS, 1758 (TESTUDINIDAE, REPTILIA) В ДАГЕСТАНЕ

МАЗАНАЕВА  
Людмила Фейзулаевна

к. б. н., Дагестанский государственный университет,  
mazanaev@mail.ru

ГИЧИХАНОВА  
Узлипат Адилмирзаевна

Дагестанский государственный университет,  
uzlipat92@mail.ru

## Ключевые слова:

Дагестан  
Приморская  
низменность  
предгорья  
*Testudo graeca*  
ареал  
численность  
охрана

**Аннотация:** В статье приводятся данные о современном состоянии популяций *T. graeca* из Прикаспийского региона Дагестана (Северный Кавказ). Согласно последним литературным данным, в регионе распространен подвид *T. g. armeniasa*. Средиземноморская черепаха в Дагестане обитает на северной периферии ареала. Региональный ареал вида включал побережье Каспийского моря («Приморскую низменность») и прилежащие предгорья до 700 м н. у. м до границы с Азербайджаном. Площадь ареала составляла 418100 га. С конца XX века наблюдается сокращение численности и фрагментации ареала в Дагестане, как и в целом в пределах видового ареала, из-за воздействия антропогенных факторов. На побережье Каспийского моря в настоящее время численность черепах составляет 1 ос./га, в предгорьях – около 0.21 ос./га. В 2013–2019 гг. мы изучали современное распространение и численность черепахи в сохранившихся местообитаниях в пределах исследуемой территории. Мы выявили наиболее оптимальные местообитания вида, где сохранились популяции с хорошим репродуктивным потенциалом. По нашим данным, сохранилось два изолированных участка обитания черепахи на Приморской низменности в дельте Самура и в окрестностях оз. Аджи (Папас) и три в предгорьях: в местности Шурдере, в окрестностях села Шаласи и на склонах хребта Нарат-Тюбе. В настоящее время суммарная площадь сохранившихся местообитаний этого вида в регионе составляет около 106600 га, деградированных – 311500 га. Основной антропогенный фактор, способствующий резкому сокращению численности черепахи, – это разрушение ее естественных местообитаний вследствие работы многочисленных карьеров по добыче песка, грунта, гравия и камня в промышленных масштабах. В статье даются рекомендации по сохранению вида в регионе

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: А. Г. Бакиев

Рецензент: Н. Б. Ананьева

Получена: 21 июля 2020 года

Подписана к печати: 21 июня 2021 года

Abstract of the flora of Dagestan. Volume I–IV. Answ. Ed. Corr. RAS R. V. Camelin. Makhachkala, The Epoch Publishing House.

Fritz, U., Harris, D. J., Fahd, S., Rouag, R., Martínez, E. G., Casalduero, A. G., Siroky, P., Kalboussi, M., Jdeidi, T. B., Hundsdorfer, A. K. (2009): Mitochondrial phylogeography of *Testudo graeca* in the western Mediterranean: old complex divergence in North Africa and recent arrival in Europe. *Amphibia-Reptilia*. 30:63–80. URL: <https://doi.org/10.1163/156853809787392702>

Fritz, U., Hundsdorfer, A. K., Siroky, P., Auer, M., Kami, H., Lehmann, J., Mazanaeva, L. F., Turkozan, O., Wink, M. (2007): Phenotypic plasticity leads to incongruence between morphology-based taxonomy and genetic differentiation in western Palearctic tortoises (*Testudo graeca* complex; Testudines, Testudinidae). *Amphibia-Reptilia*. 28:97–121. URL: <https://doi.org/10.1163/15685380779799135>

Heyer, V. R., Donnelly, M. A., McDermid, R. V., Hayek, L. E. S., Foster, M. S. (2003): Measurement and monitoring of biological diversity: standard methods for amphibians. M., KMK. 380 p.

Korsunen, A., Vasilyev, V., Pereshkolnik, S., et al. (2005): DNA polymorphism and genetic differentiation of *Testudo graeca*, *Russ. J. Herpetol.* 12:40–42.

Leontyeva, O. A., Gallamov, R. R., Slavinskaya, I. V. (1998): Comparative ecological and morphological characteristics of *Testudo graeca nikolskii* and *g. ibera* in the Caucasus. M. and Guyetant R. eds.

Le Bourget du Lac. France, SEH.

Makhtadze L. B. Prilipko L. I. in Russian.

Mashkaryan, V., Vamberger, M., Arakelyan, M., et al. (2013): Gene flow among deeply divergent mtDNA lineages of *Testudo graeca* (Linnaeus, 1758) in Transcaucasia, Amphibia–Reptilia. URL: <https://doi.org/10.1163/15685381-00002895>

Mazanaeva, L. F. (2001): Distribution, state of populations and problems of protection of *Testudo graeca* iberica in Dagestan (the south-eastern north Caucasus, Russia). *Chelonii*. 3:59–66.

Novikov, G. A. (1949): Field studies of the ecology of terrestrial vertebrates. M., Soviet science. 662 p.

Parham, J. F., Turkozan, O., Stuart, B. L., Arakelian, M., Shafei, S., Macey, J. R., Werner, Y. L., Papenfuss, Th. J. (2006): Genetic Evidence for Premature Taxonomic Inflation in Middle Eastern Tortoises. *Proceedings of the California Academy of Sciences* (fourth series). 57(33):955–964.

Red Book of Animals of the Republic of Armenia. (2010): Yerevan: Zangak.

Rhodin, A. G. J., Iverson, J. B., Bour, R., Fritz, U., Georges, A., Shaffer, H. B., van Dijk, P. P. (2017): Turtles of the World: Annotated Checklist and Atlas of Taxonomy, Synonymy, Distribution, and Conservation Status. *Conservation Biology of Freshwater Turtles and Tortoises*. 8th Ed. Chelonian Research Monographs. URL: <https://doi.org/10.3854/crm.7.checklist.atlas.v8.2017>

SR. in Russian

Shcherbak N. N. (1989): Quantitative accounting. Guide to the study of amphibians and reptiles. Kiev. P. 121–125.

Shlyahtin, G. V. (1986): Methods of field research on the ecology of amphibians and reptiles, G. V. Shlyahtin, V. L. Golikova. Saratov, Saratov University Publishing House. 77 p.

The Red Book of Azerbaijan (2013): Baku, Institute of Zoology, National Academy of Science. 493 p. (in Azerbaydzhan).

The Red Data Book of the Georgian SSR: Rare and Endangered Species of Animals and Plants (1982): Some monuments are not logged of nature. Tbilisi, Sabchota Sakartvelo. 255 p.

The Red Data Book of the Russian Federation. Animals (2001): M., AST-Astel. 862 p. (in Russian).

Van der Kuyl, A. C., Ballasina, D. L. Ph., Dekker, J. T., Maas, J., Willemsen, R. E., Goudsmit, J. (2002): Molecular Phylogenetics and Evolution. 22(2):174–183. URL: <https://doi.org/10.1006/mpev.2001.1052>

Vasilyev, V. A., Bondarenko, D. A., Peregontsev, E. A., et al. (2008): Polymorphism of the 12S rRNA gene and phylogeography of the Central Asian tortoises *Agrionemys horsfieldii* Gray, 1844, J. Genet. 44(6):682–685. URL: <https://doi.org/10.1134/S1022795408060070>

WF. in Russian

in Russian

in Russian.

insert date here, e. g. Feb. 13, 2019.

insert date here, e.g. Nov 14, 2018.



УДК 574.58(282.247.431.2)

# ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНООБРАЗИЯ ДОННЫХ СООБЩЕСТВ ЛОТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СРЕДНЕГО И НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

**ГОЛОВАТЮК**  
Лариса Владимировна

к. б. н., Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Институт экологии Волжского бассейна РАН, [gollarisa@mail.ru](mailto:gollarisa@mail.ru)

**ЗИНЧЕНКО**  
Татьяна Дмитриевна

д. б. н., Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Институт экологии Волжского бассейна РАН,  
[zinchenko.tdz@yandex.ru](mailto:zinchenko.tdz@yandex.ru)

**ШИТИКОВ**  
Владимир Кириллович

д. б. н., Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Институт экологии Волжского бассейна РАН,  
[stok1946@gmail.com](mailto:stok1946@gmail.com)

**Ключевые слова:**  
равнинные реки  
макрозообентос  
структура метасообществ  
пространственное  
распределение  
индексы разнообразия  
алгоритм DER  
проверка нуль-гипотез

**Аннотация:** Анализируется пространственная изменчивость видо-вого разнообразия и таксономической структуры локальных донных сообществ по результатам многолетней гидробиологической съемки макрозообентоса на 102 малых и средних реках бассейна Средней и Нижней Волги. Проверяются нуль-гипотезы об отсутствии статистической зависимости структурных показателей сообществ от географических координат. Показывается, что общее биоразнообразие складывается из четырех характерных компонент (богатство видов, их редкость, выравниваемость и таксономическая сложность сообществ), осуществляется выбор наиболее информативных индексов и их сравнительный анализ с использованием алгоритма DER. Пространственное распределение вычисленных биотических показателей иллюстрируется на тематических экологических картах, которые являются важнейшими инструментами анализа процессов в метасообществе на видовом и ценотическом уровнях.

© Петрозаводский государственный университет

**Рецензент:** Н. В. Ильмаст

**Получена:** 06 августа 2020 года

**Подписана к печати:** 15 июня 2021 года

## Введение

Анализ донных сообществ на региональном (субконтинентальном) уровне основан на исследовании речных сетей, т. е. взаимосвязанных совокупностей лотических объектов, размещенных на площади до нескольких тысяч квадратных километров (часто в разных природно-климатических зонах). Изучение таких крупномасштабных экосистем, включа-

ющих десятки и сотни локальных сообществ, функционирующих в неоднородных условиях среды, целесообразно проводить на основе современной концепции метасообщества (*metacommunity concept*) (Leibold et al., 2004; Holyoak et al., 2005), которая позволяет моделировать закономерности пространственного распределения видового состава. Любая река по-своему уникальна, поэто-

му условия существования локальных сообществ и видовой состав гидробионтов в каждой из них могут существенно различаться (Алимов, 2001). Это подтверждают исследования на уровне отдельной малой или средней реки (в линейном масштабе от 10 до 300 км), связанные с моделированием распределения таксономической структуры гидробионтов по продольному профилю водотока под влиянием прерывистого градиента гидрологических условий и качества водной среды (Шитиков, Зинченко, 2014). В более крупном географическом масштабе донные сообщества рек обнаруживают специфические пространственные тенденции изменчивости, которые обусловлены воздействием климатических, ландшафтных или геоморфологических факторов и выявляются в ходе проведения комплексных биосферных исследований.

Пространственное распределение отдельных видов, как правило, автокоррелировано: появление таксона в некоторой точке увеличивает вероятность его обнаружения в соседних экотопах. Действительно, планктонные и бентосные организмы способны мигрировать наземным путем либо перемещаться по градиенту течения в пределах речной сети на сотни километров. Отмечено, что потоки миграции инвазивных видов могут быть в известной степени стационарными, и таксономическая структура локальных ценозов в зоне расселения чужеродных организмов может приобрести дополнительное сходство (Курина, Селезнев, 2019). Кроме того, в рамках крупного региона часто удается выделить относительно однородные области с одинаковыми физико-географическими условиями, составом ландшафтных элементов или уровнем антропогенного воздействия, что приводит к сходству видовой структуры локальных сообществ (Manni et al., 2004). Наконец, для каждой таксономической группы объективно существует некоторый географический градиент, относительно которого встречаемость отдельных видов может статистически значимо изменяться (см., например, теорию изменения широтного разнообразия – Koleff, Gaston, 2001).

В большинстве ситуаций монотонные тренды или однородные кластеры можно выделить, ориентируясь на распределение обобщенных показателей структурного и функционального разнообразия метасообществ. Видовое разнообразие обычно оценивается с помощью совокупности *индексов гетерогенности*, сочетающих в себе

богатство видов и соотношение вероятностей их присутствия, а также *индексов выравненности*, которые были разработаны в попытке выделить компонент эквитабельности сообществ в отдельное измерение (Pielou, 1975; Magurran, 2004). Объективная необходимость учета филогенетических различий между видами обусловила расширение понятия разнообразия и появление целой коллекции *таксономических и филогенетических индексов* (Faith, 1992; Ricotta, 2005; Chao et al., 2010; Kembel et al., 2010; Шитиков, Зинченко, 2013а, 2013б). Наконец, возникло понимание важности выделения комплекса редких видов как одного из главных компонентов разнообразия, что предопределило разработку *индексов редкости* (Gaston, 1994; Leroy et al., 2012).

Для проверки предположения о существовании пространственных закономерностей изменения видовой состава и разнообразия изучаемых рек используется концепция нулевых моделей, утверждающих, что распределение таксонов по участкам случайно и хаотично, кластеры не образуются, влияние экологических градиентов отсутствует и каких-либо согласованных связей между видами не обнаруживается (Hausdorf, Hennig, 2007). Нуль-модель являлась эталоном, с которым сравниваются модели, основанные на эмпирических данных, где предполагается наличие пространственной автокорреляции, основанной на близости географических координат.

Все эти гипотезы нуждаются в тщательной проверке с использованием репрезентативного массива натуральных исследований. Таковыми являются результаты многолетней гидробиологической съемки донных сообществ малых и средних рек на территории Среднего и Нижнего Поволжья. Ранее (Golovatyuk et al., 2018) были сформированы списки индикаторных видов, показывающие закономерную смену ведущих таксонов при смене природно-климатических поясов в последовательности водохранилищ Волжского каскада. Однако за рамками этой работы осталась такая важная проблема биоиндикации, как оценка качества вод и таксономическое разнообразие изученных лотических объектов.

Настоящая работа носит как прикладной, так и методический характер. С одной стороны, приводятся подробные графические и табличные данные о пространственном распределении различных индексов видо-разнообразия и отдельных таксонов ло-

кальных донных сообществ бассейна Средней и Нижней Волги. Проверяются научные гипотезы о статистической зависимости этих показателей от географических координат, показана их изменчивость между природно-климатическими зонами. С другой стороны, нами представляется набор алгоритмов тестирования нуль-моделей в геоинформатике и различные примеры тематических экологических карт, которые являются важнейшими инструментами анализа процессов в метасообществе на видовом и ценотическом уровнях, а в дополнительном приложении к статье представлены компьютерные модули их построения (Шитиков, 2020).

## Материалы

Исследования выполнены на основе результатов гидробиологического мониторинга донных сообществ бассейна Средней и Нижней Волги (Зинченко, 2011) в разные месяцы вегетационного периода 1990–2019 гг. Гидробиологическую съемку макрозообентоса проводили на 90 малых и 12 средних равнинных реках, притоках Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского водохранилищ, в том числе на 6 реках аридного региона бассейна оз. Эльтон. Образцы макрозообентоса (1401 проба) собирали в рипали и медиали рек дночерпателем Экмана – Берджи или гидробиологическим скребком. Фиксацию организмов и последующую камеральную обработку собранного материала проводили согласно общепринятым методикам (Зинченко, 2011). Всего было выявлено  $S = 740$  видов и таксонов бентоса рангом выше вида.

## Методы

С целью обобщения материала 245 станций 12 средних рек были разделены на приблизительно однородные участки: верхнее, среднее, нижнее течение и устье, а каждая малая река принималась как целостный объект. Таким образом, было выделено 132 локальных сообщества, в каждом из которых было взято в среднем по 10 проб (от 2 до 137). Для дальнейшего анализа была сформирована обобщенная таблица «132 участка рек» – «740 видов», которая включала встречаемость и среднюю численность каждого вида в каждом сообществе.

Главной проблемой корректной оценки сходства таксономического состава двух произвольных участков рек явилось неравное число взятых проб. Для выравнивания выборочного усилия выполнялась следующая

нормализующая процедура:

1) подсчитывалось среднее число видов  $Scp$ , обнаруженных в одной пробе на каждом участке рек (по всем пробам  $Scp = 9.548 \pm 0.170$ );

2) подсчитывалась встречаемость каждого вида, полученный ряд ранжировался по убыванию;

3) в качестве нормализованного видового состава для каждого участка принимался список из  $Scp$  таксонов с максимальной встречаемостью.

После процедуры нормализации рассчитывалась матрица  $132 \times 132$  таксономических расстояний на основе меры Брея – Кёртиса с использованием значений относительной встречаемости видов на каждом участке рек.

Гипотеза о значимости статистической связи между таксономическим составом водотоков и их пространственным расположением проверялась на основе матричного коэффициента линейной корреляции Мантеля (*quadratic assignment*) (Mantel, 1967; Шитиков и др., 2005). Дополнительно использовался тест на кластеризацию, проверяющий гипотезу о существовании положительных ассоциаций видов, который проводили на основе параметрического бутстрэпа матрицы дистанций между реками (Hennig, Hausdorf, 2004).

Для анализа пространственного распределения индексов видового разнообразия или численности отдельных таксонов геоинформационными методами выполняли построение нескольких типов карт: – *точечных карт*, на которых значение показателя в каждой точке показано различным размером и/или цветом; – *мозаичных карт*, состоящих из шестиугольных элементов различных цветов (*Hexbin map*); – *карт плотности* статистического распределения вероятности обнаружения изучаемого таксона; – *карт интенсивности* отображаемого показателя  $Z$  на основе его пространственной интерполяции (кригинга).

Подробно откомментированные скрипты кодов на языке R и полный комплект исходных данных представлены дополнительными материалами к статье (Шитиков, 2020), с помощью которых можно воспроизвести большинство расчетов и рисунков.

Для анализа расширенного набора показателей биологического разнообразия использовали метод и R-функцию DER (*Diversity, Evenness, Rarity*) (Guisande et al., 2017), вклю-

ченную в пакет EcolndR и выполняющую вычисления по трем последовательным этапам: – расчет комплекта индексов, оценивающих разнообразие по различным категориям: богатство видов, их редкость, выравненность и таксономическая сложность сообществ; – селекция наиболее информативной комбинации четырех индексов из различных разделов, которые обладают максимальной разрешающей способностью в условиях выполненного исследования; – построение диаграммы ординации объектов в полярных координатах.

Был рассчитан 31 индекс разнообразия из разных категорий (оценку функционального разнообразия не проводили из-за отсутствия необходимых данных). Для расчета индексов филогенетического и таксономического разнообразия по каждому из 740 видов выполнили систематическое описание по 11 классификационным уровням вплоть до типа гидробионтов (Шитиков, Зинченко, 2013а). На этой основе последовательно формировались матрица таксономических дистанций между каждой парой видов и филогенетическое дерево в формате Newick.

Для оценки индекса относительной редкости (Lerouy et al., 2012) каждому  $i$ -му виду с частотой встречаемости  $Q_i$  был поставлен в соответствие вес редкости (*rarity weight*):

$$w_i = \frac{1}{e^{\left(\frac{Q_i - Q_{\min}}{r \times Q_{\max} - Q_{\min}} \times 0.97 + 1.05\right)^2}}$$

где  $Q_{\min} = 1$ ,  $Q_{\max} = 448$  – минимальная и максимальная встречаемость видов в 1401 пробе,  $r = 0.01$  – порог редкости, принимаемый из эвристических соображений (доля от общей встречаемости, ниже которой вид признается редким). Величина весов уменьшалась по экспоненте от  $w_i = 1$  для видов, встретившихся только один раз, до  $w_i = 0.002$  при  $Q_i = 7$  и далее равна 0. Индекс относительной редкости  $Irr$  для локального сообщества вычисляли как сумму весов редкости, нормированную на число видов в сообществе.

Ссылки на публикации, где описан метод вычисления каждого индекса разнообразия, приведены в таблице, а их расчетные формулы – в документации на пакет EcolndR (Guisande C., 2017. Ecological indicators. R Package Version 1.0. <https://cran.r-project.org/web/packages/EcolndR>).

Анализ совокупности вычисленных индексов разнообразия и селекция наиболее информативной комбинации из них выполняли с использованием следующей процедуры (Guisande et al., 2017):

- индексы преобразовывались в единую шкалу от 0 до 1 и сканировались все возможные их комбинации по четыре (т. е. по одному индексу из групп редкости, гетерогенности, выравненности и филогенетической сложности);
- для каждой комбинации индексов рассчитывались полярные координаты  $X = \sum |z_j| \cos(\alpha_j)$  и  $Y = \sum |z_j| \sin(\alpha_j)$  каждого водотока, где  $z_j$  – стандартизированное значение индекса,  $j = 1, 2, 3, 4$ ,  $\alpha_j$  – угол, зависящий от  $z_j$ ;
- вычислялись площади выпуклой оболочки и средние евклидовы расстояния между реками в координатах  $X$ – $Y$ , в качестве наиболее информативного набора индексов принималась комбинация, доставляющая максимум этим значениям.

Вычисления проводили с использованием среды программирования R версии 3.6 и ее дополнительных пакетов *vegan*, *prabclus*, *Rarity* и *EcolndR*.

## Результаты

### Статистический и картографический анализ пространственного распределения таксономического состава гидробионтов

Для оценки статистической связи между пространственным расположением и видовым составом макрозообентоса сопоставлялись две матрицы  $132 \times 132$  дистанций между каждой парой рек: а) географических расстояний (км) и б) таксономических расстояний на основе меры Брея – Кёртиса. Ядерная оценка функции двумерной плотности распределения значений обеих матриц представлена на рис. 1: прямая линия регрессии очевидно свидетельствует о том, что при увеличении географических расстояний статистически значимо возрастает удаленность в многомерном пространстве между комплексами видов ( $p \sim 0$  для углового коэффициента линейной модели, коэффициент детерминации  $R^2 = 0.097$ ).

На основе коэффициента матричной корреляции Мантеля оценивали тесноту и статистическую значимость связи между двумя многомерными структурами данных. С помощью рандомизационной процедуры проверяли гипотезу  $H_0$  о том, что расстояния между объектами в географической и таксономической матрицах независимы друг от друга. В ходе циклического процес-

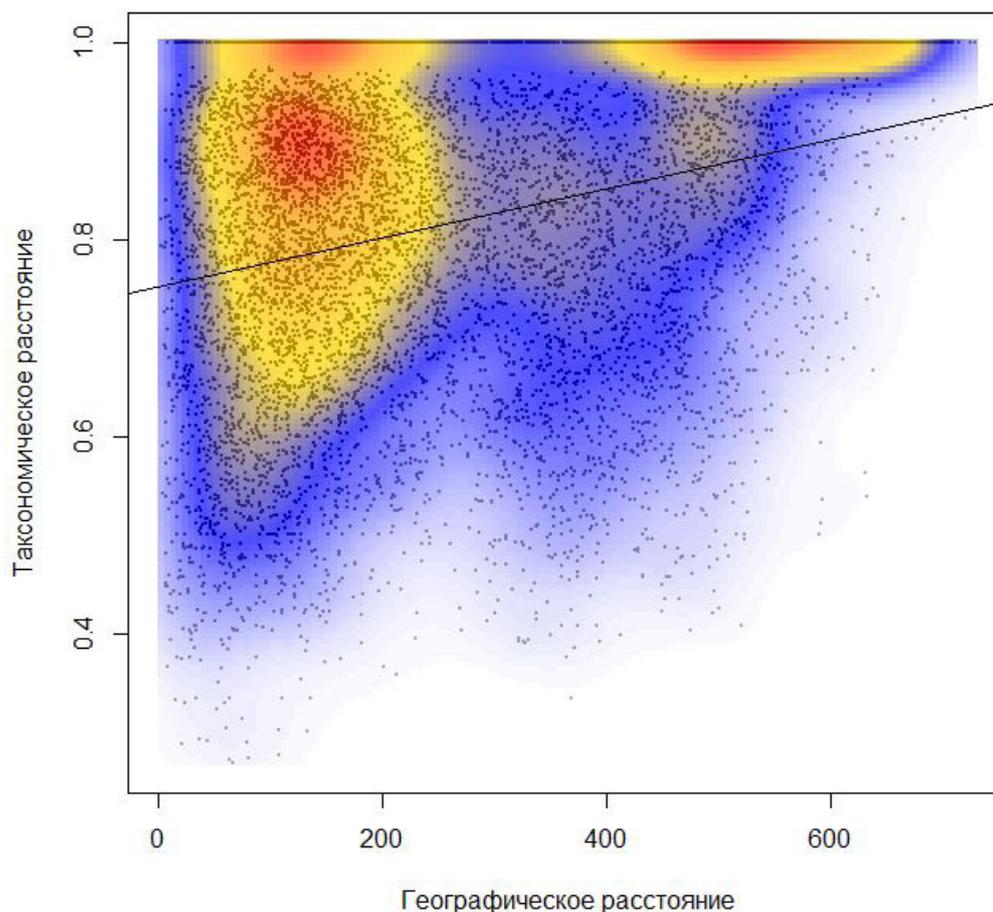


Рис. 1. График ядерной оценки двумерной плотности распределения таксономических и географических расстояний. Линия регрессии показывает увеличение различий в видовом составе рек с ростом удаленности между ними

Fig. 1. Graph of two-dimensional kernel density estimation of taxonomic and geographical distances. The regression line shows an increase in differences in the species composition of rivers with an increase in the distance between them

са из 999 повторностей значения исходных матриц случайным образом перемешивались, и рассчитывалось имитируемое распределение статистики Мантеля при справедливости нулевой гипотезы. Ни одно значение коэффициента Мантеля, полученное в процессе рандомизации, не превысило эмпирическую величину  $r = 0.284$ , т. е. с уровнем значимости  $p = 0.001$  можно утверждать, что корреляция между видовым составом и пространственным расположением биотопов статистически значима и не объясняется случайными причинами.

Статистический критерий  $p_{disj}$  (Hennig, Hausdorf, 2004), названный авторами вероятностью объединения (*probability of disjunction*), оценивает вероятность того, что объединяться в кластер будут объекты, пространственно достаточно удаленные друг от друга. Простейшая неограниченная (*unconstrained*) нулевая модель предполагала, что все биотопы рек одинаково

во пригодны или доступны для заселения всех видов независимо от того, в каких местообитаниях они были обнаружены; эта вероятность равна  $p_{disj} = 0.476$  (т. е. равновероятен исход, близки объекты друг от друга или далеки). Если включить в модель в качестве ограничений географические координаты, то эта вероятность падает до  $p_{disj} = 0.2$ , хотя и не достигает общепринятого порога статистической значимости.

Одной из основных задач биогеографии является выявление регионального тренда изменения видового разнообразия. Естественный подход заключается в попытке аппроксимации данных о числе выявленных видов  $S$  (рис. 2) простейшей моделью – плоскостью относительно географических координат  $X-Y$ .

Для оценки статистической значимости линейного пространственного тренда выполняли следующий пермутационный тест. Аппроксимировали зависимость среднего

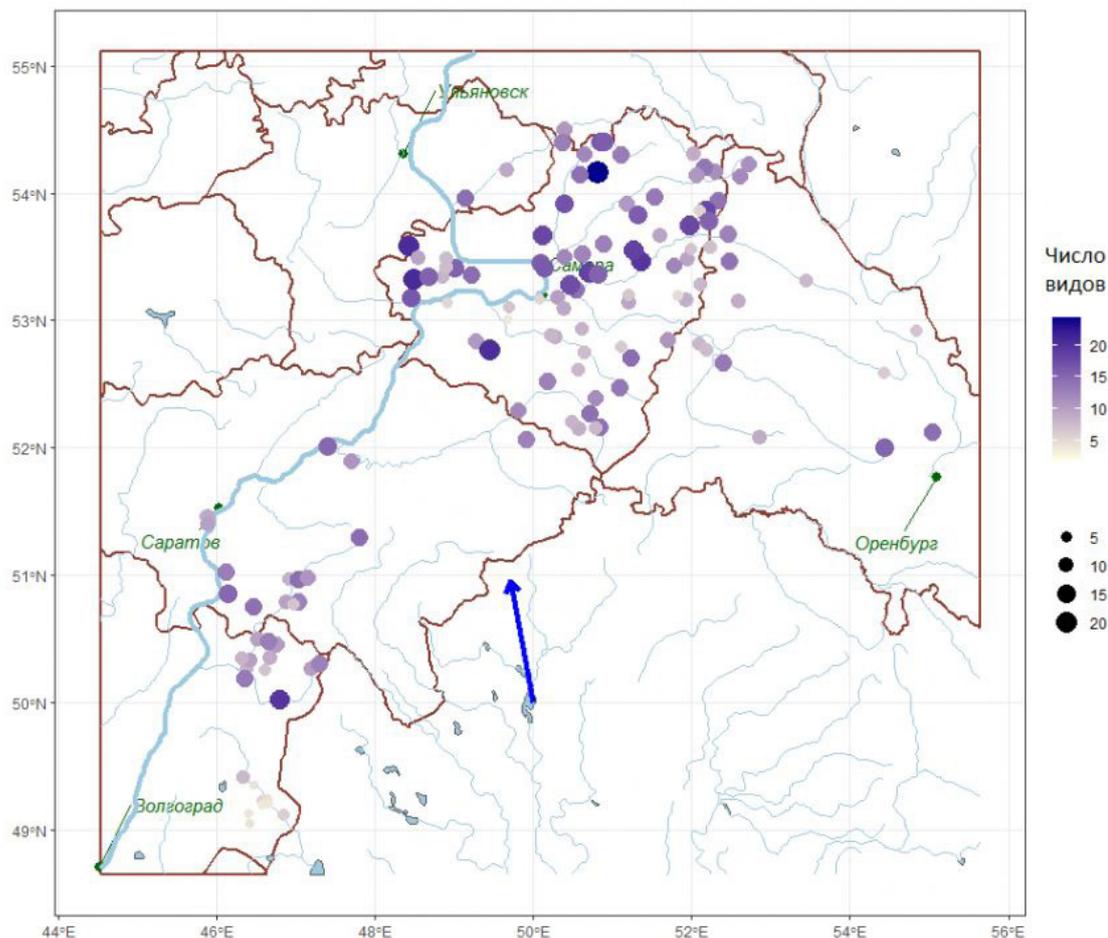


Рис. 2. Распределение видового богатства, оцениваемое по среднему числу видов в пробе (стрелкой показан градиент увеличения числа видов)

Fig. 2. Distribution of species richness estimated by the average number of species in the sample (the arrow shows the gradient of the increase in the number of species)

числа видов  $S$  от географических координат  $X$ – $Y$  плоскостью:

$$S = -53.5 - 0.52X + 1.73Y \quad (R^2 = 0.191, p = 0.00001).$$

Находили эмпирическое значение тангенса угла наклона  $k = 1.81$  построенной плоскости относительно  $XOY$ . Формировали 999 рандомизированных выборок, в каждой из которых значения числа видов  $S$  были случайным образом перемешаны относительно строк  $X$ – $Y$ , после чего строили статистическое распределение угла наклона плоскости тренда при справедливости нулевой гипотезы. Средняя величина тангенса угла между аппроксимирующими плоскостями, постро-

енными на имитируемых данных, и плоскостью  $XOY$  равна  $m = 0.39$  при стандартном отклонении  $s = 0.25$ . Поскольку ни одно из 1000 имитируемых значений не оказалось больше, чем эмпирическое значение, то нулевая гипотеза об отсутствии линейного пространственного тренда отклонена с достигнутым уровнем значимости  $p = 0.001$ .

Другим вариантом оценки регионального тренда является аппроксимация пространственного распределения анализируемого показателя нелинейными поверхностями. На рис. 3 показано направление градиента биоразнообразия, вычисляемого по индексу Шеннона, с использованием полиномиальной поверхности 2-й степени.

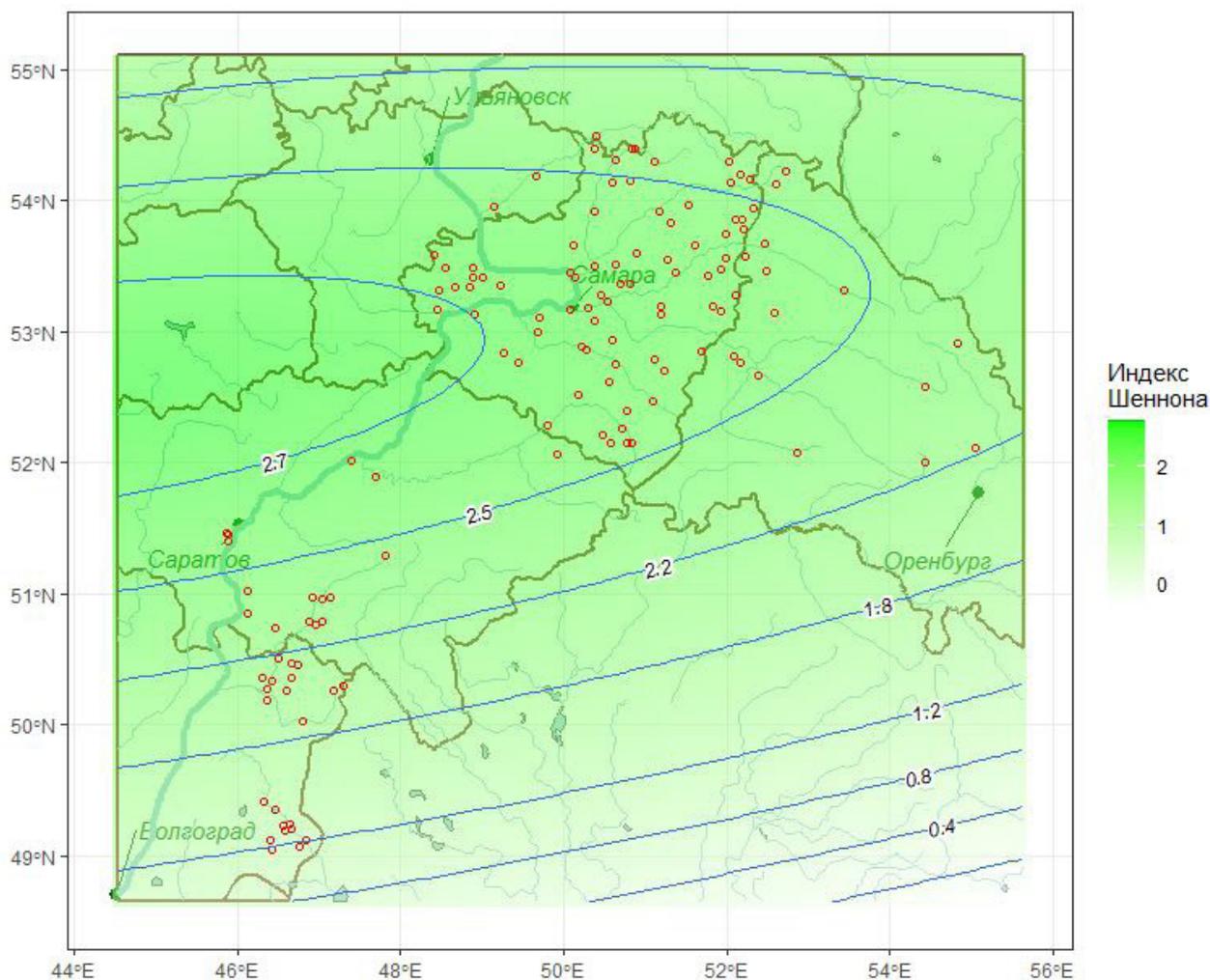


Рис. 3. Полиномиальный тренд пространственного распределения индекса Шеннона  
Fig. 3. Polynomial trend of the spatial distribution of the Shannon index

Представляет интерес рассмотреть пространственное распределение рек с различными значениями биотических показателей, используемых для оценки качества вод. Одним из них является, например, показатель ЕРТ, основанный на подсчете численности трех групп гидробионтов Ephemeroptera, Plecoptera и Tricoptera по отношению к общей численности бентоса (%). Считается, что снижение величины индекса отражает реакцию сообщества на загрязнение. Распределение значений индекса представлено на рис. 4 в виде мозаичной карты, на которой каждый участок показан гексагональными ячейками различного цвета.

Связь между видовой структурой и географическим местоположением локальных сообществ может проявляться как в форме изменчивости общего богатства видов, так и в появлении ассоциаций видов, не обязательно доминирующих, но характерных для групп пространственно близких рек. Для анализа выраженности этих зависимостей

выполняли построение серий тематических карт различных типов, таких как плотности статистического распределения (см. рис. 5 – изолинии вероятности обнаружения в пробе эврибионтного вида хирономид *Procladius ferrugineus*) или пространственной интерполяции значений анализируемого показателя Z. На рис. 6 показаны изолинии средней численности в пробе реофильных хирономид подсемейства Prodiamesinae, полученные с использованием ординарного кригинга (Шитиков, 2020).

#### Компоненты биоразнообразия и характер их изменения

Для каждой из 1401 гидробиологической пробы макрозообентоса вычислен 31 наиболее часто используемый индекс разнообразия (таблица), из которых 2 связаны с редкостью, 12 – с видовой гетерогенностью, 7 – с равномерностью обилия, 2 – с таксономическим разнообразием, 8 – с филогенетической дивергенцией. В дальнейшем последние две группы объединяются в одну.

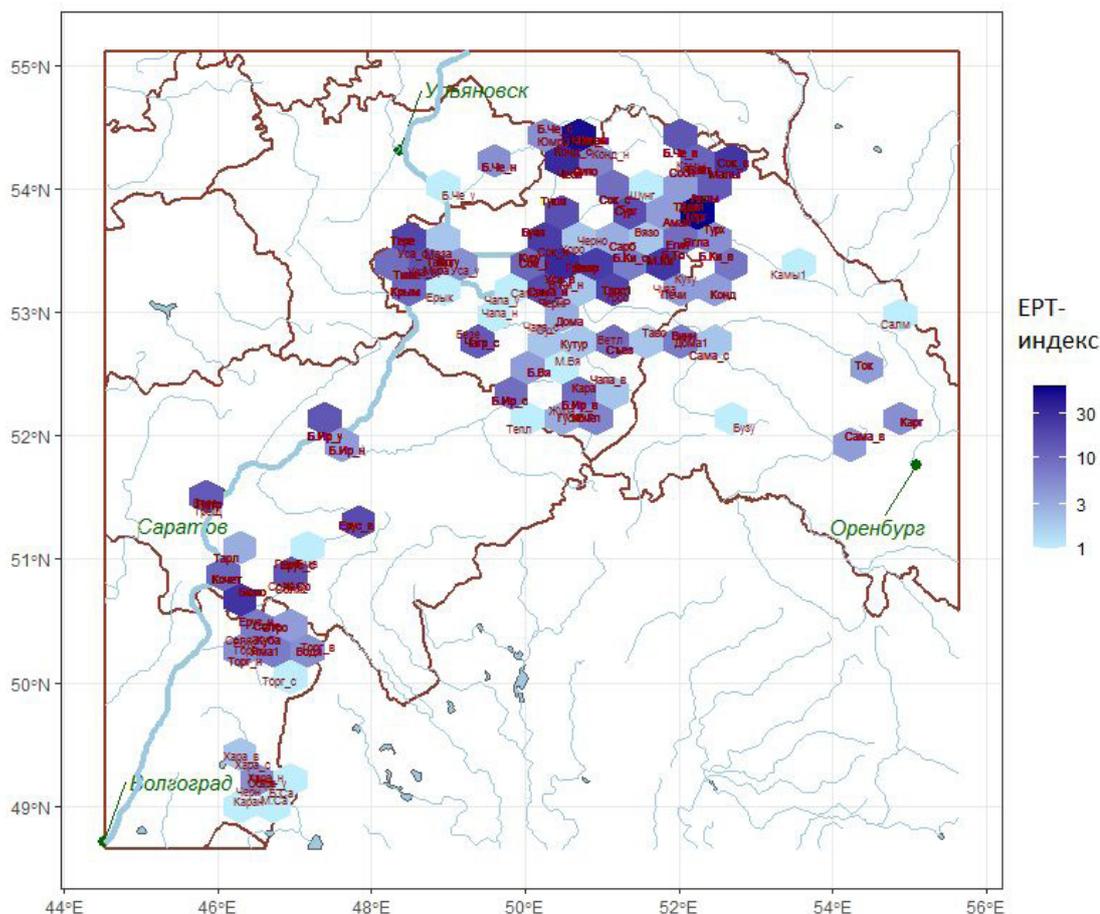


Рис. 4. Пространственное распределение значений индекса качества вод EPT (%)  
 Fig. 4. Spatial distribution of EPT water quality index (%)

Средние значения индексов биоразнообразия макрозообентоса в реках бассейнов Куйбышевского (Куйб.), Саратовского (Сар. лс – лесостепная и Сар. ст – степная зоны), Волгоградского (Волг.) водохранилищ и оз. Эльтон

С использованием всей совокупности индексов разнообразия рассчитана матрица нормированных евклидовых расстояний между каждой парой участков рек. Найдена статистически значимая корреляционная связь между этой матрицей и пространственным расположением биотопов (т. е. географическим расстоянием между участками) (см. рис. 1): коэффициент матричной корреляции Мантеля  $r = 0.175$ ,  $p = 0.001$ .

Для решения вопроса о том, какие показатели разнообразия наиболее информативны в условиях выполненного исследования, находили такой набор индексов, который приводил к наибольшей вариации рек, т. е. обладал максимальной разрешающей способностью. Была отобрана следующая оптимальная комбинация индексов:

- индекс относительной редкости Лероя (Rarity.Leroy) – см. выше;
- индекс разнообразия Менхиника (Menhinick):

$$D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

- индекс гомогенности распределения Макинтоша (McIntoshE):

$$D_{Mc} = \frac{N - \sqrt{\sum_{i=1}^S n_i^2}}{N - \sqrt{N}}$$

- квадратичная энтропия Рао (raoD):

$$Q = \sum_{i=1}^{S-1} \sum_{j=i+1}^{S-1} d_{ij} p_i p_j$$

где  $S$  и  $N$  – число видов и суммарная численность бентоса в пробе,  $n_i$  – численность  $i$ -го вида,  $p_i = n_i/N$ ,  $d_{ij}$  – расстояние на филогенетическом дереве между видами  $i$  и  $j$ .

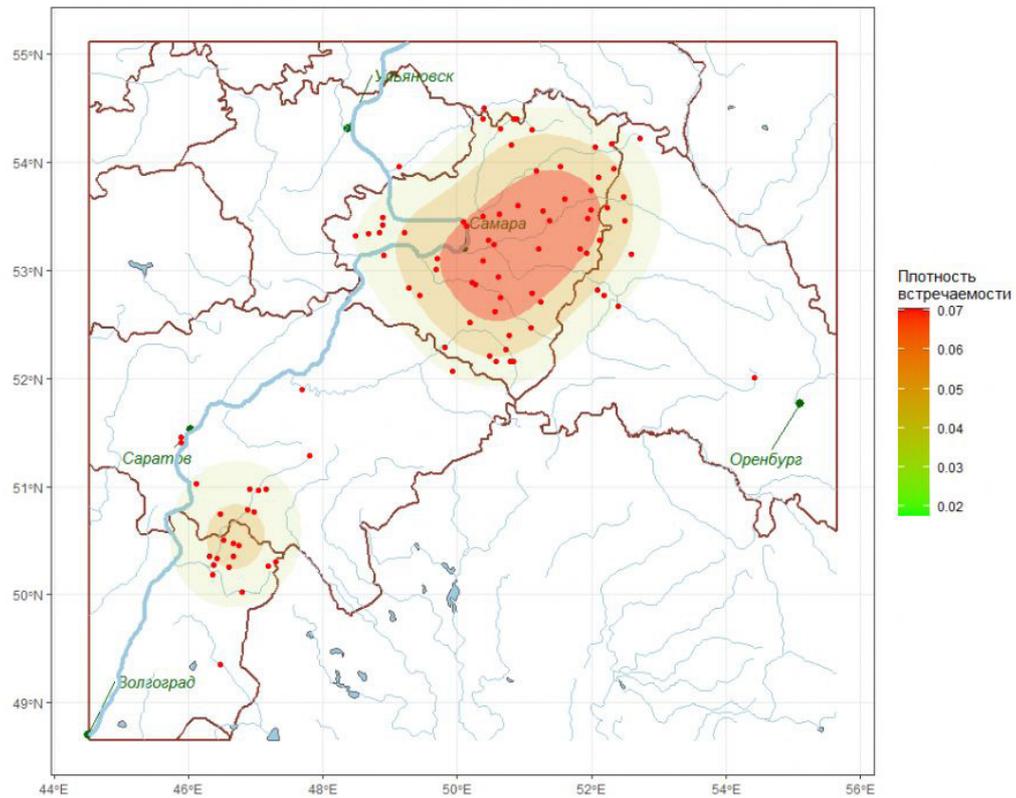


Рис. 5. Плотность распределения вероятности встречаемости *Procladius ferrugineus*  
Fig. 5. Density of probability distribution of occurrence of *Procladius ferrugineus*

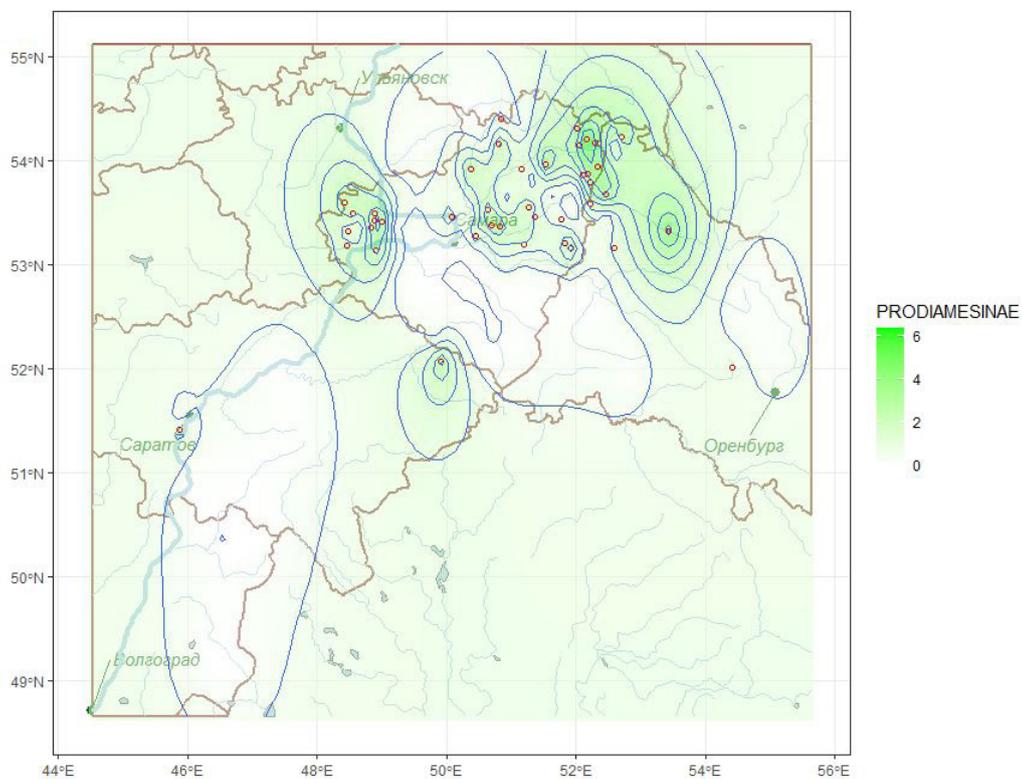


Рис. 6. Пространственное распределение численности хирономид подсемейства Prodiamesinae  
Fig. 6. Spatial distribution of the abundance of chironomids subfamily Prodiamesinae

Средние значения индексов биоразнообразия макрозообентоса в реках бассейнов Куйбышевского (Куйб.), Саратовского (Сар. лс – лесостепная и Сар. ст – степная зоны), Волгоградского (Волг.) водохранилищ и оз. Эльтон

Наименование и ссылка	Куйб.	Сар.лс	Сар.ст	Волг.	Эльтон	Общее
Рек / взятых проб	18 / 163	32 / 261	50 / 474	22 / 168	10 / 335	132 / 1401
Видов в пробе	11.60 ± 0.528	12.96 ± 0.411	9.523 ± 0.266	11.81 ± 0.518	4.782 ± 0.142	9.548 ± 0.170
Численность, экз/м <sup>2</sup>	4208 ± 1336	4986 ± 883.5	3947. ± 300.2	3779 ± 432.2	12341 ± 2368	6158. ± 626.5
<b>1. Индексы редкости видового состава</b>						
Редкости, Leroy et al. (2012)	0.032 ± 0.004	0.047 ± 0.003	0.017 ± 0.002	0.014 ± 0.002	0.006 ± 0.001	0.021 ± 0.001
Редкости, Guisande (2017)	0.976 ± 0.001	0.977 ± 0.001	0.961 ± 0.001	0.962 ± 0.001	0.899 ± 0.003	0.951 ± 0.001
<b>2. Индексы видовой гетерогенности</b>						
Шеннона, бит, Shannon (1948)	2.291 ± 0.069	2.474 ± 0.049	2.216 ± 0.038	2.442 ± 0.054	1.084 ± 0.037	2.029 ± 0.025
Симпсона, Simpson (1949)	0.670 ± 0.016	0.709 ± 0.010	0.674 ± 0.009	0.712 ± 0.012	0.389 ± 0.013	0.616 ± 0.006
1/S Симпсона, Williams (1964)	4.226 ± 0.183	4.570 ± 0.147	4.109 ± 0.096	4.495 ± 0.182	1.976 ± 0.052	3.745 ± 0.060
Бриллюэна, Brillouin (1956)	1.563 ± 0.047	1.686 ± 0.033	1.513 ± 0.026	1.673 ± 0.036	0.744 ± 0.026	1.386 ± 0.017
Маргалефа, Margalef (1958)	1.416 ± 0.066	1.583 ± 0.047	1.126 ± 0.031	1.404 ± 0.062	0.467 ± 0.017	1.120 ± 0.020
Реньи, Renyi (1961), α=1.5	1.401 ± 0.046	1.513 ± 0.033	1.380 ± 0.025	1.499 ± 0.038	0.642 ± 0.024	1.245 ± 0.016
Менхиника, Menhinick (1964)	0.306 ± 0.015	0.339 ± 0.012	0.252 ± 0.008	0.272 ± 0.014	0.104 ± 0.005	0.242 ± 0.005
Макинтоша, McIntosh (1967)	0.466 ± 0.013	0.497 ± 0.009	0.467 ± 0.007	0.494 ± 0.010	0.241 ± 0.008	0.422 ± 0.005
Обратный Бергера-Паркера, Berger and Parker (1970)	2.643 ± 0.095	2.773 ± 0.077	2.634 ± 0.051	2.810 ± 0.099	1.568 ± 0.031	2.427 ± 0.031
Хилла-Реньи, Hill (1973), α=1.5	4.782 ± 0.209	5.215 ± 0.167	4.581 ± 0.108	5.069 ± 0.203	2.116 ± 0.057	4.192 ± 0.068
Тсаллиса, Tsallis (1988), q = 2.5	3.889 ± 0.167	4.179 ± 0.134	3.811 ± 0.088	4.144 ± 0.169	1.891 ± 0.048	3.469 ± 0.054
Энтропия Тсаллиса, Patil and Taillie (1982)	0.509 ± 0.011	0.535 ± 0.007	0.514 ± 0.006	0.539 ± 0.008	0.314 ± 0.010	0.473 ± 0.004
<b>3. Индексы выравнивания обилия</b>						
Симпсона, Simpson (1949)	0.075 ± 0.003	0.068 ± 0.002	0.088 ± 0.002	0.075 ± 0.002	0.085 ± 0.003	0.080 ± 0.001
Пиелу, Pielou (1966)	0.697 ± 0.015	0.708 ± 0.011	0.731 ± 0.009	0.730 ± 0.013	0.498 ± 0.015	0.667 ± 0.006
Макинтоша, McIntosh (1967)	0.677 ± 0.017	0.695 ± 0.012	0.709 ± 0.010	0.709 ± 0.014	0.452 ± 0.015	0.641 ± 0.006
Хилла-Реньи, Hill (1973)	0.747 ± 0.009	0.727 ± 0.007	0.782 ± 0.005	0.737 ± 0.009	0.848 ± 0.005	0.778 ± 0.003
Хейпа, Heip (1974)	0.489 ± 0.018	0.485 ± 0.013	0.554 ± 0.010	0.522 ± 0.017	0.367 ± 0.014	0.485 ± 0.006
Камарго, Camargo (1992)	0.073 ± 0.004	0.076 ± 0.005	0.090 ± 0.003	0.110 ± 0.004	0.064 ± 0.001	0.082 ± 0.001
Евар Смита и Уилсона Smith and Wilson (1996), *10 <sup>3</sup>	0.843 ± 0.486	0.492 ± 0.103	0.729 ± 0.373	0.217 ± 0.077	0.18 ± 0.062	0.505 ± 0.14
<b>4. Таксономические индексы - Warwick and Clarke, (1995, 1998, 2001)</b>						
Разнообразия	40.03 ± 1.435	38.86 ± 1.077	39.29 ± 0.857	47.71 ± 1.055	19.84 ± 0.901	35.65 ± 0.524
Отчетливости (distinctness)	58.57 ± 1.720	53.08 ± 1.214	55.42 ± 1.057	67.53 ± 1.212	46.39 ± 1.295	54.64 ± 0.602
<b>5. Филогенетические индексы - Webb et al. (2008)</b>						
Разнообразие, Faith (1992)	266.7 ± 10.46	282.2 ± 8.455	223.2 ± 5.297	279.6 ± 10.96	130.8 ± 3.127	223.9 ± 3.432
Средняя парная дистанция	40.53 ± 1.377	38.54 ± 1.038	40.95 ± 0.818	48.17 ± 1.052	20.37 ± 0.863	36.56 ± 0.509
Средняя близость таксонов	32.07 ± 1.428	32.07 ± 0.755	31.84 ± 0.780	33.44 ± 1.309	36.04 ± 0.944	33.08 ± 0.440
Вариация видов	0.628 ± 0.012	0.549 ± 0.009	0.610 ± 0.007	0.640 ± 0.008	0.508 ± 0.009	0.581 ± 0.004
Богатство видов	7.452 ± 0.356	7.526 ± 0.288	6.205 ± 0.191	7.667 ± 0.372	2.664 ± 0.094	5.961 ± 0.118
Выравнивание видов	0.462 ± 0.015	0.429 ± 0.011	0.475 ± 0.008	0.540 ± 0.011	0.265 ± 0.010	0.424 ± 0.005
Кластеризация видов	0.361 ± 0.011	0.336 ± 0.005	0.352 ± 0.006	0.343 ± 0.007	0.387 ± 0.007	0.357 ± 0.003
Энтропия Рао, Rao (1982)	19.89 ± 0.714	18.97 ± 0.535	19.74 ± 0.438	24.08 ± 0.526	9.579 ± 0.439	17.70 ± 0.264

Примечание. В полной форме ссылки на публикации даны в статье (Guisande et al., 2017).

В качестве общего показателя разнообразия рассматривалось среднее значение этих четырех нормированных индексов. Его пространственное распределение на картосхеме региона оказалось во многом идентичным рис. 2–3, хотя имело более сглаженный характер. Выполненный дисперсионный анализ значений обобщенного индекса для разных бассейновых зон (см. таблицу) от-

клонил нулевую гипотезу о равенстве групповых средних с высоким уровнем значимости ( $F = 9, p = 0.00002$ ). На основании линейной модели можно сделать вывод, что совокупное биоразнообразие донных сообществ снижается в ряду водохранилищ:

Саратовское (лесостепь) > Куйбышевское > Саратовское степь > Волгоградское > оз. Эльтон.

Поскольку для отдельных сообществ могут быть высокие значения одних индексов и низкие других, то рекомендуется (Guisande et al., 2017) проводить анализ диаграммы в полярных координатах (рис. 7), с помощью

которой можно детально оценить различия между реками в терминах редкости, гетерогенности, равномерности и таксономического/филогенетического разнообразия.

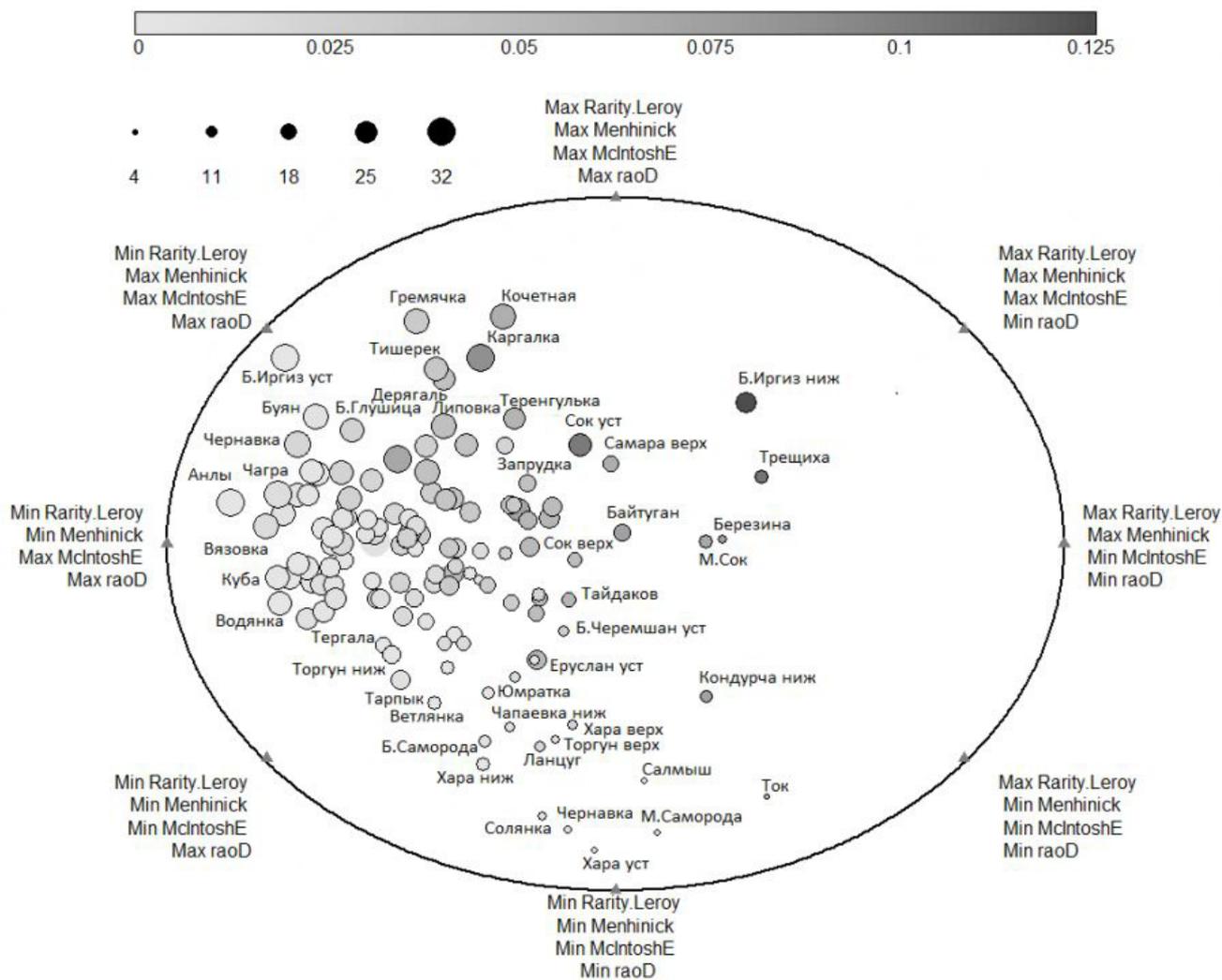


Рис. 7. Диаграмма, полученная в результате использования алгоритма DER на примере донных сообществ Волжского бассейна. Шкала размеров «пузырьков» связана с квадратичной энтропией Рао (raoD). Градиент серого цвета указывает на величину относительного показателя редкости (Rarity.Leroy) в каждой реке. Menhinick – индекс разнообразия Менхиника, McIntoshE – индекс гомогенности Макинтоша

Fig. 7. Diagram obtained as a result of using the DER algorithm on the example of bottom communities of the Volga basin. The bubble size scale is related to the Rao quadratic entropy (raoD). The gray gradient indicates the value of the relative rarity (Rarity. Leroy) in each river. Menhinick – Menhinik diversity index, McIntoshE – Macintosh homogeneity index

Ось ординат на рис. 7, проходящая через центр эллипса, совпадает с градиентом увеличения общего разнообразия по всем четырем индексам. Область справа от нее показывает реки, для которых в большей степени характерны редкие виды, а слева – реки с выраженной вариацией таксонов по филогенетическому дереву (последний показатель, оцениваемый по энтропии Рао,

является преобладающим для изученной экосистемы).

### Обсуждение

Природно-климатическая и ландшафтная неоднородность изучаемого региона обусловили пространственную автокорреляцию локальных донных сообществ, т. е. наблюдения в точках, расположенных близко друг к

другу, вероятнее всего, будут более сходными, чем на участках, расположенных далеко друг от друга. Этот ожидаемый эффект иллюстрируется на рис. 1, а его статистическая значимость подтверждена тестами матричной корреляции Мантеля и пространственного объединения Хеннига – Хаусдорфа.

Какие паттерны являются следствием наблюдаемой автоковариационной структуры – монотонная зависимость или в некотором смысле «хаотические» кластеры, осталось в полной мере неясным. Значимый линейный градиент изменения видового богатства на рис. 2 формально противоречит гипотезе о глобальном направлении широтного градиента разнообразия (Koleff, Gaston, 2001). Однако подобная обратная закономерность была неоднократно описана на примере исследований рыб (Macpherson, Duarte, 1994; Oberdorff et al., 1995), морских моллюсков (Rex et al., 1993; Roy et al., 1998), донных беспозвоночных озер (Bezmaternykh, Vdovina, 2020). Изменения в составе фауны изученного региона при продвижении от севера к югу вызваны, в частности, тем, что в связи с уменьшением уклонов равнинных рек и скорости их течения из состава донных сообществ постепенно выпадают стенобионтные и реофильные таксоны, как это было показано нами для видов подсемейства Prodiamesinae. Кроме того, для аридных регионов бассейна Нижней Волги характерны реки с высокой минерализацией (Golovatyuk et al., 2018), что также приводит к выпадению многих таксонов, функционально не адаптированных к экстремальным условиям среды обитания (Golovatyuk, Shitikov, 2016).

Однако предположение о линейном тренде может оказаться достаточно грубым приближением для интерпретации. В частности, полиномиальная поверхность пространственного распределения на рис. 3 выполняет более точную аппроксимацию видового разнообразия. К аналогичным выводам приводит линейная модель дисперсионного анализа при группировке по водохранилищам, согласно которой наибольшее биоразнообразие наблюдается в районе лесостепной зоны Саратовского водохранилища.

Для оценки качества вод по индексу ЕРТ наиболее характерна кластерная структура пространственного распределения, показанная мозаичной картой на рис. 4. Принимая во внимание реофильность индикаторных групп Ephemeroptera, Plecoptera и Trichoptera, отметим, что индекс ЕРТ не учитывает повышенный естественный уровень

минерализации некоторых обследованных рек аридной зоны, поэтому вариация его значений связана в первую очередь с гидрологическими особенностями рек разных географических широт, а не с антропогенным загрязнением.

Отображение распределения обилия различных групп или видов в сообществах макрозообентоса (рис. 5–6) не только позволяет сопоставить пространственное местоположение таксонов с их экологическими предпочтениями, но и создать предпосылки к геоинформационному подходу в оценке разнообразия на основе анализа многоканальных растровых изображений распределения групп гидробионтов.

За последние полвека было разработано большое число индексов видового разнообразия. Однако так и не было предложено единой методики, обобщающей это понятие и универсально применимой ко всем задачам и всем экологическим сообществам (Hurlbert, 1971; Magurran, 2004). Поскольку каждый из традиционных индексов связан с некоторым концептуально специфичным феноменом и подчеркивает только тот или иной компонент разнообразия (богатство, равномерность или таксономическое своеобразие), возникло понимание того, что для его измерения необходимо использовать составную статистическую меру (Stirling, Wilsey, 2001). Метод DER обеспечивает достаточно обоснованный подход к решению этой проблемы, а полученные с его помощью результаты хорошо интерпретируются визуально и позволяют расширить спектр содержательных выводов. В частности, специфицируется дополнительно понятие относительной редкости видов, связанное с возможностью оценки уровня эндемичности, видового состава локальных сообществ, специализацией местообитаний и т. д.

Апробация алгоритма DER на примере изученных донных сообществ позволила провести селекцию набора индексов, который приводил к наибольшей вариации объектов в пространстве полярных координат, т. е. обладал максимальной разрешающей способностью с точки зрения заданных критериев. В то же время сила статистической связи матрицы географических расстояний между участками (а) с матрицей дистанций на основе набора индексов разнообразия участков (б) оказалась существенно слабее, чем с матрицей таксономических расстояний по Брею – Кёртису (в): коэффициент корреляции Мантеля уменьшился с 0.284 до

0.175 для полного состава индесов и 0.201 для «информативной четверки». Вопрос о том, определяется ли этот эффект потерей информации при переходе от эмпирических численностей к расчетным индексам разнообразия или, наоборот, является результатом фильтрации «шума» в наблюдаемых данных, вероятно, послужит предметом дальнейших исследований.

## Заключение

1. Видовая структура и биоразнообразие донных сообществ малых и средних рек бассейна Средней и Нижней Волги статисти-

чески значимо коррелируют с их пространственным расположением. Анализ показал высокую вероятность гипотезы о том, что градиент возрастания видового богатства ориентирован с юга на север, а максимум разнообразия приходится на лесостепную часть бассейна Саратовского водохранилища.

2. Использование методов обобщения большой совокупности индексов видового разнообразия дает возможность расширить рамки содержательного анализа и сделать дополнительные выводы.

## Библиография

- Алимов А. Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2001. 147 с.
- Зинченко Т. Д. Эколого-фаунистическая характеристика хирономид (Diptera, Chironomidae) малых рек бассейна Средней и Нижней Волги (Атлас). Тольятти: Кассандра, 2011. 258 с.
- Курина Е. М., Селезнев Д. Г. Анализ закономерностей организации комплексов видов макрозообентоса понто-каспийского и понто-азовского происхождения в водохранилищах Средней и Нижней Волги // Экология. 2019. № 1. С. 62–71.
- Шитиков В. К. Интерполяция и визуализация пространственных данных. URL: <https://stok1946.blogspot.com/2020/09/blog-post.html> (дата обращения: 12.10.2020).
- Шитиков В. К., Зинченко Т. Д. Использование чисел Хилла для оценки видового и таксономического разнообразия в группах местообитаний // Принципы экологии. 2013а. № 3. С. 23–36.
- Шитиков В. К., Зинченко Т. Д. Изменение таксономического и функционального разнообразия сообществ макрозообентоса по продольному градиенту рек // Успехи современной биологии. 2013б. Т. 133, № 6. С. 566–577.
- Шитиков В. К., Зинченко Т. Д. Статистический анализ структурной изменчивости донных сообществ и проверка гипотезы речного континуума // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 5. С. 530–540.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения: В 2 кн. М.: Наука, 2005. Кн. 1. 281 с. Кн. 2. 337 с.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Костина Н. В. Методы синтетического картографирования территории (на примере эколого-информационной системы "REGION-VOLGABAS") // Количественные методы экологии и гидробиологии (Сборник научных трудов, посвященный памяти А. И. Баканова) / Отв. ред. чл.-корр. РАН Г. С. Розенберг. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 167–227.
- Bezmaternykh D. M., Vdovina O. N. Composition and structure of macrozoobenthos of lakes in different natural zones and subzones of Western Siberia // Limnology. 2020. Vol. 21. P. 3–13.
- Chao A., Chiu C.-H., Jost L. Phylogenetic diversity measures based on Hill numbers // Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B – Biol. Sci. 2010. № 365. P. 3599–3609.
- Faith D. P. Conservation evaluation and phylogenetic diversity // Biol. Conserv. 1992. Vol. 61. P. 1–10.
- Gaston K. J. Rarity. London: Chapman & Hall, UK, 1994. 205 p.
- Golovatyuk L. V., Shitikov V. K., Zinchenko T. D. Estimation of the Zonal Distribution of Species of Bottom Communities in Lowland Rivers of the Middle and Lower Volga Basin // Biology Bulletin. 2018. Vol. 45 (10). P. 1262–1268.
- Golovatyuk L. V., Shitikov V. K. Salinity tolerance of macrozoobenthic taxa in small rivers of the Lake Elton basin // Russ. J. Ecol. 2016. Vol. 47. P. 540–545.
- Guisande C., Heine J., García-Roselló E., González-Dacosta J., Vilas L., Perez-Schofield B. DER: An algorithm for comparing species diversity between assemblages // Ecological Indicators. 2017. Vol. 81. P. 41–46.
- Hausdorf B., Hennig C. Null model tests of clustering of species, negative co-occurrence patterns and nestedness in meta-communities // Oikos. 2007. Vol. 116. P. 818–828.
- Hennig C., Hausdorf B. Distance-based parametric bootstrap tests for clustering of species ranges // Comput. Stat. Data Anal. 2004. Vol. 45. P. 875–895.
- Holyoak M., Leibold M., Holt R. (eds.). Metacommunities: spatial dynamics and ecological communities. Univ. of Chicago Press, 2005. 520 p.
- Hurlbert S. H. The non-concept of species diversity: a critique and alternative parameters // Ecology. 1971. Vol. 52, № 4. P. 577–586.
- Kembel S. W., Cowan P. D., Helmus M. R., Cornwell W. K., Morlon H., Ackerly D. D., Blomberg S. P., Webb C. O. Picante: R tools for integrating phylogenies and ecology // Bioinformatics. 2010. Vol. 26, №

11. P. 1463–1464.

- Koleff P., Gaston K. J. Latitudinal gradients in diversity: real patterns and random models // *Ecography*. 2001. Vol. 24. P. 341–351.
- Leibold M. A., Holyoak M., Mouquet N., Amarasekare P., Chase J. M., Hoopes M. F., Holt R. D., Shurin J. B., Law R., Tilman D., Loreau M., Gonzalez A. The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology // *Ecology Letters*. 2004. Vol. 7. P. 601–613.
- Leroy B., Petillon J., Gallon R., Canard A., Ysnel F. Improving occurrence-based rarity metrics in conservation studies by including multiple rarity cut-off points // *Insect Conservation and Diversity*. 2012. Vol. 5. P. 159–168.
- Macpherson E., Duarte C. M. Patterns in species richness, size, and latitudinal range of East Atlantic fishes // *Ecography*. 1994. Vol. 17. P. 242–248.
- Magurran A. E. *Measuring Biological Diversity*. Oxford: Blackwell, 2004. 256 p. (Рус. изд.: Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 181 с.)
- Manni F., Guerard E., Heyer E. Geographic patterns of (genetic, morphologic, linguistic) variation: how barriers can be detected by using Monmonier's algorithm // *Human Biol.* 2004. Vol. 76, № 2. P. 173–190.
- Mantel N. The detection of disease clustering and a generalized regression approach // *Cancer Res.* 1967. Vol. 27. P. 209–220.
- Oberdorff T., Guégan J.-F., Hugueny B. Global scale patterns of fish species richness in rivers // *Ecography*. 1995. Vol. 18. P. 345–352.
- Ohio EPA. Addendum to biological criteria for the protection of aquatic life. Users manual for biological field assessment of Ohio surface waters // Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, Ohio, 1989. Vol. 2.
- Pielou E. C. *Ecological Diversity*. N.Y.: Wiley, 1975. 165 p.
- Ricotta C. Through the jungle of biological diversity // *Acta Biotheor.* 2005. Vol. 53. P. 29–38.
- Rex M. A., Stuart C. T., Hessler R. R., Allen J. A., Sanders H. L., Wilson G. D. F. Global-scale latitudinal patterns of species diversity in the deep-sea benthos // *Nature*. 1993. Vol. 365. P. 636–639.
- Roy K., Jablonski D., Valentine J. W., Rosenberg G. Marine latitudinal diversity gradients: tests of causal hypotheses // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1998. Vol. 95 (7). P. 3699–3702.
- Stirling G., Wilsey B. Empirical relationships between species richness, evenness, and proportional diversity // *Am. Natur.* 2001. Vol. 158, № 3. P. 286–299.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-04-03341 и в рамках государственного задания ФГБУН Институт экологии Волжского бассейна РАН, тема (проект) № AAAA-A17-117112040039-7 «Экологические закономерности структурно-функциональной организации, ресурсного потенциала и устойчивого функционирования экосистем Волжского бассейна» (направление 51 «Экология организмов и сообществ»).

# SPATIAL DISTRIBUTION OF DIVERSITY IN BENTHIC COMMUNITIES OF LOTIC SYSTEMS IN THE MIDDLE AND LOWER VOLGA REGION

**GOLOVATYUK**  
Larisa Vladimirovna

*PhD, Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, gollarisa@mail.ru*

**ZINCHENKO**  
Tatyana Dmitrievna

*D.Sc., Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, zinchenko.tdz@yandex.ru*

**SHITIKOV**  
Vladimir Kirillovich

*D.Sc., Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, stok1946@gmail.com*

## Keywords:

lowland rivers  
macrozoobenthos  
metacommunity  
spatial distribution  
diversity indices  
DER algorithm  
Null hypothesis testing

**Summary:** The spatial variability of species diversity and taxonomic structure of local benthic communities is analyzed based on the results of long-term hydrobiological surveys of benthic communities on 102 small and medium sized rivers in the Middle and Lower Volga basins. Null hypotheses about the absence of statistical dependence of the structural indicators on geographical coordinates in macrozoobenthos communities are tested. It is shown that the overall biodiversity is composed of four characteristic components: species richness, their rarity, uniformity and taxonomic complexity of communities. The most informative indices are selected and their comparative analysis is carried out using the DER algorithm. The spatial distribution of the calculated biotic parameters is illustrated on thematic ecological maps, which are the most important tools for analyzing processes in the meta-community at the species and cenotic levels.

**Reviewer:** N. V. Ilmast

**Received on:** 06 August 2020

**Published on:** 15 June 2021

## References

- Alimov A. F. Elements of the theory of functioning of water ecosystems. SPb.: Nauka, 2001. 147 p.
- Bezmaternykh D. M., Vdovina O. N. Composition and structure of macrozoobenthos of lakes in different natural zones and subzones of Western Siberia, Limnology. 2020. Vol. 21. P. 3–13.
- Chao A., Chiu C. H., Jost L. Phylogenetic diversity measures based on Hill numbers, Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B – Biol. Sci. 2010. No. 365. R. 3599–3609.
- Faith D. P. Conservation evaluation and phylogenetic diversity, Biol. Conserv. 1992. Vol. 61. P. 1–10.
- Gaston K. J. Rarity. London: Chapman & Hall, UK, 1994. 205 p.
- Golovatyuk L. V., Shitikov V. K. Salinity tolerance of macrozoobenthic taxa in small rivers of the Lake Elton basin, Russ. J. Ecol. 2016. Vol. 47. P. 540–545.
- Golovatyuk L. V., Shitikov V. K., Zinchenko T. D. Estimation of the Zonal Distribution of Species of Bottom Communities in Lowland Rivers of the Middle and Lower Volga Basin, Biology Bulletin. 2018. Vol. 45 (10). R. 1262–1268.
- Guisande C., Heine J., García-Roselló E., González-Dacosta J., Vilas L., Perez-Schofield B. DER: An algorithm for comparing species diversity between assemblages, Ecological Indicators. 2017. Vol. 81. P. 41–46.
- Hausdorf B., Hennig C. Null model tests of clustering of species, negative co-occurrence patterns and nestedness in meta-communities, Oikos. 2007. Vol. 116. P. 818–828.
- Hennig C., Hausdorf B. Distance-based parametric bootstrap tests for clustering of species ranges, Comput. Stat. Data Anal. 2004. Vol. 45. P. 875–895.
- Holyoak M., Leibold M., Holt R. (eds.). Metacommunities: spatial dynamics and ecological communities. Univ. of Chicago Press, 2005. 520 p.
- Hurlbert S. H. The non-concept of species diversity: a critique and alternative parameters, Ecology. 1971.

- Vol. 52, No. 4. P. 577–586.
- Kembel S. W., Cowan P. D., Helmus M. R., Cornwell W. K., Morlon H., Ackerly D. D., Blomberg S. P., Webb C. O. Picante: R tools for integrating phylogenies and ecology, *Bioinformatics*. 2010. Vol. 26, No. 11. R. 1463–1464.
- Koleff P., Gaston K. J. Latitudinal gradients in diversity: real patterns and random models, *Ecography*. 2001. Vol. 24. R. 341–351.
- Kurina E. M. Seleznev D. G. Analysis of regularities of organization of macrozoobenthos complexes of Ponto-Caspian and Ponto-Azov origin in reservoirs of the Middle and Lower Volga, *Ekologiya*. 2019. No. 1. P. 62–71.
- Leibold M. A., Holyoak M., Mouquet N., Amarasekare P., Chase J. M., Hoopes M. F., Holt R. D., Shurin J. B., Law R., Tilman D., Loreau M., Gonzalez A. The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology, *Ecology Letters*. 2004. Vol. 7. P. 601–613.
- Leroy B., Petillon J., Gallon R., Canard A., Ysnel F. Improving occurrence-based rarity metrics in conservation studies by including multiple rarity cut-off points, *Insect Conservation and Diversity*. 2012. Vol. 5. R. 159–168.
- Macpherson E., Duarte C. M. Patterns in species richness, size, and latitudinal range of East Atlantic fishes, *Ecography*. 1994. Vol. 17. P. 242–248.
- Magurran A. E. *Measuring Biological Diversity*. Oxford: Blackwell, 2004. 256 r. (Rup. izd.: Megarran E. *Ekologicheskoe raznoobrazie i ego izmerenie*. M.: Mir, 1992. 181 p.)
- Manni F., Guérard E., Heyer E. Geographic patterns of (genetic, morphologic, linguistic) variation: how barriers can be detected by using Monmonier's algorithm, *Human Biol.* 2004. Vol. 76, No. 2. R. 173–190.
- Mantel N. The detection of disease clustering and a generalized regression approach, *Cancer Res.* 1967. Vol. 27. P. 209–220.
- Oberdorff T., Guégan J. F., Huguény B. Global scale patterns of fish species richness in rivers, *Ecography*. 1995. Vol. 18. P. 345–352.
- Ohio EPA. Addendum to biological criteria for the protection of aquatic life. Users manual for biological field assessment of Ohio surface waters, Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, Ohio, 1989. Vol. 2.
- Pielou E. C. *Ecological Diversity*. N.Y.: Wiley, 1975. 165 p.
- Rex M. A., Stuart C. T., Hessler R. R., Allen J. A., Sanders H. L., Wilson G. D. F. Global-scale latitudinal patterns of species diversity in the deep-sea benthos, *Nature*. 1993. Vol. 365. P. 636–639.
- Ricotta C. Through the jungle of biological diversity, *Acta Biotheor.* 2005. Vol. 53. P. 29–38.
- Roy K., Jablonski D., Valentine J. W., Rosenberg G. Marine latitudinal diversity gradients: tests of causal hypotheses, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1998. Vol. 95 (7). P. 3699–3702.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Kostina N. V. Methods of synthetic mapping of a territory (using the example of the ecological information system "REGION-VOLGABAS"), *Kolichestvennye metody ekologii i gidrobiologii (Sbornik nauchnyh trudov, posvyaschenny pamyati A. I. Bakanova)*, Otv. red. chl, korr. RAN G. P. Rozenberg. Tol'yatti: SamNC RAN, 2005. P. 167–227.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. *Quantitative Hydroecology: methods, criteria, solutions: V 2 kn.* M.: Nauka, 2005. Kn. 1. 281 p. Kn. 2. 337 p.
- Shitikov V. K. Zinchenko T. D. Changes in the taxonomic and functional diversity of macrozoobenthos communities along the longitudinal gradient of rivers, *Uspehi sovremennoy biologii*. 2013b. T. 133, No. 6. P. 566–577.
- Shitikov V. K. Zinchenko T. D. Statistical analysis of structural variability of bottom communities and verification of the river continuum hypothesis, *Vodnye resursy*. 2014. T. 41, No. 5. P. 530–540.
- Shitikov V. K. Zinchenko T. D. The use of Hill numbers for the assessment of species and taxonomic diversity in habitat groups, *Principy ekologii*. 2013a. No. 3. P. 23–36.
- Shitikov V. K. Interpolyaciya i vizualizaciya prostranstvennyh dannyh. URL: <https://stok1946.blogspot.com/2020/09/blog-post.html> (data obrascheniya: 12.10.2020).
- Stirling G., Wilsey B. Empirical relationships between species richness, evenness, and proportional diversity, *Am. Natur.* 2001. Vol. 158, No. 3. P. 286–299.
- Zinchenko T. D. *Ecological and faunal characteristics of chironomids (Diptera, Chironomidae) of small rivers of the Middle and Lower Volga basin (Atlas)*. Tol'yatti: Kassandra, 2011. 258 p.



УДК 574.633

## ОЦЕНКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СООБЩЕСТВА ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕРА ЧИШМЯЛЕ ПОСЛЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭКОРЕАБИЛИТАЦИИ

ДЕРЕВЕНСКАЯ  
Ольга Юрьевна

кандидат биологических наук, Казанский (Приволжский) федеральный университет, [oderevenskaya@mail.ru](mailto:oderevenskaya@mail.ru)

ГАЛЛЯМОВА  
Резеда Радиковна

Казанский (Приволжский) федеральный университет, [rezeda1604@mail.ru](mailto:rezeda1604@mail.ru)

**Ключевые слова:**  
экореконструкция  
озеро  
зоопланктон  
урбоземосистемы  
биоиндикация

**Аннотация:** Озеро Чишмяле расположено в г. Казани, в районе с многоэтажной жилой застройкой. В 2010-х гг. озеро было полностью засыпано в связи с планируемой застройкой территории. Однако работы были прекращены, на участке наблюдалась аккумуляция поверхностных вод, что привело к повторному формированию малого водоема. В 2015 г. было принято решение восстановить озеро и создать сквер. Мероприятия по экореконструкции включали восстановление озера в прежних границах, создание искусственной подпитки водоема, укрепление берега с помощью габионов. Цель работы – оценить восстановление сообщества зоопланктона после осуществления мероприятий по экореконструкции. На протяжении вегетационных периодов 2016–2018 гг. измеряли физико-химические показатели воды, отбирали пробы зоопланктона. Полученные данные сравнивали с результатами исследований, выполненных до восстановления. Анализ космоснимков показал, что площадь вновь созданного водоема меньше ранее существовавшего на 46 %. Вода в озере имеет среднюю минерализацию, среда нейтральная. Выявлен дефицит растворенного кислорода в воде, развивающийся в июле – августе. В зоопланктоне за послереконструкционный период обнаружен 51 вид. Среднее число видов в пробе увеличилось с  $4.8 \pm 0.7$  в 2016 г. до  $7.9 \pm 0.8$  в 2018 г. Сравнение видового богатства до и после восстановления демонстрирует статистически значимое увеличение этого параметра. Количественные показатели зоопланктона в постреструктурный период были низкими, средняя за вегетационный период численность изменялась по годам от  $10.59 \pm 3.15$  до  $40.24 \pm 24.56$  тыс. экз./м<sup>3</sup>, а биомасса – от  $0.031 \pm 0.010$  до  $0.098 \pm 0.050$  г/м<sup>3</sup>. Величины индекса видового разнообразия Шеннона были невысокими. Значения индекса сапробности соответствовали β-мезосапробной зоне. Таким образом, несмотря на положительные моменты, связанные с восстановлением озера и благоустройством прибрежной зоны, сообщества зоопланктона все еще отличаются невысоким видовым богатством, низкими количественными показателями.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 04 июля 2020 года

Подписана к печати: 31 мая 2021 года

## Введение

Процесс урбанизации существенно преобразует окружающую природную среду. Городские районы характеризуются более высоким загрязнением почв и поверхностных вод, повышенным шумом и обычно имеют низкое общее качество среды обитания (Mansfield et al., 2014). Озера, расположенные на урбанизированных территориях, также испытывают сильное антропогенное воздействие, которое приводит к их загрязнению, эвтрофированию, а иногда и полному уничтожению (Мингазова и др., 2005).

Малые водные объекты, расположенные в черте городов, выполняют важные экосистемные функции: способствуют увеличению не только местного, но и регионального биоразнообразия, являются местом обитания редких, эндемичных видов (Stefanidis, Papastergiadou, 2010; Kuczyn'ska-Kippen, Joniak, 2016; Celewicz-Gořdyn, Kuczyńska-Kippen, 2017). Социальная значимость водных экосистем в черте городов связана с выполнением рекреационных функций, они создают мозаику мест обитания, могут являться элементами зеленого каркаса городов (Cereghino et al., 2008a; Cereghino et al., 2008b; Pinel-Alloul, Mimouni, 2013; Celewicz-Gořdyn, Kuczyńska-Kippen, 2017). В связи с этим становится актуальной проблема экореабилитации загрязненных или деградировавших водных объектов.

Примеры экореабилитации водоемов в нашей стране все еще остаются немногочисленными, нередко принимаются ошибочные решения, не позволяющие достигнуть желаемого результата, а процесс восстановления водных экосистем и их отдельных компонентов до сих пор остается слабо изученным. Поэтому исследование компонентов водных экосистем после проведенных мероприятий по экореабилитации является актуальным и позволяет выработать подходящую для данного случая стратегию управления. Одним из примеров экореабилитации является восстановление и благоустройство озера Чишмяле (г. Казань).

Хорошим индикатором экологических условий, сложившихся в водоеме, является сообщество зоопланктона. Эти организмы имеют короткие жизненные циклы и особенно быстро реагируют на изменения окружающей среды. По изменениям состава и структуры сообществ зоопланктона можно сделать вывод о направленности происходящих процессов (Derevenskaya, Urazaeva,

2018). Индексы, основанные на показателях структуры сообществ зоопланктона, позволяют оценить уровень загрязнения, трофический статус, а также прогнозировать развитие других компонентов и экосистемы в целом (Алимов и др., 2013; Ejsmont-Karabin, Karabin, 2013; Haberman, Haldna, 2014; Opochocka, Pasztaleniec, 2016; Derevenskaya et al., 2017).

Целью работы было оценить восстановление сообщества зоопланктона озера Чишмяле после осуществления мероприятий по экореабилитации.

## Материалы

Озеро Чишмяле (г. Казань) расположено в районе с многоэтажной жилой застройкой. До начала освоения данной территории на исследуемом участке находился природный водоем. В 2010-х гг. озеро было полностью засыпано с целью строительства на данном участке автозаправочной станции. Однако по требованию местных жителей работы были прекращены. На бывшем строительном участке наблюдалась аккумуляция поверхностных вод, что привело к повторному формированию малого водоема. В 2015 г. было принято решение восстановить озеро и создать сквер (Derevenskaya, Galieva, 2018).

Мероприятия по экореабилитации включали восстановление озера в прежних границах, искусственную подпитку водоема из «родника», стекающего в озеро каскадным ручьем и обеспечивающего пополнение озера водой в летнее время, укрепление берегов габионами. На прилегающей к озеру территории был создан сквер в виде террас разного уровня с использованием габионов (рис. 1). Работы по благоустройству территории были закончены к 30 августа 2015 г.

## Методы

Отбор проб зоопланктона проводился в три разных периода: 1) до начала восстановления (в августе 2007 г. и в мае 2015 г.); 2) непосредственно после завершения работ (28 сентября 2015 г.); 3) в течение трех последующих лет (с мая по сентябрь 2016–2018 гг. с периодичностью один раз в 10–14 дней). В эти же даты проводилось измерение физико-химических показателей воды.

Пробы отбирали с двух станций в литоральной зоне с поверхности, т. к. глубина озера небольшая и оно интенсивно перемешивается ветром. Количественные пробы зоопланктона отбирали путем процеживания 50 л воды через сеть Апштейна, фиксируя

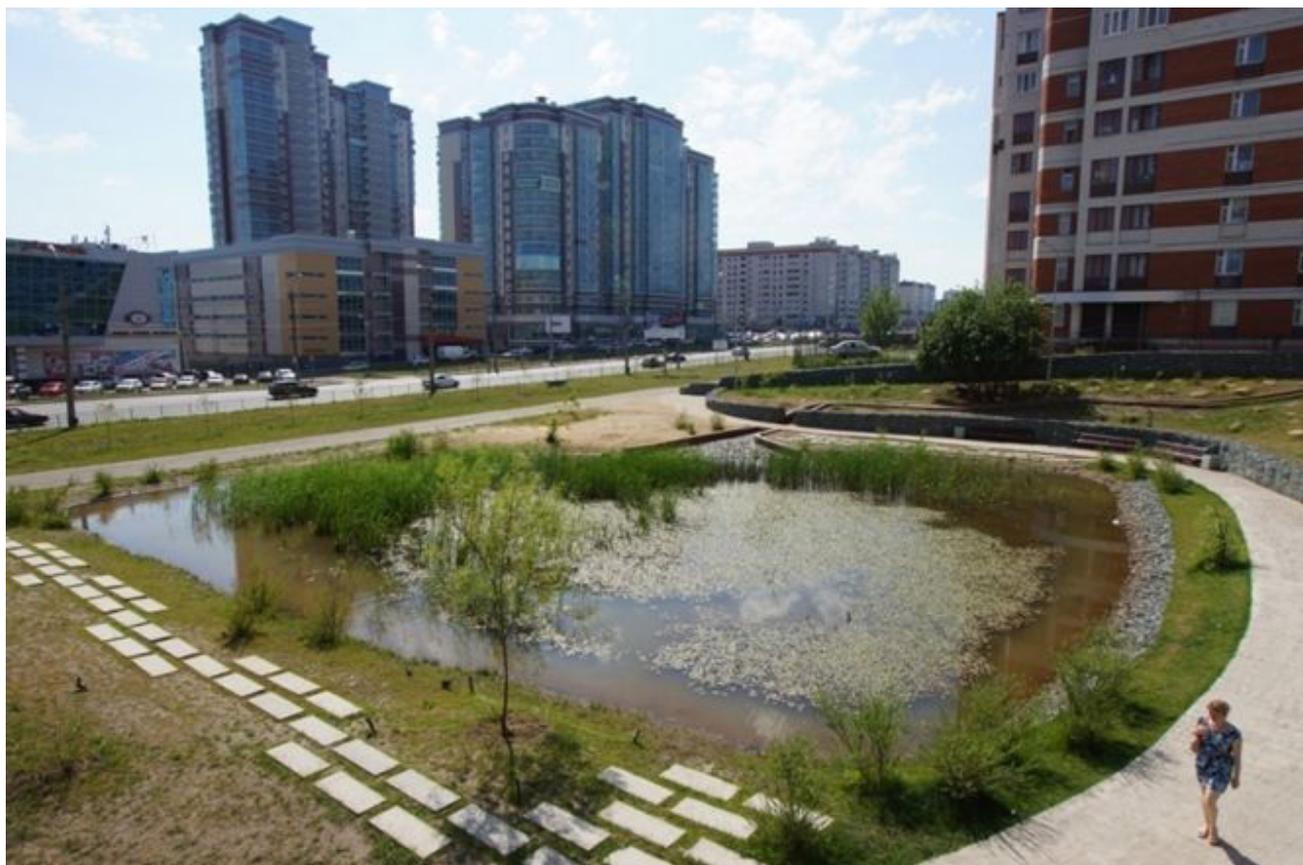


Рис. 1. Современный вид сквера с озером по ул. Чишмяле  
Fig. 1. The modern view of the park with a lake on Chishmyale street

ли 4 % формалином. Организмы определяли до вида и подсчитывали под микроскопом. Биомассу рассчитывали по степенным уравнениям, связывающим длину организмов с их массой (Методические..., 1982).

Видовое разнообразие зоопланктона оценивали по индексу Шеннона (H) (по численности и биомассе) (Shannon, Weaver, 1949). Оценку качества воды проводили по индексу сапробности Пантле и Букка (S) в модификации Сладечека (Sladeček, 1973).

Одновременно с отбором проб зоопланктона измеряли температуру воды и содержание кислорода оксиметром «Марк 302», электропроводность – кондуктометром Hanna, pH воды – портативным pH-метром Hanna. Оценка качества воды по физико-химическим показателям выполнена путем сравнения с ПДК (для рыбохозяйственных водоемов) и по величине среднего рангового показателя (РП), рассчитанного с использованием эколого-санитарной классификации качества поверхностных вод (Романенко и др., 1990).

Площадь озера в разные периоды его существования, а также его морфометрические характеристики измеряли в програм-

ме Google Earth.

Статистическая обработка данных включала расчет средних значений, ошибки средней, выполнена в MS Excel.

## Результаты

**Морфометрические показатели.** До начала освоения данной территории под строительство на исследуемом участке находился природный водоем. Пополнение озера осуществлялось за счет поступления поверхностного стока и атмосферных осадков, а также, вероятно, существовала и подпитка от родников. В 2009–2011 гг. вода была откачана, илы изъяты, растительность удалена, и озеро перестало существовать. После принятия решения о восстановлении озера Чишмяле котлован был незначительно углублен и заполнен водой. Водоупором являются уплотненные глины. Основной тип питания – искусственное, а также поверхностный сток и атмосферные осадки. Анализ космоснимков показал, что площадь вновь созданного водоема меньше ранее существовавшего на 46 % (табл. 1), изменилась форма озера, существенно сократилась длина. Максимальная глубина водоема составляет около 1.5 м в центральной части.

Таблица 1. Изменение морфометрических показателей озера Чижмяле (по данным космоснимков Google Earth)

Дата	Длина, м	Ширина, м	Длина береговой линии, м	Площадь, м <sup>2</sup>
20.05.07	51	36	164	1673
15.06.15	30	27	109	729
17.06.18	31	28	116	900

Озеро сильно зарастает высшими водными растениями (рогоз узколистный *Typha angustifolia* L., тростник обыкновенный *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., рдесты, элодея *Elodea canadensis* Michx.), площадь зарастания составляет около 60 %.

**Гидрохимические показатели.** Результаты исследований гидрохимических показателей, выполненных до проведения мероприятий по экореконструкции (август 2007 г.), показали низкое содержание растворенного в воде кислорода (4.2 мг/дм<sup>3</sup>), что соответствовало всего 52.8 % насыщения. Сероводород содержался в концентрации 0.005 мг/л, т. е. находился на уровне ПДК. Из анионов преобладали гидрокарбонаты, из катионов – кальций и натрий в сумме с калием. Сумма ионов составила 532 мг/дм<sup>3</sup>, что характеризовало минерализацию воды как повышенную, электропроводность была 490 мкСм/см. Значение жесткости достигало 3.7 мг. экв/л, вода «умеренно жесткая». Из соединений биогенных элементов аммоний существенно превышал ПДКр.х. (16 ПДК). Отмечалось повышенное содержание органических соединений, БПК<sub>5</sub> составляло 5.4 мг О/дм<sup>3</sup> (2.7 ПДК), перманганатная окисляемость – 26.7 мгО/л. В воде озера были обнаружены превышения ПДК тяжелых металлов: меди – в 8.3 раза, цинка – в 2.1 раза, марганца – в 4.1 раза. Оценка по эколого-санитарной классификации качества поверхностных вод показала, что вода в озере соответствует разряду «слабо загрязненная» (РП = 4.9). Таким образом, вода в озере до мероприятий по экореконструкции была относительно невысокого качества, с высоким содержанием органических веществ, соединений биогенных элементов, низким содержанием кислорода.

Аналогичные исследования, выполненные непосредственно после завершения мероприятий по экореконструкции (в сентябре 2015 г.), показали, что среда в озере нейтральная, электропроводность равна 440 мкСм/см (снизилась), содержание растворенного кислорода высокое. Из иссле-

дуемых показателей содержание аммония (почти в 3 раза) и фосфаты превышали допустимые концентрации, что вероятно, было связано со взмучиванием донных отложений в период проведения работ, а также с преобладанием процессов деструкции в осеннее время. Загрязняющих веществ выявлено не было. Средний ранговый показатель составлял 3.4, разряд качества воды – «достаточно чистая».

В 2016–2018 гг. (после экореконструкции) вода в оз. Чижмяле имела среднюю минерализацию, в 2017–2018 гг. электропроводность изменялась в нешироких пределах – от 490 до 580 мкСм/см (табл. 2). Величина рН изменялась от 7.2 до 7.5, что соответствует нейтральным водам. В 2018 г. в начале вегетационного периода содержание растворенного кислорода было в пределах нормы, но в июле – августе его содержание снизилось. Причиной может быть ускорение деструкционных процессов вследствие повышения температуры воды, вызвавшее усиленное потребление кислорода.

**Зоопланктон.** Исследованиями, выполненными до начала восстановления (в августе 2007 г.), в составе зоопланктона было выявлено всего 4 вида: *Rotaria sp.*, *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863), *Ceriodaphnia rotunda* Sars, 1862 и *Mesocyclops leuckartii* (Claus, 1857), а также личиночные стадии циклопов. Повторными исследованиями, выполненными 12 мая 2015 г., было выявлено 4 вида: *Euchlanis triquetra* Ehrenberg, 1838, *Moina brachiata* (Jurine, 1820), *Acanthocyclops vernalis* (Fischer, 1853), *Cyclops vicinus* Uljanin, 1875, а также ювенильные стадии циклопов. Таким образом, до мероприятий по восстановлению зоопланктон оз. Чижмяле был представлен малым числом видов. Один из них, для которого условия были благоприятными, массово развивался, что характерно для временных водоемов, луж. В сентябре 2015 г. зоопланктон состоял из 4 видов: *Alona rectangula* G. O. Sars, 1862, *Chydorus sphaericus* (O. F. Muller, 1785), *Macrotrix laticornis* (Jurine, 1820), *M. leuckartii*, а также

Таблица 2. Средние ( $M \pm m$ ), максимальные и минимальные значения (min-max) значения физико-химических показателей воды озера Чижмяле

Показатель		2016	2017	2018
Температура, С	$M \pm m$	21.1 ± 1.7	16.6 ± 1.8	19.7 ± 0.9
	min-max	14.0–26.6	9.5–25.4	13.6–23.9
Кислород, мг/л	$M \pm m$	–	8.9 ± 0.9	7.1 ± 1.3
	min-max	–	6.1–13.1	1.0–15.1
Электропроводность, мкСм/см	$M \pm m$	632 ± 69	540 ± 9	528 ± 11
	min-max	380–770	510–580	490–580
рН, ед.	$M \pm m$	–	–	7.3 ± 0.1
	min-max	–	–	7.2–7.5

Примечание. – нет данных.

ювенильных стадий циклопов.

За период, прошедший после проведения восстановительных мероприятий (2016–2018 гг.), в составе зоопланктона был выявлен 51 вид, в том числе коловраток 23 (45 %), ветвистоусых 20 (39 %), веслоногих 8 (16 %). По числу видов преобладали ветви-

стоусые ракообразные и коловратки. Число выявленных видов изменялось по годам от 30 до 32 (табл. 3), многие из них встречались в пробах в единичных экземплярах. Число видов, встреченных в пробе, в среднем составляло в 2016 г.  $4.8 \pm 0.7$ , в 2017 г. –  $6.5 \pm 0.6$ , в 2018 г. –  $7.9 \pm 0.8$ .

Таблица 3. Изменение числа видов ( $n$ ) в зоопланктоне оз. Чижмяле в 2016–2018 гг.

Таксономические группы	2016		2017		2018		2016–2018	
	$n$	%	$n$	%	$n$	%	$n$	%
Rotifera	12	40	12	40	13	41	23	45
Cladocera	15	50	14	47	14	44	20	39
Copepoda	3	10	4	13	5	16	8	16
Всего	30	100	30	100	32	100	51	100

Сравнение видового богатства за совпадающие месяцы отбора проб до и после восстановления демонстрирует статистически значимое увеличение этого параметра во временном аспекте (рис. 2).

Комплекс доминирующих видов был неодинаков в разные даты отбора, особенно в 2016 г., что, вероятно, было связано с заселением зоопланктоном реконструированного водоема. Наиболее часто по численности доминировали *Brachionus quadridentatus* Hermann, 1783, *Bosmina longirostris* (O. F. Muller, 1785), *C. sphaericus*, а по биомассе, кроме вышеперечисленных видов, еще *M. leuckarti* и *Diaphanosoma brachyurum* (Lieven, 1848).

До начала восстановления (август 2007 г.) численность зоопланктона была довольно высокой и составляла 390.0 тыс. экз./м<sup>3</sup>, биомасса – 1.5 г/м<sup>3</sup>, но 77 % от общей чис-

ленности составляли ювенильные стадии циклопов (Nauplii). По количественным показателям преобладали веслоногие рачки, индекс видового разнообразия был равен 1.21. В мае 2015 г. по численности и биомассе доминировали ветвистоусые рачки *Moina brachiata* (99 % от общей численности и биомассы). Массовым развитием этого крупного рачка объясняются высокие значения количественных показателей (122.66 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 4.1 г/м<sup>3</sup>) в этот период. Значения индекса видового разнообразия были низкими (0.05), что характеризует структуру как несбалансированную. В сентябре 2015 г. численность зоопланктона составляла 6.4 тыс. экз./м<sup>3</sup> при биомассе 0.019 г/м<sup>3</sup>, преобладали веслоногие рачки.

В 2016–2018 гг. количественные показатели зоопланктона на протяжении периода исследований были низкими (табл. 4), сред-

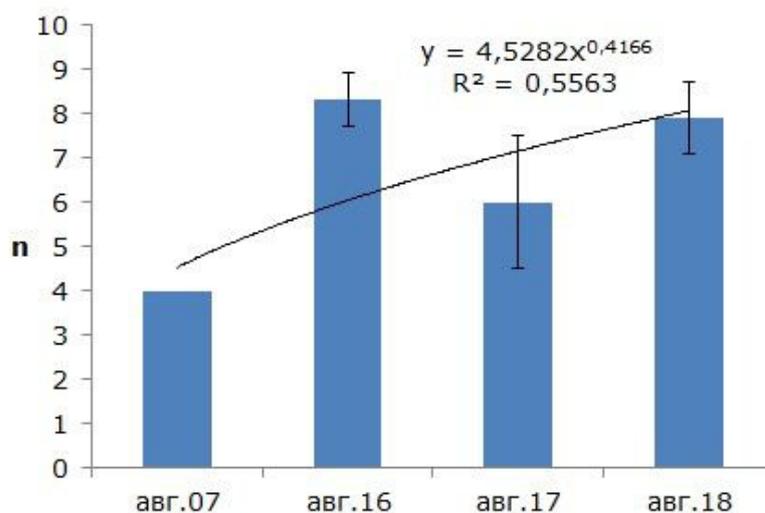


Рис. 2. Число видов таксономических групп зоопланктона в пробах из оз. Чишмяле в разные периоды исследований

Fig. 2. The number of species of taxonomic groups of zooplankton in samples from Lake Chishmale in different periods of research

няя за вегетационный период численность  $\pm 24.56$  тыс. экз./м<sup>3</sup>, а биомасса – от  $0.031 \pm 0.010$  до  $40.24 \pm 0.098 \pm 0.050$  г/м<sup>3</sup>.

Таблица 4. Средняя численность (тыс. экз./м<sup>3</sup>) и биомасса (г/м<sup>3</sup>) зоопланктона озера Чишмяле

Виды	2016	2017	2018
Численность			
Rotifera	$1.79 \pm 0.48$	$1.04 \pm 0.46$	$4.01 \pm 2.53$
Cladocera	$4.28 \pm 3.31$	$2.48 \pm 1.29$	$1.93 \pm 0.71$
Copepoda	$34.17 \pm 24.66$	$10.78 \pm 7.42$	$4.65 \pm 1.79$
Всего	$40.24 \pm 24.56$	$14.30 \pm 8.87$	$10.59 \pm 3.15$
Биомасса			
Rotifera	$0.005 \pm 0.003$	$0.001 \pm 0.001$	$0.004 \pm 0.002$
Cladocera	$0.036 \pm 0.029$	$0.016 \pm 0.008$	$0.009 \pm 0.002$
Copepoda	$0.058 \pm 0.043$	$0.021 \pm 0.009$	$0.019 \pm 0.009$
Всего	$0.098 \pm 0.050$	$0.039 \pm 0.017$	$0.031 \pm 0.010$

В 2016–2017 гг. наибольшие значения численности и биомассы зоопланктона наблюдалась в конце мая – начале июня, при этом наибольший вклад вносили веслоногие рачки (рис. 3–4). Наблюдаемые вариации численности и биомассы зоопланктона определялись циклическими изменениями условий окружающей среды и физико-химических параметров воды. На протяжении

вегетационного периода основу численности образовывали разные таксономические группы зоопланктона, но чаще – веслоногие ракообразные и их личиночные стадии.

Сравнение с ранее проведенными исследованиями (до экореабилитации) показало снижение количественных показателей зоопланктона (рис. 5).

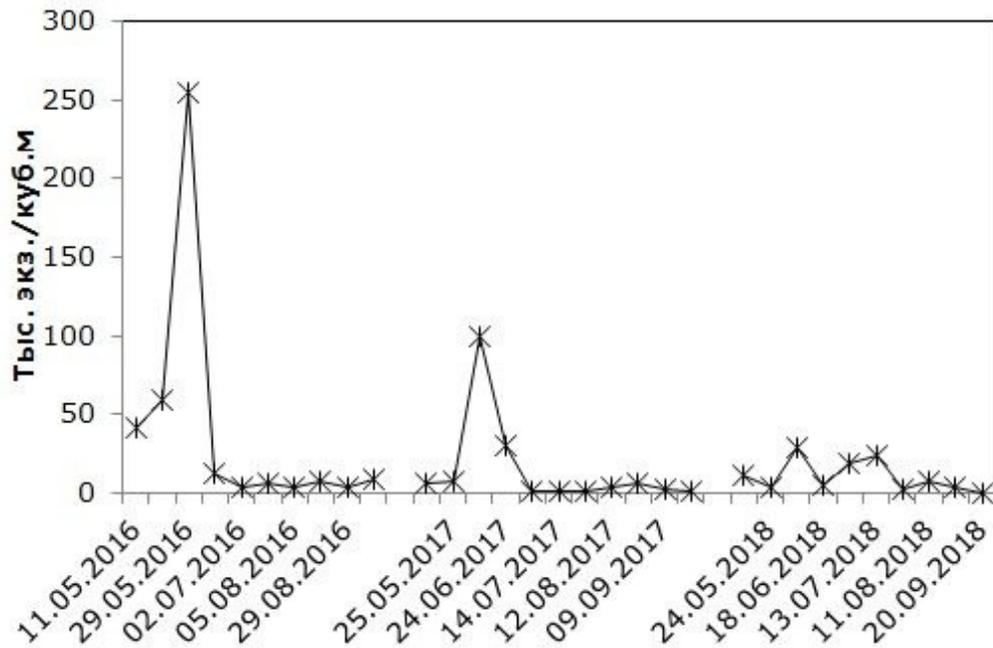


Рис. 3. Динамика численности ( $N$ , тыс. экз./ $m^3$ ) зоопланктона оз. Чишмяле  
Fig. 3. Dynamics of the abundance ( $N$ , thousand ind./ $m^3$ ) of zooplankton in Lake Chishmale

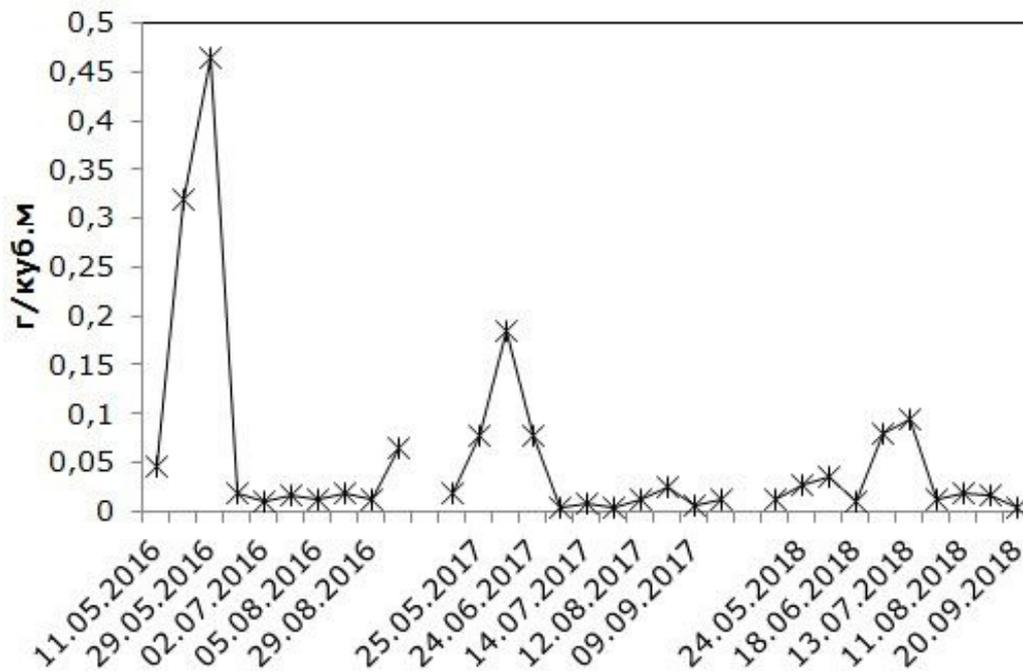


Рис. 4. Динамика биомассы ( $B$ , г/ $m^3$ ) зоопланктона оз. Чишмяле  
Fig. 4. Dynamics of biomass ( $B$ , g/ $m^3$ ) of zooplankton in Lake Chishmale

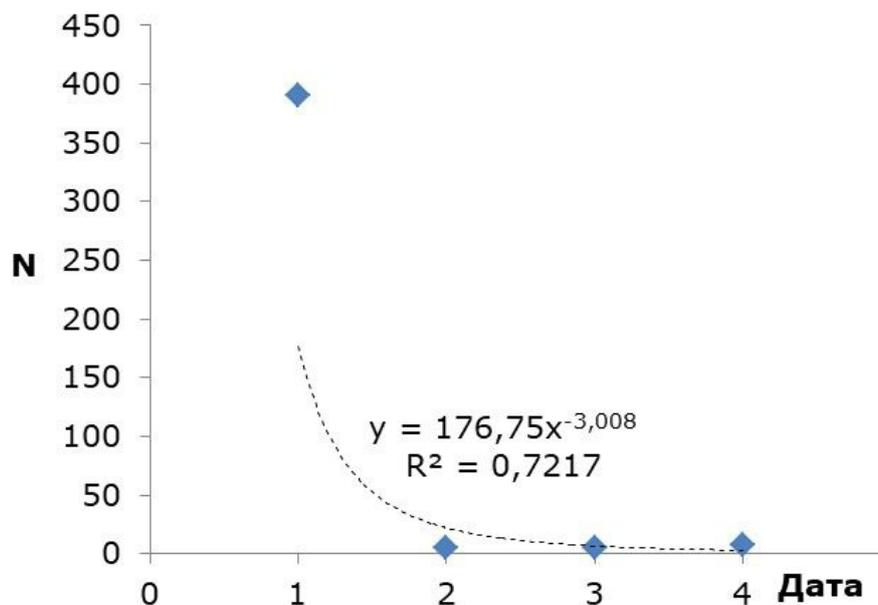


Рис. 5. Изменение численности ( $N$ , тыс. экз./м<sup>3</sup>) зоопланктона оз. Чижмяле до и после экореконструкции (1 – август 2007 г., 2 – август 2016 г., 3 – август 2017 г., 4 – август 2018 г.)

Fig. 5. Changes in the abundance ( $N$ , thousand ind./m<sup>3</sup>) of zooplankton in Lake Chishmale before and after ecorehabilitation (1 – August 2007, 2 – August 2016, 3 – August 2017, 4 – August 2018)

Значения индекса видового разнообразия Шеннона, рассчитанные как по численности ( $H_n$ ), так и по биомассе ( $H_b$ ), были относительно низкими (табл. 5). Это связано с невысоким видовым богатством зооплан-

ктона, преобладанием отдельных видов по численности или биомассе, хотя значения индексов выше аналогичных результатов, полученных до мероприятий по экореконструкции.

Таблица 5. Значения индекса сапробности ( $S$ ) и индекса Шеннона, рассчитанного по численности ( $H_n$ ) и биомассе ( $H_b$ ) зоопланктона

Индекс	2016	2017	2018
$S$	$1.76 \pm 0.04$	$1.65 \pm 0.03$	$1.74 \pm 0.06$
$H_n$	$1.67 \pm 0.16$	$1.95 \pm 0.12$	$1.55 \pm 0.18$
$H_b$	$1.52 \pm 0.16$	$1.52 \pm 0.13$	$1.84 \pm 0.18$

Индекс сапробности ( $S$ ) соответствовал  $\beta$ -мезосапробной зоне (умеренно загрязненная вода, III класс качества вод). Для сравнения: в августе 2007 г. значения этого индекса составляли 1.64, что сопоставимо с современными данными, в мае 2015 г. был значительно выше (2.17), а водоем относился к  $\beta$ -мезосапробной зоне, III класс качества вод.

### Обсуждение

Успех восстановления часто оценивают путем сравнения результатов, полученных до и после экореконструкции, но, к сожалению, они не всегда доступны в требуемом объеме. Однако, как показали ранее проведенные исследования, для оценки качества воды и восстановления экосистемы в целом

можно использовать сообщество зоопланктона (Paturej, Bowszys, 2005; Paturej, 2008). Многими исследователями доказано, что зоопланктон реагирует на изменение условий существования снижением или увеличением видового богатства, численности и биомассы, а также других показателей видовой структуры, что делает его хорошим индикатором (Андроникова, 1996; Anton-Pardo et al., 2013; Ejsmont-Karabin, Karabin, 2013; Haberman, Haldna, 2014 и др.).

Если восстановление качества воды можно спрогнозировать, основываясь на данных о преимущественных источниках питания водоема, то восстановление сообществ гидробионтов предсказать чрезвычайно сложно или невозможно. Особенно это актуально для изолированных озер, к которым

относится и озеро Чишмяле. Естественное расселение пресноводной фауны многоклеточных животных – это случайный процесс, зависящий от подходящего вектора (птицы, насекомые, млекопитающие), с помощью которого яйца или другие покоящиеся стадии пассивно переносятся с одного участка на другой (Anton-Pardo et al., 2013). Успешное создание новой популяции зависит также от размера поступающего генетического материала, а конечная судьба вселенца – от абиотических условий и биотических взаимодействий на новом участке (Kohout, Fott, 2006; Anton-Pardo et al., 2013).

Как показали наши исследования, озеро Чишмяле довольно успешно заселяется зоопланктоном. Число видов увеличилось, сообщество стало более выровненным, что отразило более высокие значения биотических индексов по сравнению с результатами ранее проведенных исследований. На озере гнездятся утки, встречаются чайки, что является важным вектором расселения водных беспозвоночных. В котловине озера Чишмяле могли остаться донные отложения, содержащие эфиппии или покоящиеся яйца, которые явились источником заселения озера зоопланктоном. Полученные результаты подтверждают ранее проведенные исследования восстановления небольшого пруда после мероприятий по увеличению его площади, глубины и высадки макрофитов. Сообщество зоопланктона также быстро отреагировало на проведенные мероприятия (через год после их завершения) увеличением видового богатства и разнообразия (Anton-Pardo et al., 2013).

Состав видов зоопланктона тесно связан с трофическим статусом водоема, снижение нагрузки биогенными элементами, поступающими в озеро в результате различного рода мероприятий, приводит к изменениям в структуре сообщества, снижению количества коловраток и появлению видов-индикаторов условий низкой трофности (Zhang et al., 2010; Dorak, Temel, 2015). В ходе наших исследований выявлено, что количественные показатели зоопланктона в оз. Чишмяле после осуществления мероприятий по экореабилитации существенно уменьшились, что указывает на снижение трофического статуса водоема. Однако в составе зоопланктона было выявлено много видов, являющихся индикаторами эвтрофных вод (коловратки родов *Brachionus*, *Trichocerca*, *Keratella*, ветвистоусые *B. longirostris*, *C. sphaericus*, *D. brachyurum*) (Paturej, 2008), некоторые из

них доминируют. Вероятно, это связано с высокой устойчивостью этих видов, высокой скоростью размножения, что позволяет быстро осваивать новые местообитания.

Снижение трофического статуса озер и следующее за ним изменение видового состава, численности и биомассы, появление индикаторов мезотрофных вод неоднократно наблюдались в восстанавливаемых озерах при снижении внешней и внутренней биогенной нагрузки. Показатели зоопланктона в этих исследованиях являлись хорошими индикаторами, позволяющими отследить направленность процесса (Paturej, Bowszys, 2005; Paturej, 2008).

Важную роль в восстановлении сообщества зоопланктона озера Чишмяле играют заросли макрофитов. Макрофиты создают среду обитания, богатую пищевыми ресурсами, увеличивают неоднородность пространства, предоставляют надежное укрытие от хищников. Таким образом, покрытая макрофитами литоральная зона увеличивает разнообразие зоопланктона и других беспозвоночных (Špoljar et al., 2018). Озеро Чишмяле отличается высокой степенью зарастания воздушно-водными (тростник обыкновенный, рогоз узколистный) и погруженными (рдесты, элодея) растениями. Вероятно, это обстоятельство благоприятно сказалось на увеличении разнообразия зоопланктона. Однако избыточная биомасса растений в процессе разложения может снизить содержание кислорода в воде, привести к его дефициту (Anton-Pardo et al., 2013). Этот процесс наблюдался и в оз. Чишмяле. Именно в конце июля – начале августа, когда вода максимально прогрета, нами отмечались самые низкие значения численности и биомассы зоопланктона. Температура воды также существенно влияет на пространственное распределение зоопланктона, на их рост и развитие. Постепенное повышение температуры создает оптимальные условия для их развития (Paturej, Bowszys, 2005). Более высокая плотность зоопланктона оз. Чишмяле отмечена в мае и июне, во время медленного повышения температуры воды, по сравнению с августом, когда температура воды была наиболее высокой.

## Заключение

За период исследований, выполненных после проведения мероприятий по экореабилитации, в озере был выявлен 51 вид зоопланктона, по годам их число изменялось от 30 до 32. По численности наиболее часто доминировали *B. quadridentatus*, *B. longirostris*,

*C. sphaericus*, а по биомассе, кроме вышеперечисленных видов, еще *M. leuckarti* и *D. Brachyurum*, однако в сообществе преобладали виды-индикаторы эвтрофных условий. Количественные показатели зоопланктона на протяжении периода исследований были низкими, средняя за вегетационный период численность изменялась по годам от  $10.59 \pm 3.15$  до  $40.24 \pm 24.56$  тыс. экз./м<sup>3</sup>, а биомасса – от  $0.031 \pm 0.010$  до  $0.098 \pm 0.050$  г/м<sup>3</sup>. Индекс сапробности соответствовал  $\beta$ -мезосапробной зоне (умеренно загрязненная вода, III класс качества вод). Значения индекса видового разнообразия Шеннона, рассчитанные как по численности, так и по биомассе, были относительно низкими.

Таким образом, несмотря на положительные моменты, связанные с восстановлением озера и благоустройством прибрежной зоны, сообщества зоопланктона все еще отличаются невысоким видовым богатством, низкими количественными показателями.

По результатам проведенных исследований в целях поддержания качества воды и сохранения эстетических свойств водоема можно рекомендовать следующие практические мероприятия: 1) при угрозе возникновения дефицита кислорода проводить аэрацию воды; 2) в конце вегетационного периода извлекать из воды и удалять с территории водосбора биомассу водных растений для предотвращения зарастания озера.

## Библиография

- Алимов А. Ф., Богатов В. В., Голубков С. М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 339 с.
- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л.: Зоологический ин-т АН СССР – ГосНИОРХ, 1982. 33 с.
- Мингазова Н. М., Деревенская О. Ю., Нурғалиева З. М., Палагушкина О. В., Павлова Л. Р. Озера г. Казани и проблемы малых озер // Экология города Казани. Казань: Фэн, 2005. С. 120–134.
- Романенко В. Д., Оксюк О. П., Жукинский В. Н., Стольберг Ф. В., Лаврик В. И. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты. Киев: Наукова думка, 1990. 256 с.
- Anton-Pardo M., Olmo C., Soria J. M., Armengol X. Effect of restoration on zooplankton community in a permanent interdunal pond // International Journal of Limnology. 2013. Vol. 49. P. 97–106.
- Celewicz-Goody S., Kuczyńska-Kippen N. Ecological value of macrophyte cover in creating habitat for microalgae (diatoms) and zooplankton (rotifers and crustaceans) in small field and forest water bodies // PLoS One. 2017. Vol. 12 (5). May 4. DOI: 10.1371/journal.pone.0177317
- Cereghino R., Biggs J., Oertli B., Declerck S. The ecology of European ponds: defining the characteristics of a neglected freshwater habitat // Hydrobiologia. 2008a. Vol. 597. P. 19–27.
- Cereghino R., Ruggiero A., Marty P., Angelibert S. Biodiversity and distribution patterns of freshwater invertebrates in farm ponds of a southwestern French agricultural landscape // Hydrobiologia. 2008b. Vol. 597. P. 43–51.
- Derevenskaya O., Galieva R. The assessment of restoration of zooplankton community of Lake Chishmyale (Kazan, Russia) after eco-rehabilitation // Drug Invention Today. 2018. Vol. 10. Special Issue 3. P. 3218–3222.
- Derevenskaya O., Unkovskaya E., Kosova M. Indices of zooplankton in assessing the ecological state of lake Ilinskoe (Russia) // Turkish Online Journal of Design Art and Communication. 2017. Vol. 7. Special Edition. P. 1787–1794.
- Derevenskaya O., Urazaeva N. Evaluation of the lake Lyabiazhie (Kazan, Russia) state by indicators of communities of hydrobionts // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 107. Issue 1. Art. 012129. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012129
- Dorak Z., Temel M. The zooplankton community and its relationship with environmental variables in a highly polluted system, Golden Horn, Turkey // Journal of Aquaculture Engineering and Fisheries Research. 2015. №1. P. 57–71. DOI: 10.3153/JAEFR15006
- Ejsmont-Karabin J., Karabin A. The suitability of zooplankton as lake ecosystem indicators: crustacean trophic state index // Polish Journal of Ecology (Pol. J. Ecol.). 2013. Vol. 61. № 3. P. 561–573.
- Haberman J., Haldna M. Indices of zooplankton community as valuable tools in assessing the trophic state and water quality of eutrophic lakes: long term study of Lake Vörtsjärv // Limnol. 2014. Vol. 73. №2. P. 263–273. DOI: 10.4081/jlimnol.2014.828J
- Kohout L., Fott J. Restoration of zooplankton in a small acidified mountain lake (Plešné Lake, Bohemian Forest) by reintroduction of key species // Biologia, Bratislava. 2006. Vol. 61. P. 477–483. DOI: 10.2478/s11756-007-0065-9

- Kuczyn´ska-Kippen N., Joniak T. Zooplankton diversity and macrophyte biometry in shallow water bodies of various trophic state // *Hydrobiologia*. 2016. Vol. 774. P. 39–51. DOI: 10.1007/s10750-015-2595-4
- Mansfield R., Williams A., Hendry K., White K. Drivers of change in a redeveloped urban lake: long term trends in a simplified system // *Fundam. Appl. Limnol.* 2014. Vol. 185/1. P. 91–105.
- Opochocka A., Pasztaleniec A. Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions // *Monit. Assess.* 2016. Vol. 188. P. 622. DOI: 10.1007/s10661-016-5634-3
- Paturej E. Assessment of the trophic state of a restored lake based on zooplankton community structure and zooplankton-related indices // *Pol. J. Natur. Sc.* 2008. Vol. 23. № 2. P. 440–449. DOI 10.2478/v10020-008-0034-y
- Paturej E., Bowszys M. Changes in the zooplankton of the restored lake Długie // *Polish Journal of Natural Sciences*. 2005. Vol. 19, № 2. P. 321–334.
- Pinel-Alloul B., Mimouni E. Are cladoceran diversity and community structure linked to spatial heterogeneity in urban landscapes and pond environments? // *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 715. P. 195–212.
- Shannon C. E., Weaver W. *The mathematical theory of communication*. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.
- Sladeček V. System of water quality from biological point of view // *Egetnisse der Limnologie*. 1973. Vol. 7. 218 p.
- Špoljar M., Dražina T., Kuczyńska-Kippen N., Zhang C., Ternjej I., Kovačević G., Lajtner J., Fressl J. Zooplankton traits in the water quality assessment and restoration of shallow lakes // 1st international conference "The Holistic Approach to Environment". September 13th–14th. Sisak, 2018. P. 1–7.
- Stefanidis K., Papastergiadou E. Influence of hydrophyte abundance on the spatial distribution of zooplankton in selected lakes in Greece // *Hydrobiologia*. 2010. Vol. 656. P. 55–65. DOI: 10.1007/s10750-010-0435-0
- Zhang S., Zhou Q., Xu D., Lin J., Cheng S., Wu Z. Effects of sediment dredging on water quality and zooplankton community structure in a shallow of eutrophic lake // *J. Environ. Sci.* 2010. Vol. 22. № 2. P. 218–224.

# ASSESSMENT OF THE RESTORATION OF THE ZOOPLANKTON COMMUNITY IN LAKE CHISHMYALE AFTER ECOREHABILITATION ACTIVITIES

**DEREVENSKAYA**  
Olga Yuryevna

*PhD, Kazan Federal University, oderevenskaya@mail.ru*

**GALLYAMOVA**  
Rezeda Radikovna

*Kazan Federal University, rezeda1604@mail.ru*

## Keywords:

ecorehabilitation  
lake  
zooplankton  
urban ecosystems  
bioindication

**Summary:** Lake Chishmyale is located in Kazan (Russia), in an area with multi-storey residential development. In the 2010s, the lake was completely filled up due to the planned development of this area. However, the work was stopped, because there was an accumulation of surface water on the site, which led to the re-formation of a small reservoir. In 2015, it was decided to restore the lake and create a public garden. Eco-rehabilitation measures included the restoration of the lake to its former boundaries, artificial recharge of the reservoir, and shore strengthening with gabions. The aim of this work is to assess the recovery of the zooplankton community following the implementation of eco-rehabilitation activities. During the growing seasons of 2016–2018, the physicochemical indicators of water were measured, samples of zooplankton were taken. The data obtained were compared with the results of studies performed before recovery. The analysis of satellite images showed that the area of the newly created reservoir is less than the previously existing one by 46 %. The water in the lake has an average mineralization, the environment is neutral. A deficiency of dissolved oxygen in water, developing in July–August, was revealed. During the post-rehabilitation period, 51 species were found in zooplankton. The average number of species in the sample increased from  $4.8 \pm 0.7$  in 2016 to  $7.9 \pm 0.8$  in 2018. Comparison of the species richness on the same dates before and after recovery demonstrates a statistically significant increase in this parameter. The quantitative indicators of zooplankton in the post-rehabilitation period were low, the average abundance over the growing season varied from  $10.59 \pm 3.15$  to  $40.24 \pm 24.56$  thousand ind./m<sup>3</sup>, and the biomass – from  $0.031 \pm 0.010$  to  $0.098 \pm 0.050$  g/m<sup>3</sup>. The values of the Shannon Species Diversity Index were not high. The saprobic index values corresponded to the  $\beta$ -mesosaprobic zone. Thus, despite the positive aspects associated with the restoration of the lake and the improvement of the coastal zone, the zooplankton communities are still characterized by low species richness and low quantitative indicators.

**Received on:** 04 June 2020

**Published on:** 31 May 2021

## References

- Špoljar M., Dražina T., Kuczyńska-Kippen N., Zhang C., Ternjej I., Kovačević G., Lajtner J., Fressl J. Zooplankton traits in the water quality assessment and restoration of shallow lakes, 1st international conference «The Holistic Approach to Environment». September 13th–14th. Sisak, 2018. P. 1–7.
- Alimov A. F. Bogatov V. V. Golubkov S. M. Production hydrobiology. SPb.: Nauka, 2013. 339 p.
- Andronikova I. N. Structural and functional organization of zooplankton of lake ecosystems of different trophic types. SPb.: Nauka, 1996. 189 p.
- Anton-Pardo M., Olmo C., Soria J. M., Armengol X. Effect of restoration on zooplankton community in a permanent interdunal pond, International Journal of Limnology. 2013. Vol. 49. P. 97–106.
- Celewicz-Goødyn S., Kuczyńska-Kippen N. Ecological value of macrophyte cover in creating habitat for microalgae (diatoms) and zooplankton (rotifers and crustaceans) in small field and forest water bodies, PLoS One. 2017. Vol. 12 (5). May 4. DOI: 10.1371/journal.pone.0177317
- Cereghino R., Biggs J., Oertli B., Declerck S. The ecology of European ponds: defining the characteristics of a neglected freshwater habitat, Hydrobiologia. 2008a. Vol. 597. P. 19–27.
- Cereghino R., Ruggiero A., Marty P., Angelibert S. Biodiversity and distribution patterns of freshwater

- invertebrates in farm ponds of a southwestern French agricultural landscape, *Hydrobiologia*. 2008b. Vol. 597. P. 43–51.
- Derevenskaya O., Galieva R. The assessment of restoration of zooplankton community of Lake Chishmyale (Kazan, Russia) after eco-rehabilitation, *Drug Invention Today*. 2018. Vol. 10. Special Issue 3. P. 3218–3222.
- Derevenskaya O., Unkovskaya E., Kosova M. Indices of zooplankton in assessing the ecological state of lake Ilinskoe (Russia), *Turkish Online Journal of Design Art and Communication*. 2017. Vol. 7. Special Edition. P. 1787–1794.
- Derevenskaya O., Urazaeva N. Evaluation of the lake Lyabiazhie (Kazan, Russia) state by indicators of communities of hydrobionts, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 107. Issue 1. Art. 012129. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012129
- Dorak Z., Temel M. The zooplankton community and its relationship with environmental variables in a highly polluted system, Golden Horn, Turkey, *Journal of Aquaculture Engineering and Fisheries Research*. 2015. No.1. P. 57–71. DOI: 10.3153/JAEFR15006
- Ejsmont-Karabin J., Karabin A. The suitability of zooplankton as lake ecosystem indicators: crustacean trophic state index, *Polish Journal of Ecology (Pol. J. Ecol.)*. 2013. Vol. 61. No. 3. P. 561–573.
- Guidelines on the collection and processing of materials in hydrobiological studies in freshwater bodies. Zooplankton and its products. L.: Zoologicheskii in-t AN SSSR – GosNIORH, 1982. 33 p.
- Haberman J., Haldna M. Indices of zooplankton community as valuable tools in assessing the trophic state and water quality of eutrophic lakes: long term study of Lake Vörtsjärv, *Limnol*. 2014. Vol. 73. No.2. P. 263–273. DOI: 10.4081/jlimnol.2014.828J
- Kohout L., Fott J. Restoration of zooplankton in a small acidified mountain lake (Plešné Lake, Bohemian Forest) by reintroduction of key species, *Biologia, Bratislava*. 2006. Vol. 61. P. 477–483. DOI: 10.2478/s11756-007-0065-9
- Kuczyn'ska-Kippen N., Joniak T. Zooplankton diversity and macrophyte biometry in shallow water bodies of various trophic state, *Hydrobiologia*. 2016. Vol. 774. P. 39–51. DOI: 10.1007/s10750-015-2595-4
- Mansfield R., Williams A., Hendry K., White K. Drivers of change in a redeveloped urban lake: long term trends in a simplified system, *Fundam. Appl. Limnol*. 2014. Vol. 185/1. R. 91–105.
- Mingazova N. M. Derevenskaya O. Yu. Nurgalieva Z. M. Palagushkina O. V. Pavlova L. R. Lakes of Kazan and problems of small lakes, *Ekologiya goroda Kazani. Kazan': Fen*, 2005. P. 120–134.
- Opochocka A., Pasztaleniec A. Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions, *Monit. Assess*. 2016. Vol. 188. P. 622. DOI: 10.1007/s10661-016-5634-3
- Paturej E. Assessment of the trophic state of a restored lake based on zooplankton community structure and zooplankton-related indices, *Pol. J. Natur. Sc.* 2008. Vol. 23. No. 2. P. 440–449. DOI 10.2478/v10020-008-0034-y
- Paturej E., Bowszys M. Changes in the zooplankton of the restored lake Długie, *Polish Journal of Natural Sciences*. 2005. Vol. 19, No. 2. P. 321–334.
- Pinel-Alloul B., Mimouni E. Are cladoceran diversity and community structure linked to spatial heterogeneity in urban landscapes and pond environments?, *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 715. P. 195–212.
- Romanenko V. D. Oksiyuk O. P. Zhukinskiy V. N. Stol'berg F. V. Lavrik V. I. Environmental assessment of the impact of hydraulic engineering on water bodies. Kiev: Naukova dumka, 1990. 256 p.
- Shannon C. E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.
- Sladeček V. System of water quality from biological point of view, *Egetnisse der Limnologie*. 1973. Vol. 7. 218 r.
- Stefanidis K., Papastergiadou E. Influence of hydrophyte abundance on the spatial distribution of zooplankton in selected lakes in Greece, *Hydrobiologia*. 2010. Vol. 656. P. 55–65. DOI: 10.1007/s10750-010-0435-0
- Zhang S., Zhou Q., Xu D., Lin J., Cheng S., Wu Z. Effects of sediment dredging on water quality and zooplankton community structure in a shallow of eutrophic lake, *J. Environ. Sci*. 2010. Vol. 22. No. 2. P. 218–224.



УДК УДК 557.472, 572.486:575.5

## ТЕХНОЛОГИЯ БИООЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОТРАБОТАННЫХ СМАЗОЧНЫХ (МОТОРНЫХ) МАСЕЛ

**МОРОЗОВ**  
Николай Васильевич

*доктор биологических наук, ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технологический университет, morozov\_nv@mail.ru*

**ГАНИЕВ**  
Ильнур Махмутович

*кандидат биологических наук, ФГБОУ ВО Казанский (Приволжский) федеральный университет, ilnurgm-vgora@mail.ru*

### Ключевые слова:

отработанные моторные масла  
биodeградация  
углеводородоокисляющие микроорганизмы  
консорциум  
распылительно-отстойный биореактор  
биотехнологическая схема

**Аннотация:** Для очистки производственных сточных вод, загрязненных полусинтетическим (Shell Helix HX7 Diesel 10W-40) и минеральными (И-40А, соляровое) маслами, спроектирован и создан распылительно-отстойный биореактор (РОБ) колонного типа с тремя равными зонами: 1–2 – зоны распыления, иммобилизации углеводородоокисляющих микроорганизмов (УОМ) и интенсивной биодеструкции загрязнений; 3 – зона отстоя и частичного биоокисления остаточных загрязнений. Используя РОБ в качестве основного аппарата, мы разработали биотехнологическую схему очистки со следующими сооружениями: приемник-осветлитель сточной жидкости, усреднитель-смеситель, биореактор, вторичный отстойник, дозаторы подачи УОМ, биогенных элементов и индуцирующих соединений, насос подачи сточной жидкости, откачка очищенной воды в усреднитель-смеситель, а биомассы микроорганизмов в дозатор. Установлено, что при непрерывном режиме очистки сточной жидкости с отработанными смазочными маслами 25, 50, 75, 100 и 200 мг/дм<sup>3</sup> в РОБ со скоростью 0.7–0.8 л/мин (при давлении потока до 3.0 атм.), обеспечении температуры среды от 19 до 26 °С, рН – от 6.0 до 8.0, исходного содержания растворенного кислорода 1.5–3.0 мг/дм<sup>3</sup>, биогенных элементов в пределах 20–50 мг/дм<sup>3</sup>, индуцирующих веществ до  $35 \times 10^6$  М, УОМ от  $101 \times 10^6$  до  $106 \times 10^6$  кл/см<sup>3</sup> достигается очистка на 92.0–99.6 % (в зависимости от вида загрязнения). Остаточное количество масел в очищенном стоке укладывается в норму оборотного водоснабжения и отвода в открытые водные источники без ущерба их экологическому состоянию.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 22 апреля 2021 года

Подписана к печати: 24 июня 2021 года

## Введение

Смазочные масла, как товарные, так и отработанные, представляют собой существенную экологическую опасность (Андрианова и др., 2004). Известно, что 1 литр отработанного моторного масла, вылитого в почву, делает непригодным 100–1000 тонн грунтовых вод (Евдокимов, 2005), в том же количестве она становится источником масляного пятна на поверхности воды площадью почти 1 га или приводит в непригодное состояние миллион литров питьевой воды (Экоиндустрия, 2006). Подробный анализ состояния утилизации отработанных смазочных масел в России и других странах показывает, что 15–20 % накопленных масел используется для нужд производств (Черножуков, 1957; Петров, 1984; Поташников, 2004; Касицкая и др., 2007), часть сжигается (Евдокимов, 2005; Черножуков, 1957; Петров, 1984), а основная масса отводится в природные водоемы (Поташников, 2004; Morozov, Ganiev, 2016; Ganiev et al., 2019), ухудшая качество воды и нарушая деятельность организмов водных экосистем (Поташников, 2004; Муратова, Плешакова 1996; Липунов, 2015).

Наиболее приемлемый путь в ликвидации отработанных смазочных масел в разнообразных сточных водах – метод биологической очистки, основанный на естественном процессе самоочищения с участием гетеротрофных микроорганизмов (ГМ): бактерий, актиномицетов, микроскопических грибов, дрожжей и др. (Morozov, Ganiev, 2016; Тимергазина, Переходова, 2012).

Несмотря на известность факта, работы по созданию приемлемых для этой цели установок и технологических схем очистки маслосодержащих сточных вод с использованием аборигенных или отселектированных микроорганизмов решены крайне недостаточно.

Цель настоящей работы – разработка биотехнологии очистки сточных вод промышленных предприятий, сельскохозяйственных и бытовых объектов, загрязненных отработанными моторными маслами (минеральные, полусинтетические и синтетические) до норм оборотного водоснабжения.

Для достижения поставленной цели были определены следующие конкретные задачи:

1. Спроектировать и изготовить распылительно-отстойный биореактор (РОБ) для очистки маслосодержащих сточных вод отдельного производства производительностью до 800 дм<sup>3</sup>/час.

2. Разработать биотехнологическую схему очистки сточных вод, загрязненных отработанными смазочными маслами, на основе вновь созданной блочной модули с использованием консорциума углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) в изменяющихся условиях среды.

3. Провести полупроизводственные испытания с выведением технологической схемы на режим очистки с получением основных параметров, позволяющих обезвреживание любых маслосодержащих стоков до норм оборотного водоснабжения.

## Материалы

Объектом исследования служили маслосодержащие сточные воды в составе: 1) полусинтетическое дизельное топливо марки Shell Helix NX7 Diesel 10W-40 (Великобритания, Нидерланды); 2) индустриальное минеральное масло И-40А и соляровое масло (Россия).

Углеводородокисляющие микроорганизмы (УОМ), включающие девять штаммов, принадлежат к родам: *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Clostridium*, *Flavobacterium*, *Micrococcus* и *Pseudomonas* (Жукова, Морозов, 2010). Бактерии выделены из сточных вод цеха нейтрализации и очистки производственных стоков АО «Казаньоргсинтез», идентифицированы до вида секвенированием последовательности ампликана генома 16S рибосомальной РНК (Определитель..., 1997; Зернов и др., 2005) (депонированы в музее штаммов Федерального центра токсикологической, радиационной и биологической безопасности (ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ»). Последние объединены в консорциум по совместимости между собой и обеспечивают биodeградацию широкого класса углеводородов: n-алканы, ароматические, полициклические углеводороды, асфальтены и амоны, включая минеральные и полусинтетические масла различных производств. Биомассу УОМ для заражения сточных вод в процессе очистки получали из чистых изолятов на жидкой среде Мюнца (Среда Мюнца, состав (г/л): (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 2.0; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 1.0; KNO<sub>3</sub> – 1.0; MgSO<sub>4</sub> × 7H<sub>2</sub>O – 0.2; NaCl – 0.2; FeCl<sub>2</sub> – следы; вода водопроводная – 100 см<sup>3</sup>; вода дистиллированная – 900 см<sup>3</sup>; pH – 7.2) с добавлением вазелинового масла (0.5 % по объему).

Воду загрязняли маслами из расчета 25, 50, 75, 100, 200 мг/дм<sup>3</sup> и консорциумом углеводородокисляющих микроорганизмов 10<sup>1</sup> × 10<sup>6</sup> – 10<sup>6</sup> × 10<sup>6</sup> кл/см<sup>3</sup>. Количество био-

генных элементов в соотношении БПК<sub>5</sub>:N:P или 100:20:5 составляло от 20 до 50, фосфор (суперфосфат) в пределах 5–15 мг/см<sup>3</sup>. Индуцирующие вещества: аланин, валин, мальтоза, глюкоза, α-кетоглутаровая и янтарная кислоты в соотношении 1:1:1:1:1 с общей концентрацией 35 × 10<sup>6</sup> М.

## Методы

Оценку очистки воды от отработанных масел по принятой схеме проводили по следующим параметрам: число микроорганизмов методом титра (разведений) и по изменению оптической плотности; остаточного количества нефтепродуктов (на КН-2М); растворенного кислорода (O<sub>2</sub>); химического потребления кислорода (ХПК); нитрит-иона (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>); нитрат-иона (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>); аммонийного азота (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>); сульфат-иона (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) гостированными химическими и биологическими методами (ПНД Ф 14.1.272-2012; ПНД Ф 14.1:2.100-97; ПНД Ф 14.1:2.101-97; ПНД Ф 14.1:2.159-2000; ПНД Ф 14.1:2.4.262-10; ПНД Ф 14.1:2:4.3-95; ПНД Ф 14.1:2:4.4-95).

Повторность испытаний технологической схемы очистки составляла не менее 5 раз, анализов – 3-кратная.

Статистическую обработку полученных данных проводили в компьютерной программе Microsoft Office 2010 (Word и Excel) с использованием дополнительной функции

«анализ данных». Оценка достоверности различий полученных совокупностей результатов была выполнена с применением *t*-критерия Стьюдента с уровнем достоверности 95 %.

## Результаты

Очистке подвергали смешанные сточные воды с отработанными смазочными маслами производства ООО «НПО Нефтепромхим» г. Казань со следующими химическими показателями: T° – 19-26 °С, pH – 6.0–8.5, содержание растворенного кислорода в пределах 1.5–3.0 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК – от 460 до 1200 мг/дм<sup>3</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – от 0.16 до 1.4 мг/дм<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – 4.9–32.0 мг/дм<sup>3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 3.2–37.6 мг/дм<sup>3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 15–45 мг/дм<sup>3</sup>, общее количество нефтепродуктов (отработанные смазочные масла) в пределах 25–200 мг/дм<sup>3</sup>.

Для обезвреживания сточной жидкости принята технологическая схема, включающая (рис. 1): 1 – приемник-осветлитель сточных вод; 2 – усреднитель-смеситель; 3 – биореактор; 4 – дозаторы: 4а – с углеводородоокисляющими микроорганизмами; 4б – с биогенными элементами; 4в – с индуцирующими соединениями; 5 – вертикальный отстойник; 6, 7, 8 – насосы подачи и откачки сточной жидкости, очищенной воды и биомассы микроорганизмов.

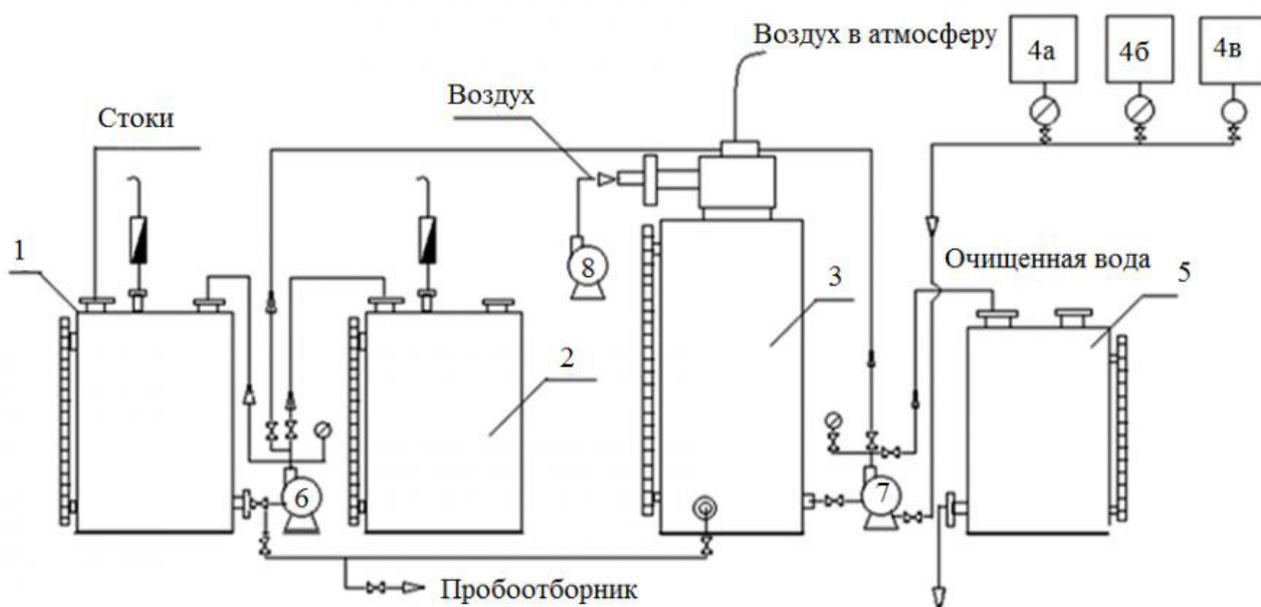


Рис. 1. Технологическая схема биологической очистки сточных вод от отработанных смазочных масел  
Fig. 1. Technological scheme of biological wastewater treatment from used lubrication oils

В качестве основного сооружения в схеме использовали распылительно-отстойный биореактор. Он выбран на основе модульного принципа, позволяющего формировать основное сооружение из типового оборудования химических производств. РОБ спроектирован и изготовлен в виде колонны цилиндрической формы диаметром 500 мм и высотой 3200 мм (рис. 2). По высоте колонна разделена на три равных части. Верхняя – зона распыления с входящими патрубками подачи сточной жидкости и полуконусной форсункой. Она соединена с патрубком подачи сточной жидкости и вмонтирована в верхней зоне цилиндра посередине. Средняя – зона иммобилизации и интенсивной биодеструкции загрязнений УОМ по высоте 1.0 м заполнена кольцами Рашига. Нижняя – зона отстоя и частичного окисления остаточных загрязнений в очищаемом стоке.

По принятой схеме механически очищенная вода от грубых примесей, крупных и мелкодиспергированных частиц поступает в приемник-осветлитель (1), далее в усреднитель-смеситель (2) и подвергается корректировке исходной нагрузки по химическому потреблению кислорода (ХПК). Сбалансированный по органическим веществам (нагрузке) сток далее центробежным насосом (6) подается в распылительно-отстойный биореактор (3) – через центральный патрубок в форсунку. Одновременно в этот поток из дозаторов (4а, 4б и 4в) поступает суспензия УОМ, биогенные элементы и индуцирующие соединения. Поток сточной жидкости со всеми компонентами распыляется до получения тумана, т. е. образуются мелкодиспергированные частицы с размером до 30 микрон. В зоне истечения воды из приточного патрубка, где происходят максимальные градиенты скорости и сдвиговых напряжений, вызванных распылением сточной жидкости с композиционными соединениями (биогенные, индуцирующие вещества) и микроорганизмами, через форсунку (давление до 3 атм. и скорости потока 0.7–0.8 дм<sup>3</sup>/мин), осуществляется разрыв мицеллярных оболочек на каплях эмульгированных отработанных смазочных масел, имеющих в сточной жидкости. В результате по всей длине цилиндра 1.0 м образуется зона интенсивного перемешивания, которая обеспечивает образование большой развитой поверхности контакта компонентов сточной жидкости и микроорганизмов с распыленными в потоке загрязняющими компонентами. Таким образом, благодаря созданию

оптимальной среды для УОМ (смазочные масла, биогенные, индуцирующие соединения, pH и т. д.) и активного перемешивания их со стоком в зоне распыления достигается высокая интенсивность деструкции масел и других сопутствующих веществ.

По мере выхода из 1-й зоны мелкодиспергированный туман сгущается в виде мелких капель, проходит во вторую зону биореактора. Накапливаясь постепенно в этой зоне, очищаемая вода орошает кольца Рашига и контактирует с развитой на ее поверхности биопленкой, образованной консорциумом УОМ. Последнее достигается в результате длительного орошения колец смесью сточной жидкости и углеводородокисляющих микроорганизмов. Проходя данную зону, сточная жидкость освобождается от основной нагрузки масел в процессе их ускоренной биодеградациии.

Далее сток поступает в 3-ю зону биореактора – зону отстоя и частичного доокисления остаточных загрязняющих веществ. Время пребывания сточной жидкости в зоне колеблется от 30 до 40 мин.

По завершении времени выдержки стока РОБ в 1.5 часа очищенная вода центробежным насосом откачивается вновь в РОБ и подвергается 1.5-часовой рециркуляции. С завершением времени дополнительной доочистки отводится в следующий ступень – во вторичный вертикальный отстойник и отстаивается 1.5–2.0 часа.

По достижении времени осветленная часть очищаемой воды возвращается в усреднитель-смеситель (2) для корректировки нагрузки в исходной сточной жидкости, подаваемой на очистку, а избыток поступает в обратное водоснабжение предприятия. Биомасса УОМ, выросшая в процессе обезвреживания масел и других сопутствующих веществ в стоке, собирается в приемнике вторичного отстойника. Далее она по мере накопления откачивается насосом (7) в дозатор микроорганизмов и используется в очистке новой порции сточной жидкости.

Ниже описываются результаты полупромышленных испытаний принятой схемы очистки сточных вод, загрязненных полусинтетическим и минеральным маслами.

Как отмечено выше, опыты выполнены указанными загрязнениями с исходной нагрузкой 25, 50, 75, 100 и 200 мг/дм<sup>3</sup> (фактическое содержание отработанного смазочного масла после смешивания со сточной водой, среднее из трех определений: 65.5, 169.0 и 261.7 мг/дм<sup>3</sup> соответственно).

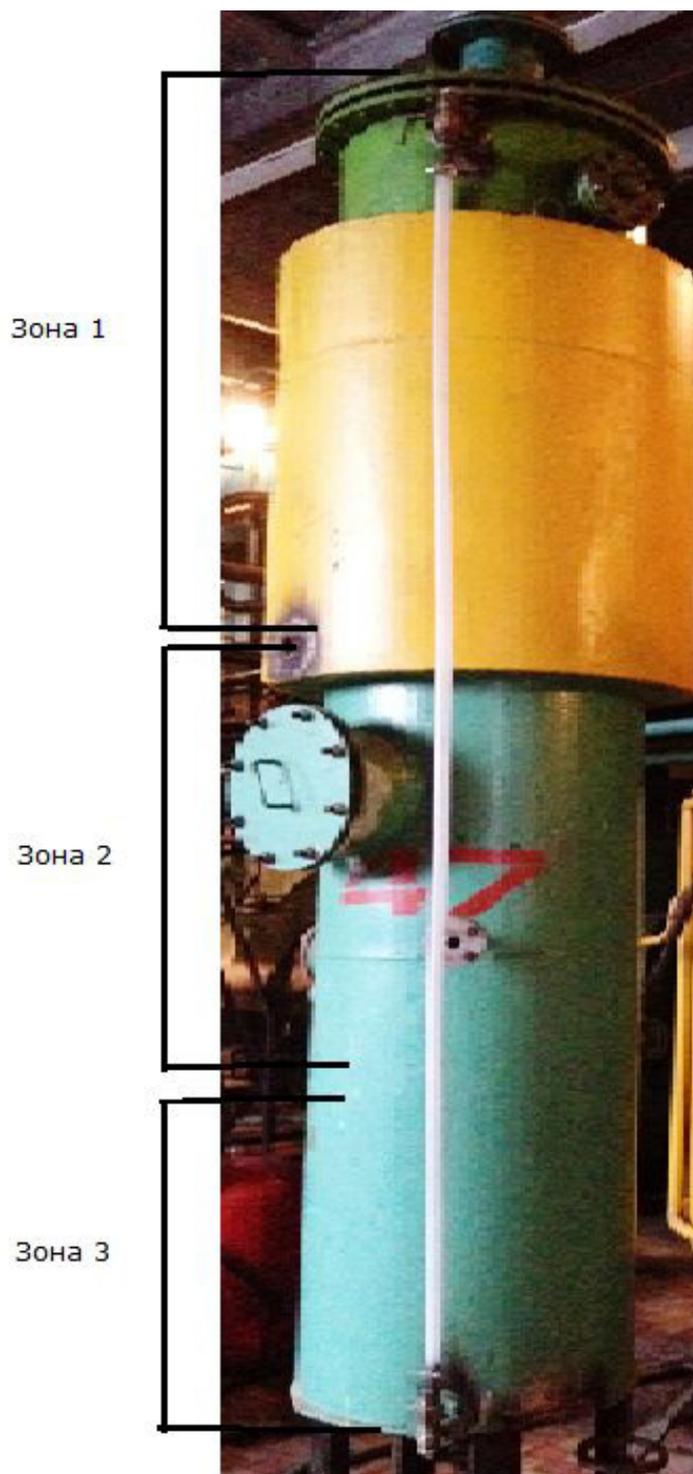


Рис. 2. Распылительно-отстойный биореактор

Fig. 2. Spray and lagoon bioreactor

Оценка работы схемы по очистке стока, загрязненного полусинтетическим дизельным топливом (ПСДТ), выявила, что степень интенсивности биодеструкции находится в промежутке 3–5 часов (в пределах данных нагрузок). Это наглядно иллюстрирует динамика снижения химического потребления кислорода в процессе биоочистки (рис. 3).

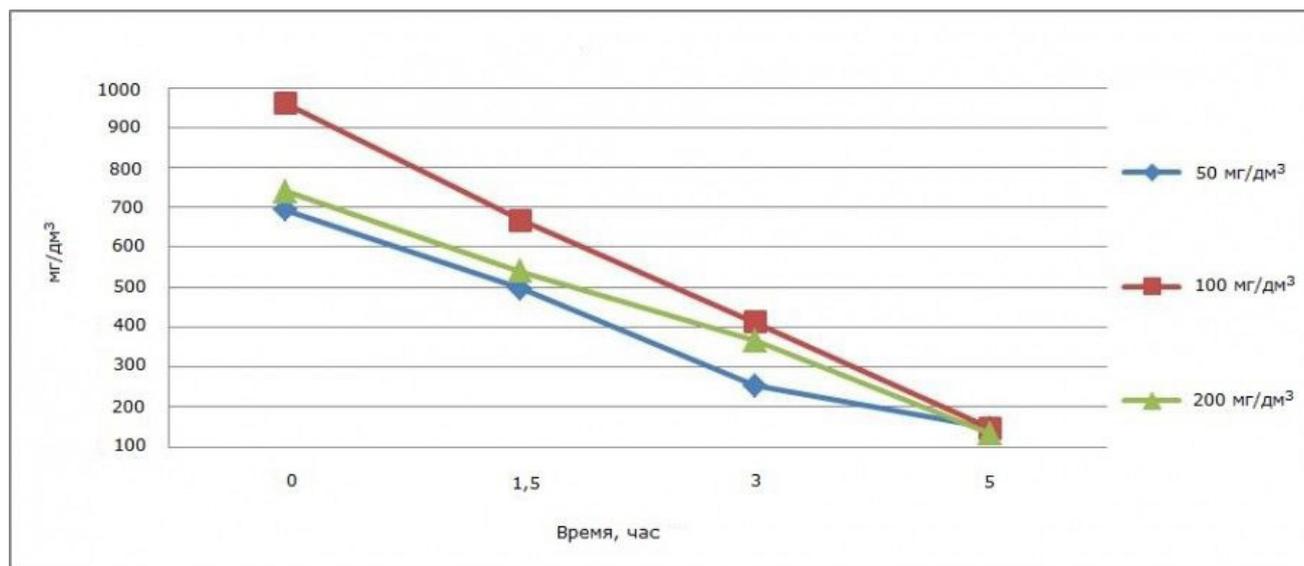


Рис. 3. Динамика химического потребления кислорода в процессе очистки сточной жидкости от отработанного полусинтетического дизельного топлива Shell Helix HX7 Diesel 10W-40: 1 – 50 мг/дм<sup>3</sup>; 2 – 100 мг/дм<sup>3</sup>, 3 – 200 мг/дм<sup>3</sup>

Fig. 3. Dynamics of chemical oxygen consumption in the process of wastewater treatment from spent semi-synthetic diesel fuel Shell Helix HX7 Diesel 10W-40: 1 – 50 mg/dm<sup>3</sup>; 2 – 100 mg/dm<sup>3</sup>, 3 – 200 mg/dm<sup>3</sup>

Как видно из рис. 3, в биореакторе за 1.5 часа контакта загрязнения с заданным количеством углеводородокисляющих микроорганизмов значение ХПК падает от 30 до 45 %. Дополнительная рециркуляция сточной жидкости с выдержкой тех же параметров (число УОМ в пределах 101 × 106 – 106 × 106 кл/см<sup>3</sup>, биогенные элементы до 30 и индуцирующие вещества в 5.0 мг/дм<sup>3</sup>), длительностью 1.5 часа позволяет снять содержание ХПК на выходе из биореактора еще на 40–45 % (загрязнения от 65.5 до 169.0 мг/дм<sup>3</sup>), 40–50 % при содержании масла в стоке 261.7 мг/дм<sup>3</sup>.

Двухчасовой отстой, предусмотренный технологией очистки и сопровождаемый биоокислением остаточных количеств масел (по вариантам), позволяет снижать ХПК до 146.7 мг/дм<sup>3</sup>.

Достоверное снижение концентрации полусинтетического дизельного топлива ( $p \leq 0.05$ ) в сточной жидкости при ее очистке составляло с: содержанием масла в исходном принятом технологическом стоке 65.4±0.6 мг/дм<sup>3</sup> 98.04 %, 161.7±4.8 мг/дм<sup>3</sup> – 78.6–87.4 % и 277.4±2.23 мг/дм<sup>3</sup> – 96.8 % соответственно.

Результаты испытаний характеризуют стабильную работу схемы по обезвреживанию загрязнения. Это согласуется с динамикой содержания растворенного кислорода (O<sub>2</sub>) в процессе очистки воды от ПСДТ.

Количество O<sub>2</sub> изменяется обратно про-

порционально к изменению значения ХПК. Несколько уменьшаясь в начале эксперимента, его содержание возрастает по мере уменьшения исходного загрязнения (для 50 мг/дм<sup>3</sup> – от 0.78 до 0.68; 100 мг/дм<sup>3</sup> – от 0.55 до 1.01; 200 мг/дм<sup>3</sup> – от 0.73 до 0.79 мг/дм<sup>3</sup>) (рис. 4).

Наблюдаемое указывает на то, что в первой зоне контакта биореактора, где происходит распыление сточной жидкости со всеми компонентами, растворенный в воде кислород вовлекается на биодеструкцию загрязнения более полно, а далее по мере уменьшения концентрации масла в потоке несколько возрастает и остается на стабильном уровне, обеспечивая окислительные процессы.

В целом, как видно из результатов испытаний, биотехнологическая схема очистки с включением сооружений: приемника-осветлителя стоков, усреднителя-смесителя, биореактора и вторичного отстойника и с регулируемой подачей расчетного количества ассоциации углеводородокисляющих микроорганизмов, биогенных элементов и индуцирующих веществ обеспечивает снятие исходного загрязнения до 98.04 %. Это достигается при режиме подачи сточной жидкости в установку – 0.7–0.8 дм<sup>3</sup>/мин (при давлении потока 3.0 атм.), обеспечении температуры среды – от 20 до 26 °С, pH – от 6.0 до 8.0 и исходного содержания растворенного кислорода (O<sub>2</sub>) – от 1.5 до 3.0 мг/дм<sup>3</sup>.

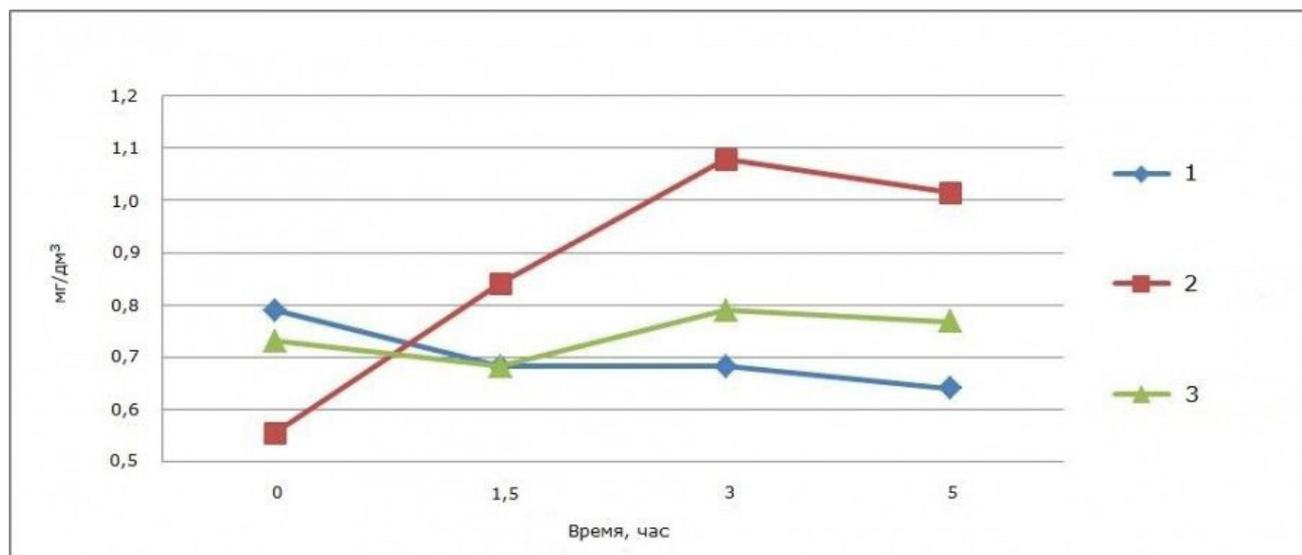


Рис. 4. Динамика растворенного кислорода в процессе очистки воды от полусинтетического масла Shell Helix HX7 Diesel 10W-40: 1 – 50 мг/дм<sup>3</sup>; 2 – 100 мг/дм<sup>3</sup>, 3 – 200 мг/дм<sup>3</sup>

Fig. 4. Dynamics of dissolved oxygen during water treatment with semi-synthetic oil Shell Helix HX7 Diesel 10W-40: 1 – 50 mg/dm<sup>3</sup>; 2 – 100 mg/dm<sup>3</sup>, 3 – 200 mg/dm<sup>3</sup>

В следующих сериях испытаний очистке подвергали сточные воды, загрязненные соляровым и минеральным маслом И-40. Применение их в различных отраслях промышленности и быта в десятки раз превышает показатели полусинтетических и синтетических масел (Морозов и др., 2019). В этой связи разработка биотехнологии очистки стоков, загрязненных минеральными маслами (локальных и других), имеет чрезвычайное значение. В этом плане наши исследования носят квалифицированный характер, т. е. завершающий с предложением внедрения разработанной нами технологии в практику очистки маслозагрязненных сточных вод повсеместно.

Очистке подвергали сточные воды, загрязненные вышеназванными маслами в количествах 25, 50, 75, 100 и 200 мг/дм<sup>3</sup>. Режим выбран прежний со следующими параметрами: рН 6.5–6.9, температура среды 19–21 °С, число углеводородных микроорганизмов 101 × 10<sup>6</sup> – 106 × 10<sup>6</sup> кл/см<sup>3</sup>, обеспеченность растворенным кислородом в пределах 1.5–3.0 мг/дм<sup>3</sup>, количество биогенных элементов (N, P, K) суммарно не выше 50 мг/дм<sup>3</sup>, индуцирующие вещества до 35 × 10<sup>6</sup> М.

В первой серии испытаний очищали сточную воду с содержанием И-40А 25 мг/дм<sup>3</sup>. Опыт показал, что биодеструкция минерального масла в биореакторе протекала в полной мере, что указывает на уменьшение ХПК в 6.5 раза (361.4 до 55.6 мг/дм<sup>3</sup>), биогенных элементов: NO<sub>2</sub>- с 210.8 до 0.96, аммонийного азота с 33.1 до 27.6 мг/дм<sup>3</sup>.

После 3-часового контакта загрязнения с УОМ эти показатели, после отстоя во вторичном отстойнике, упали: ХПК до 22.4, сумма неорганического азота (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) с 50 до 0.45, а SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> с 45 до 13 мг/дм<sup>3</sup>. При этом количество остаточного неокисленного минерального масла в очищенном стоке не превышало санитарные нормы сброса в водоем (0.26 мг/дм<sup>3</sup>).

Опыты с соляровым маслом 50, 75, 100 и 200 мг/дм<sup>3</sup> выявили, что принятая технология биоочистки позволяет значительно снять загрязнение в очищенном стоке. Хотя по составу оно включает трудноокисляемые соединения – ароматические, полициклические углеводороды и др. (Ganiev et al., 2019). Степень очистки, выраженная ХПК и БПК<sub>5</sub> (биохимическое потребление кислорода), показала, что значения эти снижаются из ступени в ступень, доходя до максимума к 5-му часу контакта (рис. 5).

Как видно из рисунка, наибольший спад значений ХПК и БПК<sub>5</sub>, а соответственно исходного загрязнения обеспечивается в биореакторе, где окислительные процессы выражены стабильно высоко. За 3 часа контакта стока с участвующими в биодеструкции углеводородокисляющими микроорганизмами сокращение солярового масла в вариантах с исходным загрязнением 50–100 мг/дм<sup>3</sup> варьирует между 70.0–73.6 %, а 200 мг/дм<sup>3</sup> до 64.0 %. Дальнейший отстой во вторичном отстойнике длительностью два часа обеспечивает очистку еще на 20–25 %.

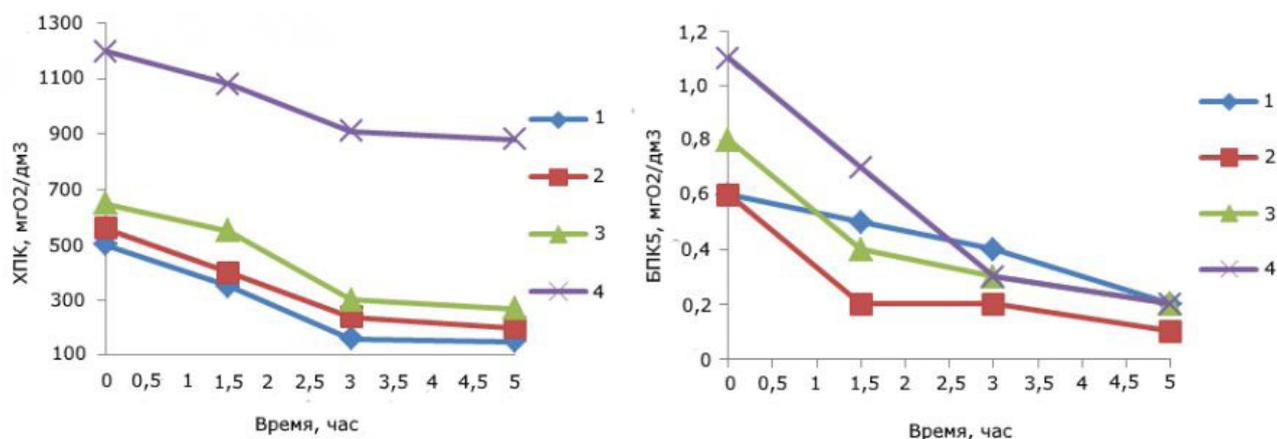


Рис. 5. Изменение значений ХПК и БПК<sub>5</sub> в очищаемом стоке с отработанным соляровым маслом в 50 мг/дм<sup>3</sup> (1), 75 мг/дм<sup>3</sup> (2), 100 мг/дм<sup>3</sup> (3), 200 мг/дм<sup>3</sup> (4)

Fig. 5. Change of COC and BOC<sub>5</sub> values in treated sewage with used solar oil in 50 mg/dm<sup>3</sup> (1), 75 mg/dm<sup>3</sup> (2), 100 mg/dm<sup>3</sup> (3), 200 mg/dm<sup>3</sup> (4)

В итоге при фактическом содержании солярового масла в очищенном стоке от 65 до 277 мг/дм<sup>3</sup> (заданные варианты 50, 75, 100 и 200 мг/дм<sup>3</sup>) испытанная схема за 5 часов контакта с окисляющей микрофлорой обеспечивает обезвреживание локальных сточных вод до норм оборотного водоснабжения. В процентном отношении уровень достоверности очистки сточной жидкости от солярового масла в серии испытаний  $p \leq 0.05$  составил от 85.6 до 96.4 %.

## Обсуждение

Для традиционных схем очистки, используемых в настоящее время на предприятиях отраслей нефтепереработки и нефтехимии (Морозов и др., 2015), длительность подготовки подобных сточных вод колеблется от 16 до 20 часов. При этом сток проходит предварительное 3–5-кратное разбавление и первичный отстой 1.5–2.0 часа до подачи в сооружения биоочистки, а степень обезвреживания не превышает 75–78 %. Это достигается благодаря использованию значительных ресурсов (разбавляющей воды, активного ила, реагентов и электроэнергии). Велики здесь эксплуатационные расходы, которые требуют больших затрат по содержанию многочисленных сооружений, которые занимают большие площади для размещения. При этом еще остаются не решенными вопросы доочистки вод с доведением остаточных количеств углеводородов в очищенной воде до санитарных норм отвода в открытые водные источники. Что касается использования вод после вторичного отхода, то они непригодны в оборотном водоснабжении предприятия.

Предлагаемая нами биотехнология очистки нефте- и углеводородосодержащих сточных вод с управляемым использованием УОМ для окисления нефтяных и приравненных к ним загрязнений компактна в размещении, а следовательно занимает ограниченную площадь, даже при применении для очистки больших объемов сточных вод. Она может быть применена для широкого круга предприятий, где имеются нефтезагрязненные сточные воды.

Дешевизна в эксплуатации выделяет ее в передовые, может быть использована во многих отраслях промышленности, сельского хозяйства и быта и в любой климатической зоне.

## Заключение

В результате детальных исследований разработана уникальная биотехнология очистки сточных вод, загрязненных отработанными смазочными маслами разнообразной природы, работающая в изменяющихся условиях среды. Схема укомплектована вновь созданной установкой – биореактором (колонного типа высотой до 3.2 м, состоит из трех равных зон и участков, иммобилизованных углеводородокисляющими микроорганизмами, распылителя поступающего потока, доводя его до мелкодиспергированных частиц  $\geq 30$  микрон и образования развитой и активной поверхности контакта), которая обеспечивает интенсивную биодеструкцию масел по всей высоте установки, переводя загрязнение из малоокисленного в промежуточное и далее в конечные продукты окисления.

Выяснено, что при скорости потока сточной жидкости 0.7–0.8 м/сек с сбалансированным количеством биогенных элементов (от 20 до 50 мг/дм<sup>3</sup>), индуцирующих веществ в  $35 \times 10^6$  М числа, углеводородокисляющих микроорганизмов ( $101 \times 10^6$  –  $106 \times 10^6$  кл/см<sup>3</sup>) и при времени контакта загрязнений с микрофлорой 2.5–5.0 часа степень обезвреживания исходных стоков достигается до норм оборотного водоснабжения и отвода их в открытые водные источники без ущерба их экологическому состоянию (0.29 мг/дм<sup>3</sup>).

Рекомендуемая биотехнология очистки маслосодержащих сточных вод модульного типа включает приемник сточных вод, усреднитель стоков до заданной нагрузки по химическому потреблению кислорода, биореактор с дозирующим устройством биогенов, индуцирующих соединений и УОМ, вторичный отстойник и насосы оборотного водоснабжения подачи, сточной жидкости

от одного сооружения в другое и образованной биомассы в дозатор. Легко собирается на любой площадке и может быть пущена на эксплуатацию в короткие сроки и малозатратно. Она может быть принята для очистки как локальных, так и смешанных сточных вод различных отраслей промышленности, сельского хозяйства и быта, причем на любую производительность, путем включения двухступенчатых биореакторов. При включении последнего можно исключить рециркуляцию сточной жидкости. Это позволяет сократить время контакта с окисляющей отселектированной углеводородокисляющей микрофлорой, повысить производительность очистки маслосодержащих сточных вод, а главное – добиться биодеструкции полусинтетических и минеральных масел разнообразной природы до конечных продуктов окисления.

## Библиография

- Андрианова Н., Жалнина Л., Рощина Н. Количественный учет нефтепродуктов на АЗС. Расчет акцизов // Экономика и жизнь. 2004. № 37. URL: <http://base.garant.ru/4007974/#friends> (дата обращения: 15.02.2020).
- Евдокимов А. Ю. Утилизация отработанных смазочных материалов: технологии и проблемы // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2005. № 2. С. 9–11.
- Зернов Ю. П. Использование рестрикционного анализа амплифицированного гена 16S РНК для индентификации микроорганизмов на примере бактериальных продуцентов термостабильной щелочной фосфатазы // Биотехнология. 2005. №6. С. 3–11.
- Касицкая Л. В., Саркисов Ю. С., Горленко Н. П., Копаница Н. О., Кудяков А. И. Торфяные ресурсы Томской области и пути их использования в строительстве. Томск: СТТ, 2007. 292 с.
- Липунов И. Н. Очистка сточных вод в биологических реакторах с биопленкой и активным илом (расчет биофильтров и аэротенков): Учебное пособие. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2015. 110 с.
- Определитель бактерий Берджи : В 2 т. / Под ред. Дж. Хоулта и др.; Пер. с англ. под ред. акад. РАН Г. А. Заварзина. 9-е изд. М.: Мир, 1997. 429 с.
- Морозов Н. В., Ганиев И. М., Галлямова И. Н. Ресурсосберегающая биотехнология очистки сточных вод от отработанных смазочных масел предприятий промышленности до норм оборотного водоснабжения // Научные разработки: евразийский регион: Международная научная конференция теоретических и прикладных разработок. М.: Инфинити, 2019. С. 191–197.
- Морозов Н. В., Ганиев И. М., Зиннатов Ф. Р., Хадиева Г. Ф. Разработка биотехнологии применения органических сорбентов для активации и ускорения биодеградациии трансформаторного и дизельного масел // Биотехнология: состояние и перспективы развития: VIII Московский международный конгресс. М., 2015. Ч. 2. С. 336–338.
- Жукова О. В., Морозов Н. В. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями – сорбентами при снятии локального нефтяного загрязнения // Вестник ТГГПУ. 2010. № 3 (21). С. 99–106.
- Муратова А. Ю., Плешакова Е. В. Микробиологическая очистка в защите окружающей среды от нефтяных загрязнений // Проблемы изучения биосферы: Тезисы докладов Всероссийской конференции. Саратов, 1996. С. 107–108.
- Петров А. А. Углеводороды нефти. М.: Наука, 1984. 263 с.
- Поташников Ю. М. Утилизация отходов производства и потребления: Учебное пособие. Тверь: Изд-во ТГТУ, 2004. 107 с.
- ПНД Ф 14.1.272-2012. Количественный химический анализ вод. Методика (метод) измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах сточных вод методом ИК-спектрофотометрии с применением концентратометров серии КН. М.: Изд-во стандартов, 2012. 22 с.
- ПНД Ф 14.1:2.100-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений химического потребления кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом. М.: Изд-во стандартов, 1997. 16 с.

- ПНД Ф 14.1:2.101-97. Методика выполнения измерений массовой концентрации растворенного кислорода в пробах природных и очищенных сточных вод йодометрическим методом . М.: Изд-во стандартов, 1997. 20 с.
- ПНД Ф 14.1:2.159-2000. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации сульфат-ионов в пробах природных и сточных вод турбидиметрическим методом . М.: Изд-во стандартов, 2000. 14 с.
- ПНД Ф 14.1:2.4.262-10. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в питьевых, поверхностных (в том числе морских) и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера . М.: Изд-во стандартов, 2010. 26 с.
- ПНД Ф 14.1:2:4.3-95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нитрит-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса . М.: Изд-во стандартов, 1995. 22 с.
- ПНД Ф 14.1:2:4.4-95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нитрат-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой . М.: Изд-во стандартов, 1995. 18 с.
- Тимергазина И. Ф., Переходова Л. С. К проблеме биологического окисления нефти и нефтепродуктов углеводородокисляющими микроорганизмами // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 1. С. 15.
- Черножуков Н. И. Значение химического состава масел в практике их производства и эксплуатации // Химический состав и эксплуатационные свойства смазочных масел. М., 1957. С. 5–24.
- Экоиндустрия. Моторные масла и экология // Аналитический портал химической промышленности. Новые химические технологии, 2006. . URL: [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=329](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=329) (дата обращения: 10.02.2020).
- Ganiev I. M., Morozov N. V., Muhametzyanova A. S. Biodestruction of lubricated motor oils in sewage water with the use of pilot biological installation // J. Mater. Environ. Sci. 2019. Vol. 10. № 6. P. 526–532.
- Morozov N. V., Ganiev I. M. Microbiological removal of engine oils from natural water using plant-derived sorbents // Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences. 2016. Vol. 7. № 5. P. 1728–1735.

# TECHNOLOGY OF BIOLOGICAL TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTE WATER FROM USED LUBRICATING (MOTOR) OILS

**MOROZOV**  
Nikolay Vasilyevich

*Doctor of Biological Sciences, Kazan National Research Technological University, morozov\_nv@mail.ru*

**GANIEV**  
Ilnur Mahmutovich

*Ph. D., Kazan (Volga region) Federal University, ilnurgm-vgora@mail.ru*

## Keywords:

used motor oils  
biodegradation  
hydrocarbon-oxidizing  
microorganisms  
consortium  
spray-deficient  
bioreactor  
biotechnology scheme

## Summary:

For the treatment of industrial wastewater contaminated with semi-synthetic (Shell Helix HX7 Diesel 10W-40) and mineral (I-40A, solar) oils, a column-type spray-resistant bioreactor (SRB) with three equal zones was designed and developed: 1–2 – zones of spraying, immobilization of hydrocarbon-oxidizing microorganisms (HOM) and intensive biodestruction of contaminants; 3 – zone of sedimentation and partial biooxidation of residual contaminants. Using SRB as the main apparatus developed biotechnology scheme of treatment with the following facilities: receiver clarifier waste liquid, medium-mixer, bioreactor, secondary settling tank, dispensers HOM, biogenic elements and inducing compounds, wastewater pump, pumping treated water into the medium-mixer, and the biomass of microorganisms in the dispenser. It was found that in the mode of continuous stage wastewater with used lubricants 25, 50, 75, 100 and 200 mg/dm<sup>3</sup> in the SRB at a rate of 0.7–0.8 dm<sup>3</sup>/min (at a flow pressure up to 3.0 atm.), providing a medium temperature of 19 to 26 °C, pH – from 6.0 to 8.0, the initial content of dissolved oxygen 1.5–3.0 mg/dm<sup>3</sup>, nutrients within 20–50 mg/dm<sup>3</sup>, inducing substances up to 35×10<sup>6</sup> M, HOM from 101×10<sup>6</sup> to 106×10<sup>6</sup> kl/dm<sup>3</sup> and achieved purification at 92.0–98.6 % (depending on the type of contamination). The remaining amount of oils in the treated effluent is stacked in the norm of water recycling and diversion to open water sources without damaging their ecological condition.

**Received on:** 22 April 2020

**Published on:** 21 June 2021

## References

- Andrianova N. Zhalnina L. Roschina N. ZS. Quantitative accounting of petroleum products at gas stations. Excise taxes calculation of Russia, *Ekonomika i zhizn'*. 2004. No. 37. URL: <http://base.garant.ru/4007974/#friends> (data obrascheniya: 15.02.2020).
- Chernozhukov N. I. Value of chemical composition of oils in practice of their production and operation// *Himicheskiy sostav i ekspluatatsionnye svoystva smazochnyh masel*. M., 1957. P. 5–24.
- Determinant of Bergie bacteria: V 2 t., Pod red. Dzh. Houlta i dr.; Per. s angl. pod red. akad. RAN G. A. Zavarzina. 9-e izd. M.: Mir, 1997. 429 p.
- Evdokimov A. Yu. Used lubricants utilization: technologies and problems, *Zaschita okruzhayushey sredy v neftegazovom komplekse*. 2005. No. 2. P. 9–11.
- Ganiev I. M., Morozov N. V., Muhametzyanova A. S. Biodestruction of lubricated motor oils in sewage water with the use of pilot biological installation, *J. Mater. Environ. Sci.* 2019. Vol. 10. No. 6. P. 526–532.
- Kasickaya L. V. Sarkisov Yu. S. Gorlenko N. P. Kopanica N. O. Kudyakov A. I. Peat resources of the Tomsk region and ways of their use in construction. Tomsk: STT, 2007. 292 p.
- Lipunov I. N. Wastewater treatment in biological reactors with biofilm and activated sludge (calculation of biofilters and aerotanks): Training manual. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet, 2015. 110 p.
- Morozov N. V. Ganiev I. M. Gallyamova I. N. Resource-saving biotechnology of wastewater treatment from used lubricating oils of industrial enterprises to the norms of recycling water supply, *Nauchnye razrabotki: evraziyskiy region: Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya teoreticheskikh i prikladnykh razrabotok*. M.: Infiniti, 2019. P. 191–197.
- Morozov N. V. Ganiev I. M. Zinnatov F. R. Hadieva G. F. Development of biotechnology for the use of organic sorbents to activate and accelerate the biodegradation of transformer and diesel oils, *Biotehnologiya: sostoyanie i perspektivy razvitiya: VIII Moskovskiy mezhdunarodnyy kongresp*. M.,

2015. Ch. 2. P. 336–338.

- Morozov N. V., Ganiev I. M. Microbiological removal of engine oils from natural water using plant-derived sorbents, Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences. 2016. Vol. 7. No. 5. P. 1728–1735.
- Motor oils and ecology, Analeticheskiy portal himicheskoy promyshlennosti. Novye himicheskie tehnologii, 2006. . URL: [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=329](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=329) (data obrascheniya: 10.02.2020).
- Muratova A. Yu. Pleshakova E. V. Microbiological purification in environmental protection from oil pollution, Problemy izucheniya biosfery: Tezisy dokladov Vserossiyskoy konferencii. Saratov, 1996. P. 107–108.
- Petrov A. A. Hydrocarbons of oil. M.: Nauka, 1984. 263 p.
- Potashnikov Yu. M. Utilization of production and consumption wastes (textbook). Tver': Izd-vo TGTU, 2004. 107 p.
- Quantitative chemical analysis of water. The technique of measuring the chemical oxygen consumption in samples of natural and treated wastewater by the titrimetric method. M.: Izd-vo standartov, 1997. 16 p.
- Quantitative chemical analysis of water. The technique of measuring the mass concentration of sulfate ions in samples of natural and waste water by turbidimetric method. M.: Izd-vo standartov, 2000. 14 p.
- Quantitative chemical analysis of waters. Method (method) of measuring the mass concentration of petroleum products in wastewater samples by infrared spectrophotometry with the use of concentrators series KN. M.: Izd-vo standartov, 2012. 22 p.
- Quantitative chemical analysis of waters. Methods for measuring the mass concentration of ammonium ions in drinking, surface (including marine) and waste water by photometric method with Nessler reagent. M.: Izd-vo standartov, 2010. 26 p.
- Quantitative chemical analysis of waters. Methods of measuring the mass concentration of nitrates ions in drinking, surface and waste water by the photometric method with salicylic acid. M.: Izd-vo standartov, 1995. 18 p.
- Quantitative chemical analysis of waters. Methods of measuring the mass concentration of nitrite ions in drinking, surface and waste water by the photometric method with Grisse reagent. M.: Izd-vo standartov, 1995. 22 p.
- The technique of mass concentration measurements of dissolved oxygen in samples of natural and treated wastewater by iodometric method. M.: Izd-vo standartov, 1997. 20 p.
- Timergazina I. F. Perehodova L. S. To the problem of biological oxidation of oil and oil products by hydrocarbon-oxidizing microorganisms (in Russian), Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. 2012. T. 7. No. 1. P. 15.
- Zernov Yu. P. Use of restriction analysis of the amplified gene 16S RNA for the indexation of microorganisms on the example of bacterial producers of thermolabile alkaline fucosidase, Biotehnologiya. 2005. No.6. P. 3–11.
- Zhukova O. V. Morozov N. V. Interaction of microorganisms with solid surfaces - sorbents during removal of local oil pollution, Vestnik TGGPU. 2010. No. 3 (21). P. 99–106.



УДК 574.21

## ОСОБЕННОСТИ ПИТАНИЯ ЛЯГУШКИ ОЗЕРНОЙ (*PELOPHYLAX RIDIBUNDUS* PALLAS, 1771) В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ Г. БЕЛГОРОДА (РОССИЯ)

**СНЕГИН**

Эдуард Анатольевич

ФГАОУ ВО НИУ БелГУ, [snegin@bsu.edu.ru](mailto:snegin@bsu.edu.ru)

**БАРХАТОВ**

Анатолий Сергеевич

ФГАОУ ВО НИУ БелГУ, [barkhatov@bsu.edu.ru](mailto:barkhatov@bsu.edu.ru)

**СНЕГИНА**

Елена Андреевна

ФГАОУ ВО НИУ БелГУ, [snegina@bsu.edu.ru](mailto:snegina@bsu.edu.ru)

**Ключевые слова:**

питание  
урбанизированная  
территория  
*Pelophylax ridibundus*  
Белгород

**Аннотация:** Известно, что в городских ландшафтах часто происходят резкие изменения природных условий, которые могут негативно сказываться на жизнеспособности обитающих здесь популяций. Это в свою очередь вызывает сокращение биоразнообразия в целом. Одним из эффективных методов анализа степени деградации экосистемы является изучение трофических связей животных. Особый интерес в этом отношении вызывают бесхвостые земноводные, в частности зеленые лягушки, которые являются толерантными к антропогенному прессу и часто используются в качестве биоиндикаторов. Одним из таких видов является озерная лягушка (*Pelophylax ridibundus*). Данный вид обладает высокой экологической пластичностью и часто заселяет как антропогенно измененные, так естественные ландшафты. В работе представлены данные о пищевых предпочтениях озерной лягушки в условиях урбанизированных территорий г. Белгорода. На основе проведенного исследования 46 желудков было выявлено, что наиболее предпочтительными объектами питания являются представители отрядов Перепончатокрылые (Hymenoptera, в 43 % желудков), двукрылые (Diptera, 32.6 %), жуки (Coleoptera, 30 %), а также личинки различных насекомых (28 %). Кроме того, в желудках присутствовали представители отряда Полужесткокрылые (Hemiptera), а также Брюхоногие моллюски (Gastropoda), Дождевые черви (Lumbricina) и Стрекозы (Odonata), Мокрицы (Oniscidea), Уховертки (Dermaptera), Поденки (Ephemeroptera). Несмотря на присутствие в изучаемой популяции разновозрастных особей, следов каннибализма обнаружено не было. Полученные данные свидетельствуют о хорошей кормовой базе у изученного вида, несмотря на антропогенную трансформацию прибрежных биотопов.

© Петрозаводский государственный университет

**Рецензент:** Г. А. Лада

**Рецензент:** С. М. Ляпков

**Получена:** 15 декабря 2020 года

**Подписана к печати:** 15 июня 2021 года

## Введение

В изолированных городских биотопах изменение физико-химических показателей воды, воздуха и почв приводит к перестройке пищевых цепей, что, в свою очередь, обуславливает необходимость их подробного изучения (Бутов, Хицова, 2003). Известно, что земноводные являются важными компонентами биоценозов. Выступая в качестве консументов, они представляют собой связующее звено в трофических цепях между водной и наземной частями биоценозов, благодаря чему их часто используют в качестве биоиндикаторов для экологических исследований (Рыжов, 2007; Кузовенко, 2018а). Это дает возможность, с одной стороны, выявить степень и интенсивность воздействия неблагоприятных факторов, а с другой – проследить временную и пространственную динамику деградации экосистем (Пескова, 2002; Спирина, 2007).

Известно, что структура экосистем формируется одновременно с процессами адаптации организмов к меняющимся условиям среды с целью максимального использования ресурсов экологических ниш. При этом организмам для выживания и успешного воспроизводства необходима энергия в виде пищевых ресурсов. У земноводных одной из адаптаций к обитанию в урбанизированных ландшафтах является изменение трофических связей и пищевого рациона (Моисеенко, 2011; Кузовенко, 2018б).

Изучению спектра питания бесхвостых земноводных посвящено большое количество публикаций (Красавцев, 1941; Жукова, 1973; Шляхтин, 1985; Кузьмин, 1999; Рыжов, 2007; Ручин, Алексеев, 2008; Кузьмин, 2012). Также, в частности, имеется ряд работ, посвященных особенностям экологии озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* как наиболее массового вида в прибрежных сообществах Восточной Европы (Вершинин, 1997; Бутов, Хицова, 2003; Никашин, 2007; Файзулин, 2008; Файзулин и др., 2010, 2012; Кулакова и др., 2011; Кузовенко 2018б; Лада и др., 2018). Однако на территории юга Среднерусской возвышенности, где расположен г. Белгород, подобные детальные исследования проводятся впервые.

Целью нашей работы явилось изучение пищевой специализации озерной лягушки (*Pelophylax ridibundus* Pallas, 1771) в условиях урбанизированного ландшафта г. Белгорода.

## Материалы

Материалом для исследования послужили сборы содержимого желудков озерной лягушки *Pelophylax ridibundus*, обитающей в реке Везелка г. Белгорода (50°35'34.5"N 36°34'25.2"E), в зоне многоэтажной застройки. Сбор материала осуществляли в летне-осенний период в утренние часы матерчатым сачком.

Работы с исследуемыми животными проводились в соответствии с международными этическими стандартами (Липатов и др., 2019). После отлова лягушек усыпляли эфиром для предотвращения процессов переваривания в желудках. Желудок извлекали и помещали в чашку Петри, затем острыми ножницами осторожно вскрывали. Содержимое желудка помещали на предметное стекло, высушивали или завязывали в марлю для хранения в 70 % спирте для дальнейшего анализа (Шляхтин, Голикова, 1986). Всего исследовано 46 желудков. Параллельно проводили взвешивание внутренних органов и вычисляли их индексы (для применения метода морфофизиологических индикаторов), а также брали образцы тканей для генетического анализа (с помощью аллозимов и ДНК-фрагментов) и оценки уровня повреждения ядерной ДНК методом ДНК-комет. Результаты приведены в предыдущих публикациях (Снегин, Бархатов, 2019; Snegin et al., 2019).

Определение видовой принадлежности пищевых объектов вели с помощью соответствующих определителей (Определитель..., 1964, 1965; Медведев, 1978). В силу сложности определения некоторых экземпляров до вида приходилось ограничиваться определением до рода, а в некоторых случаях – до семейства или отряда. Далее вычисляли два показателя: встречаемость в желудках – отношение количества встреч в желудках к количеству изученных желудков, а также встречаемость среди экземпляров добычи – отношение количества особей данного вида к общему количеству всех съеденных особей (Щербак, 1989).

## Результаты

Согласно полученным данным, представленным на рис. 1, на первом месте по проценту встречаемости стоит отряд Hymenoptera – 43 %. Наиболее часто встречаются муравьи из семейства Formicidae – 26 %, относящиеся к двум подсемействам Formicinae – 11 % и Myrmicinae – 11 %, а именно: черный муравей-древоточец (*Camponotus vagus* Scopoli,



Рис. 1. Встречаемость различных видов корма в желудках озерной лягушки  
 Fig. 1. The occurrence of different types of food in the stomachs of the *Pelophylax ridibundus*

1763) род *Camponotus*, бурый садовый муравей (*Lasius alienus* Förster, 1850), черный садовый муравей (*Lasius niger* Linnaeus, 1758), песчаный муравей (*Formica imitans* Ruzsky, 1902) и луговой муравей (*Formica pratensis* Retzius, 1783). Такой же процент (26 %) встречаемости имеют осы, которые представлены подсемействами: дорожные осы (Pompilidae) – 2 %, общественные осы (Vespidae) – 7 %. Среди них наиболее часто встречались оса лесная (*Dolichovespula sylvestris* Scopoli, 1763) и оса германская (*Vespa germanica* Fabricius, 1793), семейство роющие осы (Sphecidae) – 4.3 %. Неопознанные осы составили 7 % от всех съеденных животных.

Семейство пчелиных (Apidae) составило 11 %, представлено в основном пчелой медоносной (*Apis mellifera* L., 1758). Кроме того, отмечены пчелы семейства Megachilidae и относящиеся к нему пчелы рода *Megachile*.

Второе место по представленности в сборах занимает отряд Двукрылые (Diptera) – 32.6 %. Среди них наиболее часто встречались представители семейства Журчалки (Syrphidae) – 17 %, значительно меньше особей из семейств Тахины (Tachinidae) – 2 % и Комары-долгоножки (Tipulidae) – 4.3 %. Неопознанные мухи составили 15 %, а неопознанные остальные двукрылые – 7 %.

На третьем месте находится отряд Жесткокрылые или Жуки (Coleoptera) – 30 %.

Наиболее часто встречаемые представители семейства Жужелицы (Carabidae) – 15 %, включающие в себя род Скакуны (*Cicindela*), род Жужелицы-бегуны (*Ophonus*), Жужелица хлебная (*Zabrus tenebrioides* Goeze, 1777), Тусляк бронзовый (*Amara aenea* De Geer, 1774). Реже в желудках встречаются Листоеды (Chrysomelidae) – 7 % с такими представителями, как Козявка тысячелистниковая (*Galeruca tanacetii* L., 1758) и Жук колорадский (*Leptinotarsa decemlineata* Say, 1824). Мертвоеды (Silphidae) обнаружены всего в одном желудке: Мертвояд темный (*Silpha obscura* L., 1758), Мертвояд ребристый (*Silpha carinata* Herbst, 1783), единичные находки: Плавунцы (Dytiscidae), Долгоносики (Curculionidae) и Усачи (Cerambycidae). Неопознанные жуки составили 9 %.

Четвертое место занимают личинки насекомых – 28 %, среди них преобладают личинки жуков (13 %) и личинки стрекоз (7 %). Также отмечены одна личинка мухи, личинка многоножки и две гусеницы.

Отряд Полужесткокрылые (Hemiptera) на пятой позиции – 22 %. Из них отмечены особи из семейств Водомерки (Gerridae), Настоящие щитники (Pentatomidae), Клопы-охотники (Nabidae), Тли (Aphididae), Цикады (Cicadidae).

На шестом месте Паукообразные (Arachnida) – 20 %. Они представлены сле-

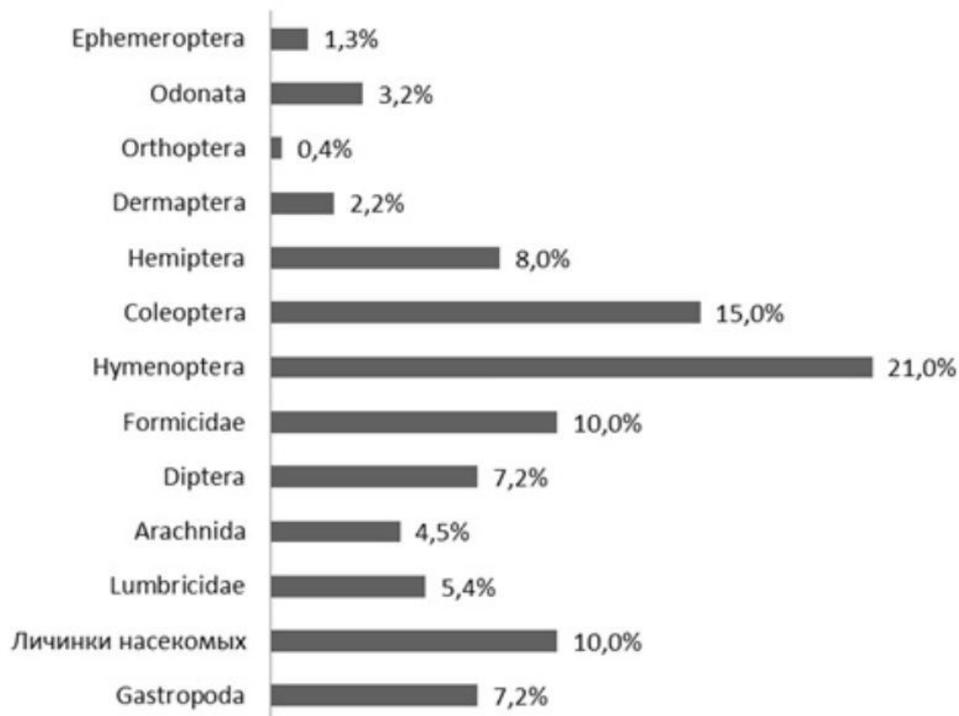


Рис. 2. Доля особей разных систематических групп в рационе озерной лягушки  
Fig. 2. Share of individuals from different systematic groups in the lake frog diet

дующими таксонами: Пауки-крестовики (*Araneus*), Пауки-волки (*Lycosidae*), Пауки-тетрагнатиды (*Tetragnathidae*) и Линифии (*Linyphiidae*).

Меньшим количеством представлены Брюхоногие моллюски (*Gastropoda*) – 17 %. Это Янтарки (*Succinea*), Улитка лысеющая (*Euomphalia strigella* Draparnaud, 1801), Прудовики (*Lymnaea*) и Полевой слизень (*Deroceras agreste* Linnaeus, 1758). Из брюхоногих больше всего слизней – 9 %.

Представленностью менее 15 % отмечены следующие таксоны: Дождевые черви (*Lumbricina*) и Стрекозы (*Odonata*) по 11 %; Мокрицы (*Oniscidea*) – 9 %; Уховертки (*Dermaptera*) – 7%. Отряд Поденки (*Ephemeroptera*) обнаружен в двух желудках – 4.3 %. В одном желудке обнаружена Кобылка из семейства Настоящих саранчовых (*Acrididae*) отряда Прямокрылые (*Orthoptera*).

В количественном отношении из обнаруженных в желудках 223 особей разных видов преобладают: Перепончатокрылые – 21 %, Жуки – 15 % и личинки насекомых – 10 %. Двукрылые и Моллюски составили по 7.2 %, а Клопы – 5.8 %. Реже всего встречались Прямокрылые – 0.4 % (рис. 2). Кроме того, среди жертв озерной лягушки были выявлены и позвоночные животные. Так, у одной самки в желудке обнаружены 22 малька карповых рыб. При этом, несмотря на присутствие в изучаемой популяции разновозрастных особей, следов каннибализма обнаружено не было.

## Обсуждение

Известно, что на увеличение доли водных объектов в рационе *P. ridibundus* оказывает сильное влияние трансформация местообитаний (Зарипова, 2012; Файзулин и др., 2010, 2012). По ранее опубликованным данным, в урбанизированных ландшафтах среди съеденных животных отмечается уменьшение доли водных объектов. Так, в условиях антропогенного пресса в г. Тольятти доля водных объектов варьировала от 24.2 до 37.3 % (Файзулин и др., 2010), в г. Самаре – от 14.6 до 55.8 %, при этом в зоне многоэтажной застройки доля водных животных составила 14.3 % (Кузовенко и др., 2017). Однако на территории Предуралья, в Республике Баш-

кортостан в промышленной зоне (пункт «Таналык»), наоборот, было отмечено преобладание водных кормовых объектов – 79.74 % (Зарипова и др., 2013).

По данным, полученным в результате нашего исследования, доля наземных животных в рационе питания озерной лягушки составила 86.7 %, что значительно превзошло долю водных объектов (13.3 %).

Кроме того, по данным ряда исследователей, в рационе объекта исследования часто преобладают брюхоногие моллюски (*Gastropoda*) (Никашин, 2007; Файзулин и др., 2010; Лада и др., 2018). В нашем исследовании в рационе *P. ridibundus* наиболее предпочитаемыми видами корма у озерной лягушки являются представители отрядов Перепончатокрылые, Двукрылые, Жуки и личинки насекомых, что, вероятно, является следствием доминирования этих животных в прибрежных биоценозах района исследования.

## Заключение

Таким образом, несмотря на высокий уровень антропогенного пресса, на территории г. Белгорода у озерной лягушки наблюдается широкий спектр питания. Между тем полученные данные свидетельствуют, что в условиях изучаемого урбанизированного ландшафта в рационе наблюдается небольшое содержание определенных групп беспозвоночных животных, таких как представители отряда Прямокрылые (*Orthoptera*, была единичная находка). Также обращает на себя внимание отсутствие среди съеденных особей представителей отряда Чешуекрылые (*Lepidoptera*). Видится, что результаты проведенного исследования в будущем позволят оценить степень изменения кормового рациона озерной лягушки, что позволит составить представление о возможных изменениях в фауне прибрежных ценозов. Кроме того, известно, что в популяциях *Pelophylax ridibundus* часто присутствуют гибридные особи *Pelophylax esculentus* (L., 1758) и изучение спектров питания этого сложного гибридного комплекса (*Pelophylax esculentus* complex) позволит во многом определить особенности его экологической специализации в условиях юга Среднерусской возвышенности.

## Библиография

- Бутов Г. С., Хицова Л. Н. Особенности питания земноводных и пресмыкающихся в антропогенных биотопах г. Воронежа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2003. № 2. С. 108–115.
- Вершинин В. Л. Экологические особенности популяций амфибий урбанизированных территорий : Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 1997. 47 с.
- Жукова Т. И. Материалы по питанию озерной лягушки и зеленой жабы // Вопросы экологии позвоночных животных. Краснодар, 1973. С. 16–37.
- Зарипова Ф. Ф. Эколого-фаунистическая характеристика земноводных урбанизированных территорий Республики Башкортостан : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2012. 20 с.
- Зарипова Ф. Ф., Файзулин А. И., Кузовенко А. Е. Особенности питания озерной лягушки в условиях техногенного загрязнения тяжелыми металлами (Республика Башкортостан) // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 4 (1). С. 1279–1282.
- Красавцев Б. А. О нападении озерной лягушки на мелких позвоночных // Природа. 1941. № 1. С. 113–114.
- Кузовенко А. Е. Эколого-фаунистическая характеристика амфибий урбанизированных территорий Самарской области : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2018а. 19 с.
- Кузовенко А. Е. Эколого-фаунистическая характеристика амфибий урбанизированных территорий Самарской области : Дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2018б. 211 с.
- Кузовенко А. Е., Чихляев И. В., Зарипова Ф. Ф., Файзулин А. И. Характеристика устойчивости трофических связей Озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* (pallas, 1771) ((AMPHIBIA, ANURA) в условиях антропогенной трансформации местообитаний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 2. С. 37–44.
- Кузьмин С. Л. Земноводные бывшего СССР . М.: Т-во науч. изд. КМК, 1999. 298 с.
- Кузьмин С. Л. Земноводные бывшего СССР . М.: Т-во науч. изд. КМК, 2012. 370 с.
- Кулакова Е. Ю., Лада Г. А., Резванцева М. В. Питание зеленых лягушек (*Rana esculenta* complex) в смешанной популяционной системе REL-типа в Хоперском заповеднике (Воронежская область) // Вопросы герпетологии: Материалы IV съезда Герпетологического общества имени А. М. Никольского. СПб., 2011. С. 124–128.
- Лада Г. А., Пятова М. В., Холобурдина Е. Ю., Аксенов Д. С. Экологическая дифференциация трех видов зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* complex) в смешанной популяционной системе REL-типа // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. Зоология. 2018. № 3 (23). С. 12–31. DOI: 10.21685/2307-9150-2018-3-2
- Липатов В. А., Северинов Д. А., Крюков А. А., Саакян А. Р. Этические и правовые аспекты проведения экспериментальных биомедицинских исследований *in vivo*. Часть II // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2019. Т. 27, № 2. С. 245–257. DOI: 10.23888/PAVLOVJ2019272245-257
- Медведев Г. С. Определитель насекомых Европейской части СССР. Т. III. Перепончатокрылые / Под ред. Г. С. Медведева. Л.: Наука, 1978. 668 с.
- Моисеенко Т. И. Устойчивость водных экосистем и их изменчивость в условиях токсичного загрязнения // Экология. 2011. № 6. С. 441–448.
- Никашин И. А. Эколого-морфологические признаки популяций озерной лягушки (*Rana ridibunda* Pall.) как средство оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы (на примере Липецкой области) : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Липецк, 2007. 17 с.
- Определитель насекомых Европейской части СССР . Т. I / Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР Г. Я. Бей-Биенко. М.; Л.: Наука, 1964. 845 с.
- Определитель насекомых Европейской части СССР . Т. II / Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР Г. Я. Бей-Биенко. М.; Л.: Наука, 1965. 668 с.
- Пескова Т. Ю. Структура популяций земноводных как биоиндикатор антропогенного загрязнения среды . М.: Наука, 2002. 132 с.
- Ручин А. Б., Алексеев С. К. Материалы к питанию травяной лягушки – *Rana temporaria* (Anura, Amphibia) в Калужской области // Современная герпетология (Саратов). 2008. Т. 8, № 1. С. 62–66.
- Рыжов М. К. Земноводные и пресмыкающиеся Республики Мордовия: распространение, распределение, трофические связи и состояние охраны : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тольятти, 2007. 19 с.
- Снегин Э. А., Бархатов А. С. Морфогенетическая структура популяций озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Amphibia, Anura) в условиях городской среды // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С. 47–53. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-1-047-053
- Спирина Е. В. Амфибии как биоиндикационная тест-система для экологической оценки водной среды обитания : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ульяновск, 2007. 23 с.

- Файзулин А. И. Сезонная динамика трофической ниши популяции озерной лягушки *Rana ridibunda* Pallas, 1771 (Anura, Amphibia) в Среднем Поволжье // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. Т. 10, № 2. С. 452–455.
- Файзулин А. И., Чихляев И. В., Кривошеев В. А., Кузовенко А. Е. Анализ спектра питания озерной лягушки (*Rana ridibunda*) урбанизированных территорий Среднего Поволжья // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 1. С. 126–129.
- Файзулин А. И., Чихляев И. В., Исаева И. Н. О питании прудовой лягушки (*Rana Lessonae*) урбанизированных территорий Среднего Поволжья // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1. С. 139–143.
- Шляхтин Г. В. Трофические ниши совместно обитающих бесхвостых амфибий // Экология. 1985. № 6. С. 24–32.
- Шляхтин Г. В., Голикова В. Л. Методика полевых исследований экологии амфибий и рептилий. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1986. 78 с.
- Щербак Н. Н. Питание // Руководство по изучению земноводных и пресмыкающихся. Киев: Киевская книжная типография научной книги, 1989. С. 128–132.
- Snegin E. A., Barkhatov A. S., Snegina E. A. Analysis of the Genetic Structure of the Populations of Marsh Frog (*Pelophylax Ridibundus*) in the Impact Territories of the City of Belgorod on the Basis of Microsatellite Markers of DNA // Advances in Biological Sciences Research (1st International Symposium Innovations in Life Sciences (ISILS 2019)). 2019. Vol. 7. P. 300–302.

# PECULIARITIES OF NUTRITION OF THE LAKE FROG (*PELOPHYLAX RIDIBUNDUS* PALLAS, 1771) IN THE URBANIZED TERRITORY OF THE CITY OF BELGOROD (RUSSIA)

**SNEGIN** *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education*  
**Eduard Anatolevich** «Belgorod National Research University», [snegin@bsu.edu.ru](mailto:snegin@bsu.edu.ru)

**BARKHATOV** *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education*  
**Anatoly Sergeevich** «Belgorod National Research University», [barkhatov@bsu.edu.ru](mailto:barkhatov@bsu.edu.ru)

**SNEGINA** *Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education*  
**Elena Andreevna** «Belgorod National Research University», [snegina@bsu.edu.ru](mailto:snegina@bsu.edu.ru)

## Keywords:

marsh frog  
nutrition  
urban environment  
Belgorod

**Summary:** It is known that urban landscapes often experience abrupt changes in environmental conditions, which can have a negative impact on the viability of the populations that live here. This in turn causes a reduction in biodiversity in general. One of the most effective methods of analyzing the degree of ecosystem degradation is the study the trophic relationships of animals. Of particular interest in this regard are tailless amphibians, in particular green frogs, which are tolerant to anthropogenic pressures, and are often used as bioindicators. One such species is the marsh frog (*Pelophylax ridibundus*). This species has a high ecological plasticity and often inhabits both anthropogenically modified and natural landscapes. This paper presents data on food preferences of the marsh frog in conditions of urbanized areas of Belgorod. Based on the study of 46 stomachs, it was revealed that the most preferred food objects are representatives of the orders of Hymenoptera, in 43 % of stomachs, Diptera, in 32,6 %, Coleoptera, in 30 % and also larvae of various insects in 28 %. In addition, representatives of Hemiptera, Gastropoda, Lumbricina, Odonata, Oniscidea, Dermaptera, Ephemeroptera were present in the stomachs. It is worth noting that despite the presence of different-aged individuals in the studied population, no traces of cannibalism were found. The data indicate a good food base of the studied species, despite the anthropogenic transformation of coastal biotops.

**Reviewer:** G. A. Lada

**Reviewer:** S. M. Lyapkov

**Received on:** 15 December 2020

**Published on:** 15 June 2021

## References

- Butov G. S. Hicova L. N. Features of amphibians and reptiles feeding in anthropogenic biotopes of Voronezh, Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya. Biologiya. Farmaciya. 2003. No. 2. P. 108–115.
- Fayzulin A. I. Chihlyayev I. V. Isaeva I. N. On the diet of the lake frog (*Rana ridibunda*) in the urbanization territory of the Middle Volga region, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2012. T. 14, No. 1. P. 139–143.
- Fayzulin A. I. Chihlyayev I. V. Krivosheev V. A. Kuzovenko A. E. The analysis of food spectrum of the lake frog (*Rana ridibunda*) in the urbanization territory of the Middle Volga region, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2010. T. 12, No. 1. P. 126–129.
- Fayzulin A. I. Seasonal dynamics of the trophic niche of the lake frog populations (ANURA, AMPHIBIA) in the Middle Volga, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2008. T. 10, No. 2. P. 452–455.
- Identification guide of insects of the European part of the USSR. T. I, Pod obsch. red. chl, kor. AN SSSR G. Ya. Bey-Bienko. M.; L.: Nauka, 1964. 845 p.

- Identification guide of insects of the European part of the USSR. T. II, Pod obsch. red. chl, kor. AN SSSR G. Ya. Bey-Bienko. M.; L.: Nauka, 1965. 668 p.
- Krasavcev B. A. On the attack of the marsh frog on small vertebrates, Priroda. 1941. No. 1. P. 113–114.
- Kulakova E. Yu. Lada G. A. Rezvanceva M. V. Diet of water frogs (*Rana esculenta* complex) in the mixed REL-population system in the Chopyor Reserve (Voronezh Province), Voprosy gerpetologii: Materialy IV s'ezda Gerpetologicheskogo obschestva imeni A. M. Nikol'skogo. SPb., 2011. P. 124–128.
- Kuz'min S. L. Amphibians of the former USSR. M.: T-vo nauch. izd. KMK, 1999. 298 p.
- Kuz'min S. L. Amphibians of the former USSR. M.: T-vo nauch. izd. KMK, 2012. 370 p.
- Kuzovenko A. E. Chihlyayev I. V. Zaripova F. F. Fayzulin A. I. The characteristics of trophic relations stability of the marsh frog *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) (AMPHIBIA, ANURA) under anthropogenic transformation, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2017. T. 19, No. 2. P. 37–44.
- Kuzovenko A. E. Ecological and faunistic characteristic of amphibians of urbanized territories of the Samara region: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Tol'yatti, 2018a. 19 p.
- Kuzovenko A. E. Ecological and faunistic characteristic of amphibians of urbanized territories of the Samara region: Dip. ... kand. biol. nauk. Tol'yatti, 2018b. 211 p.
- Lada G. A. Pyatova M. V. Holoburdina E. Yu. Aksenov D. S. Ecological differentiation of three species of water frogs (*Pelophylax esculentus* complex) in mixed REL-population system, Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki. Zoologiya. 2018. No. 3 (23). P. 12–31. DOI: 10.21685/2307-9150-2018-3-2
- Lipatov V. A. Severinov D. A. Kryukov A. A. Saakyan A. R. Ethical and legal aspects of conducting experimental biomedical research in vivo. Part II, Rossiyskiy mediko-biologicheskii vestnik imeni akademika I. P. Pavlova. 2019. T. 27, No. 2. P. 245–257. DOI: 10.23888/PAVLOVJ2019272245-257
- Medvedev G. S. SR. T. II. Identification guide of insects of the European part of the USSR. Vol. III, Pod red. G. P. Medvedeva. L.: Nauka, 1978. 668 p.
- Moiseenko T. I. Stability of aquatic ecosystems and their variability under conditions of toxic pollution, Ekologiya. 2011. No. 6. P. 441–448.
- Nikashin I. A. Ecological and morphological characters of marsh frog populations (*Rana ridibunda* Pall.) as a mean of assessing anthropogenic impact on aquatic ecosystems (on the example of the Lipetsk Region): Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Lipeck, 2007. 17 p.
- Peskova T. Yu. The structure of amphibian populations as a bioindicator of anthropogenic pollution. M.: Nauka, 2002. 132 p.
- Ruchin A. B. Alekseev S. K. On *Rana temporaria* (Anura, Amphibia) nutrition in the Kaluga region, Sovremennaya gerpetologiya (Saratov). 2008. T. 8, No. 1. P. 62–66.
- Ryzhov M. K. Amphibians and reptiles of the Republic of Mordovia: Distribution, trophic relationships and state of conservation: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Tol'yatti, 2007. 19 p.
- Scherbak N. N. Nutrition, Rukovodstvo po izucheniyu zemnovodnyh i presmykayuschih. Kiev: Kievskaya knizhnaya tipografiya nauchnoy knigi, 1989. P. 128–132.
- Shlyahin G. V. Golikova V. L. Methodology of field studies of the ecology of amphibians and reptiles. Saratov: Izd-vo Saratovskogo un-ta, 1986. 78 p.
- Shlyahin G. V. Trophic niches of cohabiting tailless amphibians, Ekologiya. 1985. No. 6. P. 24–32.
- Snegin E. A. Barkhatov A. S. Morphogenetic structure of marsh frog populations of *Pelophylax ridibundus* (Amphibia, Anura) under conditions of urban environment, Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2019. No. 1. P. 47–53. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-1-047-053
- Snegin E. A., Barkhatov A. S., Snegina E. A. Analysis of the Genetic Structure of the Populations of Marsh Frog (*Pelophylax Ridibundus*) in the Impact Territories of the City of Belgorod on the Basis of Microsatellite Markers of DNA, Advances in Biological Sciences Research (1st International Symposium Innovations in Life Sciences (ISILS 2019)). 2019. Vol. 7. P. 300–302.
- Spirina E. V. Amphibians as a bioindication test-system for ecological assessment of aquatic habitat: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Ul'yanovsk, 2007. 23 p.
- Vershinin V. L. Ecological characteristics of amphibian populations of urbanized territories: Avtoref. dip. ... d-ra biol. nauk. Ekaterinburg, 1997. 47 p.
- Zaripova F. F. Fayzulin A. I. Kuzovenko A. E. Marsh frog's food habits in conditions of anthropogenic heavy metal pollution (Republic of Bashkortostan), Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tehnicheckie nauki. 2013. T. 18. No. 4 (1). P. 1279–1282.
- Zaripova F. F. Ecological and faunistic characteristics of amphibians in urbanized areas of the Republic of Bashkortostan: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Tol'yatti, 2012. 20 p.
- Zhukova T. I. Materials on the diet of the marsh frog and green toad, Voprosy ekologii pozvonochnyh zhivotnyh. Krasnodar, 1973. P. 16–37.



УДК УДК 595.789(470.51)

## ВИДОВОЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА НАСЕЛЕНИЯ БУЛОВОУСЫХ ЧЕШУЕКРЫЛЫХ (LEPIDOPTERA, PAPILIONOIDEA) НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НЕЧКИНСКИЙ» (УДМУРТСКАЯ РЕСПУБЛИКА)

**ТАТАРИНОВ**  
Андрей Геннадиевич

к. б. н, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), [tatarinov.a@ib.komisc.ru](mailto:tatarinov.a@ib.komisc.ru)

**КУЛАКОВА**  
Оксана Ивановна

к. б. н, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), [kulakova@ib.komisc.ru](mailto:kulakova@ib.komisc.ru)

### Ключевые слова:

булавоусые чешуекрылые  
Закамье  
ландшафтная активность  
видов  
структура населения  
видовое разнообразие

**Аннотация:** В статье представлены результаты натурной инвентаризации видового состава и структуры населения булавоусых чешуекрылых в природных сообществах национального парка «Нечкинский», расположенного на юго-востоке Удмуртской Республики. В июне – июле 2020 г. в Закамском районе парка был зарегистрирован 91 представитель надсемейства (более 70 % состава региональной фауны), еще два вида известны по литературным данным. Были проведены визуальные учеты численности имаго на восьми трансектах в основных типах местообитаний. Установлен высокий уровень видового разнообразия булавоусых чешуекрылых на участках остепненных сосново-широколиственных лесов и суходольных лугах. Отмечено значение видов семиаридного суббореального комплекса для формирования характерной ландшафтно-зональной структуры фауны и пространственно-типологической структуры населения булавоусых чешуекрылых Закамского ландшафтного района. Количественные учеты позволили сформировать представление о ландшафтной активности видов булавоусых чешуекрылых в условиях ограниченного антропогенного воздействия на природные сообщества. Это может послужить основой для оценки состояния популяций и организации мониторинговых наблюдений за динамикой состава и структуры населения булавоусых чешуекрылых на неохраняемых территориях Удмуртской Республики. В ходе полевых работ были выявлены местообитания четырех охраняемых и семи бионадзорных видов, включенных в республиканскую Красную книгу. В том числе подтверждено сохранение в лесных и болотных природных сообществах парка локальных популяций гипоаркто-бореальных видов *Colias palaeno* и *Clossiana eunomia*. По результатам проведенной натурной инвентаризации сделан вывод, что национальный парк «Нечкинский» выполняет важную функцию сохранения состава и структуры типичных и уникальных видовых комплексов, популяций редких видов булавоусых чешуекрылых Удмуртской Республики и всего Вятско-Камского ландшафтного региона.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 18 января 2021 года

Подписана к печати: 15 июня 2021 года

## Введение

Булавоусые или дневные чешуекрылые (надсемейство Papilionoidea) выполняют важную биоценотическую функцию опылителей цветковых растений и объекта питания животных-энтомофагов в большинстве типов наземных природных сообществ от экваториальных лесов до арктических и субантарктических широт. Однако в результате антропогенной трансформации природных ландшафтов, все возрастающей хозяйственной и рекреационной нагрузки на естественные местообитания многие виды в настоящее время стали редкими или оказались на грани исчезновения. В то же время изменяется пространственно-типологическая структура населения булавоусых чешуекрылых по причине снижения удельного веса в топических группировках традиционных фоновых видов, «выпадения» из состава малочисленных дифференцирующих видов при одновременном увеличении встречаемости и обилия различного рода супернеобионтов. В связи с этим важное значение приобретает натурная инвентаризация фауны и населения Papilionoidea на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Общеизвестно, что природные заповедники, национальные парки, заказники и памятники природы разного профиля являются одним из наиболее действенных способов сохранения малонарушенных ландшафтов, природных сообществ и отдельных компонентов биологического разнообразия. Сведения о составе, численности и экологии объектов животного и растительного мира, в том числе булавоусых чешуекрылых, полученные на основе натурной инвентаризации, имеют большое значение для повышения эффективности управления системой ООПТ разного профиля, а также могут служить в качестве эталона при оценке состояния популяций и сообществ видов и планировании природоохранных мероприятий на территориях, испытывающих ту или иную степень антропогенной нагрузки.

Изученность булавоусых чешуекрылых Удмуртской Республики надо признать достаточно высокой. Первые сведения появились еще в конце XIX – начале XX в. (Круликовский, 1888, 1913), и к настоящему времени, во многом благодаря работам Д. А. Адаховского (2001, 2005, 2010, 2019), удалось сформировать цельное представление о составе, таксономической и ареалогической структуре региональной фауны, фенологии

и ландшафтно-биотопическом распределении видов. Это создало базу для проведения детальных эколого-географических исследований данного надсемейства в масштабе локальных фаун, в том числе на ООПТ.

В настоящее время сеть ООПТ Удмуртской Республики насчитывает 309 природных объектов федерального, регионального и местного значения общей площадью 362 тыс. га (Особо охраняемые..., 2002). Одним из них является национальный парк «Нечкинский», где на 20752 га сосредоточено около 70 % биологического разнообразия, сохраняются эталонные и уникальные лесные, пойменные, болотно-озерные природные комплексы Среднего Прикамья. Булавоусые чешуекрылые здесь ранее специально не изучались.

Цель данной статьи – представить первый обзор фауны и населения булавоусых чешуекрылых Закамского района национального парка «Нечкинский» в качестве основы многолетних мониторинговых наблюдений за динамикой состава, численности и биотопического размещения видов на данной территории.

## Материалы

Натурная инвентаризация фауны и населения булавоусых чешуекрылых национального парка «Нечкинский» проводилась в июне – июле 2020 г. в Закамье на территории Нечкинского лесничества. Структура местных топических группировок и пространственное распределение видов изучались методом количественных учетов имаго видов на трансектах (Pollard, Yates, 1993; Малков, 1994). Были заложены восемь учетных трансект в основных типах местообитаний Papilionoidea во всех функциональных зонах (заповедной, особо охраняемой, рекреационной, хозяйственного назначения) данного района национального парка (рис. 1). Их длина колебалась от 100 до 200 м в зависимости от рельефа и мозаики местообитаний на местности. Так как количественные учеты велись в основном вдоль существующих дорог, лесных просек и прогалин, лесотаксационных визиров и пожарных разрывов, фактическая ширина трансект равнялась 10–15 м. Состав локальной фауны и территориальное размещение видов изучались также в ходе регулярных экскурсий вдоль стариц, лесных ручьев, в болотных местообитаниях и на участках в излучине р. Камы, непосредственно прилегающих к границам национального парка. Для выявления состава видов весен-

него, поздневесеннего и позднелетнего фенологических аспектов по классификации Д. А. Адаховского (2001), которые находились в период проведения полевых работ на тех или иных стадиях преимагинального развития, применялся метод кошения энтомологическим сачком, ручной сбор яиц, гусениц и куколок с кормовых растений и другого субстрата (стволов, ветвей, листьев деревьев и кустарников, цветков, поверхности почвы и

т. п.). Также были проведены сборы имаго булавоусых чешуекрылых на правом берегу Камы в окрестностях населенных пунктов Новый, Гольяны, Макарово, Нечкино. Полевые работы проводились ежедневно. За 25 дней на учетных трансектах и в ходе фаунистических экскурсий пройдено более 60 км, визуально зарегистрировано и собрано разными способами 1032 экз. имаго, гусениц и куколок 91 вида.

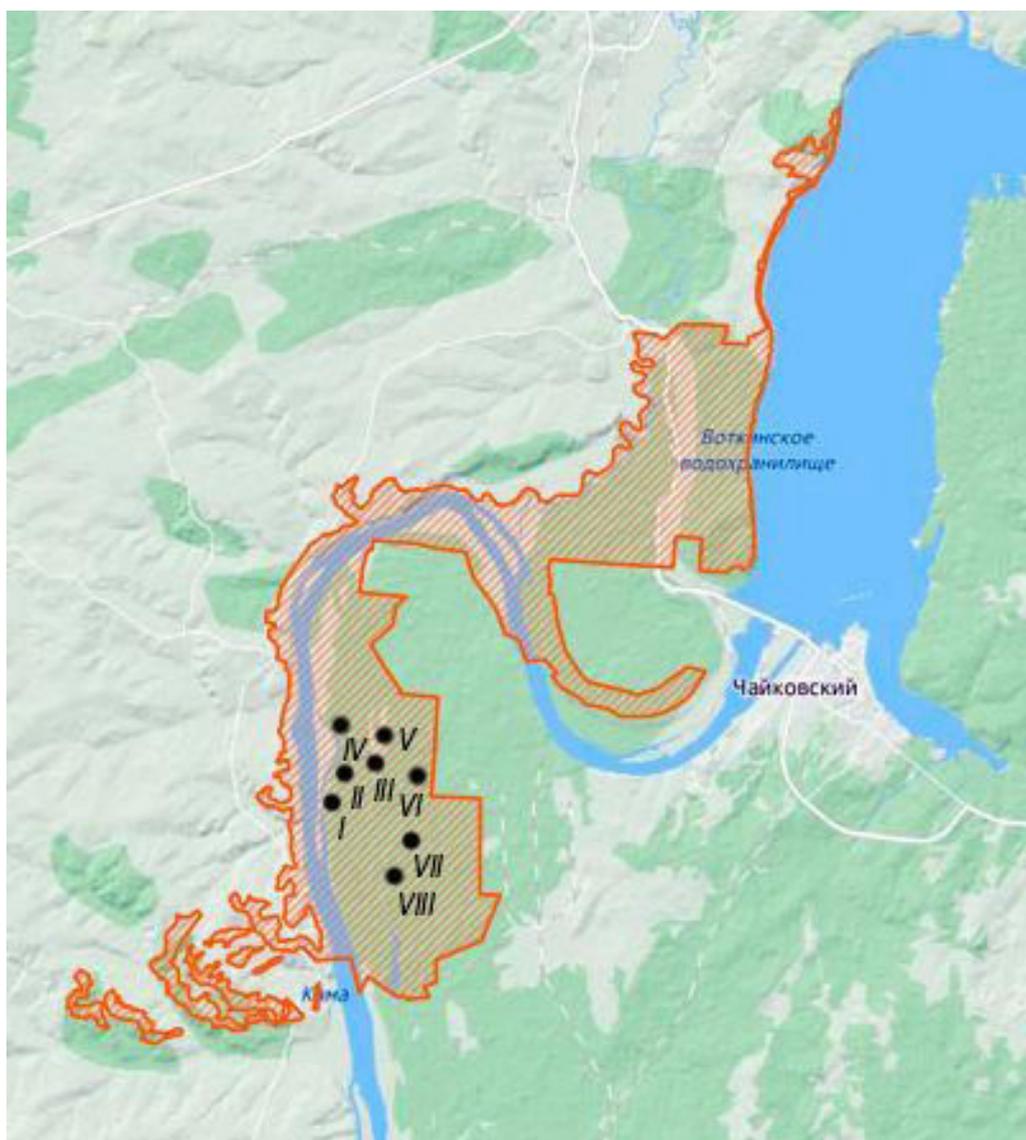


Рис. 1. Карта-схема района исследований. Красным контуром очерчены границы национального парка «Нечкинский». Черными точками обозначены места проведения количественных учетов булавоусых чешуекрылых на трансектах. Римскими цифрами обозначены участки местности, на которых были заложены трансекты для количественного учета видов с привязкой к функциональным зонам и кварталам (кв.) Нечкинского лесничества (по данным официального сайта национального парка <http://nechkinsky.ru>): I – кв. 86 (часть), 87 в зоне хозяйственного назначения, кв. 21, 22, 26, 27, 33 в особо охраняемой зоне; II – кв. 13, 86 (часть) в зоне хозяйственного назначения, кв. 14, 17, 18 в рекреационной зоне; III – кв. 6, 9, 10 в рекреационной зоне; IV – кв. 3, 4, 7 в рекреационной зоне, кв. 86 в особо охраняемой зоне; V – кв. 5, 6, 10 в рекреационной зоне, 1, 2 в особо охраняемой зоне; VI – кв. 11, 12, 15, 16, 19, 20 в рекреационной зоне; VII – 29, 30, 35, 36, 41, 42 в заповедной зоне, VIII – кв. 49, 50, 53, 54 в заповедной зоне

Fig. 1. Map of the study area. The boundaries of the Nezhkinsky National Park are outlined in red. Black dots I–VIII indicate the areas where censuring of butterfly species was carried out on transects.

## Методы

Материалы по численности булавоусых чешуекрылых на участках в данной статье представлены по пятибалльной ограниченной сверху логарифмической шкале относительного обилия видов, согласно которой массовые виды имеют балл 5 (в изучаемой локальной фауне их нет), многочисленные – 4, обычные – 3, малочисленные и единичные – 2 и 1 соответственно (Песенко, 1982). Совокупность многочисленных (доминирующих по численности, балл 4) и обычных (субдоминантных, балл 3) видов здесь именуется «фоновыми видами».

По итогам учетов численности и встречаемости видов в основных местообитаниях была определена их ландшафтная активность в исследованном районе национального парка. Ландшафтная активность вида – оценка встречаемости (обычности) и среднего обилия (массовости) вида с учетом мозаичности или гомогенности его распределения в локальных фаунах. Данное понятие предложено и используется авторами статьи по аналогии с флористическим понятием (Татаринов, Кулакова, 2020). По уровню ландшафтной активности все виды булавоусых чешуекрылых дифференцированы по пятибалльной шкале на: 1 – неактивные, 2 – низкоактивные, 3 – среднеактивные, 4 – высокоактивные, 5 – особо активные. Количественные критерии оценки ландшафтной активности представлены в табл. 1. Определение ландшафтной активности видов с использованием количественных показателей

их обилия и встречаемости в природных сообществах снижает уровень субъективности экспертных мнений о состоянии популяций булавоусых чешуекрылых, позволяет адекватно сравнить его на охраняемых и неохранных территориях, представить обобщающие оценки уровня и пространственно-временной динамики видового разнообразия надсемейства на крупных и неоднородных по природным условиям регионах.

Оценка инвентаризационного разнообразия ( $\alpha$ -разнообразия) видов булавоусых чешуекрылых в обследованных местообитаниях дана по числу выявленных видов ( $S$ ) и с помощью широко применяющихся в экологических исследованиях индексов видового богатства Маргалёфа ( $D_{Mg}$ ) и выравненности Симпсона ( $1-D_{Sm}$ ) и Бергера – Паркера ( $d$ ). Дифференцирующее (или  $\beta$ -разнообразие) характеризовалось путем попарного сравнения состава и численности видов на трансектах. В качестве показателя соответствия использовался индекс Чекановского – Сьеренсена для количественных данных, дендрограмма сходства построена методом средневзвешенного присоединения. Формулы использованных индексов и обоснование их применения можно найти в литературе (Песенко, 1982; Magurran, 1988; Hubalek, 2000 и др.). Математические расчеты проведены с помощью компьютерной программы Past v.3 (Hammer et al., 2001).

Научная номенклатура видовых и надвидовых таксонов чешуекрылых представлена по «Каталогу чешуекрылых России» (2019) с незначительными изменениями.

Таблица 1. Показатели ландшафтной активности видов булавоусых чешуекрылых

Балл, категории и критерии оценки ландшафтной активности видов		
1	Неактивный	Находки единичных экземпляров вида за весь период исследований, на основе которых невозможно определить его популяционную структуру и характер территориального размещения в данном географическом пункте
2	Низкоактивный	Малочисленный (относительное обилие в топических группировках до 5 %) вид, заселяющий менее 10 % свойственных ему местообитаний
3	Среднеактивный	Немногочисленный (относительное обилие в топических группировках 5–10 %) вид, заселяющий в локалитете не менее 50 % свойственных ему местообитаний
4	Высокоактивный	Многочисленный (относительное обилие выше 15 %) или среднеобильный (10–15 %) вид, входящий в состав «фонового ядра» топических группировок в большинстве (не менее 75 %) свойственных ему местообитаний
5	Особо активный	Безусловно лидирующий по численности и встречаемости вид. Относительное обилие в топических группировках не менее 20 %

## Результаты

За период исследований в Нечкинском лесничестве национального парка был обнаружен 91 вид булавоусых чешуекрылых на разных стадиях развития (табл. 2). Еще два вида – перламутровки *Argynnis laodice* (Pall.), *Clossiana selenis* (Ev.) – известны из литературы (Красная книга..., 2012). Это более 70 % состава фауны Papilionoidea Удмуртской Республики (Круликовский, 1888; Адаховский, 2010) и оценочно около 90 % состава фауны Закамского ландшафтного района, к кото-

рому относится обследованная территория (Рысин, 1996). Полевые наблюдения позволяют вполне обоснованно утверждать, что около 80 видов здесь являются коренными (оседлыми) обитателями с независимыми или зависимыми, но структурно сложившимися популяционными группировками. О статусе обитания остальных видов по материалам одного года исследований судить сложно, но оценка ландшафтной активности позволяет относить их к регулярным или нерегулярным сезонным мигрантам и ксенобионтам.

Таблица 2. Относительное обилие и ландшафтная активность булавоусых чешуекрылых в Закамской части национального парка «Нечкинский»

Название семейства, вида, показатели разнообразия	Участок, балл относительного обилия								ЛА	СО	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
Papilionidae											
<i>Papilio machaon</i> L.	2									2	М
<i>Iphiclides podalirius</i> (L.)**					1					1	М
Pieridae											
<i>Leptidea sinapis</i> (L.)	2*	2*					1*			3*	К
<i>Pieris brassicae</i> (L.)							1			1	КС
<i>P. napi</i> (L.)	3	2	3	2	3	2	2	1		4*	К
<i>P. rapae</i> (L.)		3		1	3	3	2	1		4*	К
<i>Pontia daplidice</i> (Fabr.)	2		2				2			2	К
<i>Aporia crataegi</i> (L.)		1					2			2	К
<i>Anthocharis cardamines</i> (L.)	2*	2*			2*					3*	К
<i>Euchloe ausonia</i> (Hbn.)			2*		2*					2*	К
<i>Colias hyale</i> (L.)		2			2					2	К
<i>C. myrmidone</i> (Esp.)		1	2		3			2		2	К
<i>C. palaeno</i> (L.)**									1	2*	К
<i>Gonepteryx rhamni</i> (L.)	+				1*					3*	К
Lycaenidae											
<i>Fixsenia pruni</i> (L.)	3	2		2						2	К
<i>Nordmannia ilicis</i> (Esp.)***	1									2	К
<i>N. w-album</i> (Knoch)	1			2						2	К
<i>Callophrys rubi</i> (L.)	2*	2*								3*	К
<i>Lycaena phlaeas</i> (L.)		3			3			2		3	К
<i>L. hippothoe</i> (L.)		1			1					2	К
<i>L. virgaureae</i> (L.)		3		3	4	3	2			3	К
<i>L. tityrus</i> (Poda)			2		1					2	К
<i>L. alciphron</i> (Rott.)		2	3		3	3	2			3	К
<i>L. dispar</i> (Haw.)	1		1							2	К
<i>Cupido argiades</i> (Pall.)		2*								3*	К
<i>Celastrina argiolus</i> (L.)	2*	1*		2*						3*	К
<i>Glaucopsyche alexis</i> (Poda)					2					2	К
<i>Maculinea arion</i> (L.)**					1	1				1	К
<i>Plebeius argus</i> (L.)	4	4	4	4	5	4	2	2		4	К
<i>P. idas</i> (L.)	3	4	4	4	3	4	3	2		4	К
<i>Vacciniina optilete</i> (Knoch)	3	4	4	4	4	3	4	3		4	К
<i>Scolitantides orion</i> (Pall.)**			1				2			2	К
<i>Aricia artaxerxes</i> (F.)	2		2				2			2	К
<i>Eumedonia eumedon</i> (Esp.)	2		1	2						2	К
<i>Polyommatus amandus</i> (Schn.)		2	3		3	2	3			3	К
<i>P. icarus</i> (Rott.)	2	2	3	3	3	2	3			3	К
<i>Cyaniris semiargus</i> (Rott.)	2	3	2	3	3	3	3	1		3	К
Nymphalidae											
<i>Apatura ilia</i> (Den. et Schiff.)	3	3	3	3	3	3				3	К
<i>A. iris</i> (L.)	3	2		3	2	3	2			3	К
<i>Limenitis camilla</i> (L.)	3	2	3	4			3	2		3	К
<i>L. populi</i> (L.)	1			2						2*	К
<i>Neptis sappho</i> (Pall.)***	2	4	3	4	2	3	3	1		3	К

Таблица 2. Продолжение

Название семейства, вида, показатели разнообразия	Участок, балл относительного обилия								ЛА	СО	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
<i>Nymphalis antiopa</i> (L.)	1*						+			3*	К
<i>N. urticae</i> (L.)	2*	+	1*				+	+	+	4*	К
<i>N. io</i> (L.)	+		+		+	+	+			3*	К
<i>Polygonia c-album</i> (L.)			2*				1		+	3*	К
<i>Vanessa atalanta</i> (L.)							1			1	М
<i>V. cardui</i> (L.)	1	2					1	2		2	М
<i>Araschnia levana</i> (L.)	+		+				+	+		3*	К
<i>Euphydryas maturna</i> (L.)				1						1	КС
<i>Melitaea diamina</i> (Lang)				1	2					2	К
<i>M. didyma</i> (Esp.)			3		3					3	К
<i>M. athalia</i> (Rott.)		3	4	4	4	3	2	1		3	К
<i>M. cinxia</i> (L.)			1		1					2	К
<i>M. brithomartis</i> Assm.		3	4	3	4	4	+			4	К
<i>M. phoebe</i> ([Den. et Schiff.])				2	2					2	К
<i>Argynnis paphia</i> (L.)	1					2*	1*	1*		3*	К
<i>Speyeria aglaja</i> (L.)			3		4	3	3	1		3	К
<i>Fabriciana adippe</i> (Rott.)		3	4	2	4	3	2			3	К
<i>F. niobe</i> (L.)		4	4	4	4	4	3	2		4	К
<i>Issoria lathonia</i> (L.)					2*	2*				3*	К
<i>Brenthis daphne</i> ([Den. et Schiff.])		2			2	2				2	К
<i>B. ino</i> (Rott.)	3	2	3	3	3	2	1	2		3	К
<i>Clossiana eunomia</i> (Esp.)**								1		1	К
<i>C. titania</i> (Esp.)***								1		1	КС
<i>C. dia</i> (L.)		1	2		2					2	К
<i>C. euphrosyne</i> (L.)	2	4	2	2	2	3	2	2		3	К
<i>C. selene</i> ([Den et Schiff.])	3	3	4	3	4	4	4	2		4	К
Satyridae											
<i>Melanargia russiae</i> (Esp.)						1				1	М
<i>Pararge aegeria</i> (L.)***				1						1	КС
<i>Lopinga achine</i> (Scop.)***	3	2	2	3	1	2	2	2		2	К
<i>Lasiommata maera</i> (L.)	4	4	4	4	4	4	4	3		4	К
<i>L. petropolitana</i> (F.)		2	2			2	2			2	К
<i>Coenonympha arcania</i> (L.)***	2	3	2	1	2	3	2			3	К
<i>C. glycerion</i> (Brkh.)	4	4	4	4	4	4	4	4		4	К
<i>C. hero</i> (L.)		2	1		1	2	1			2	К
<i>C. tullia</i> (Müll.)							2	2		2	К
<i>Maniola jurtina</i> (L.)			2			2				2	К
<i>Hyponephele lycaon</i> (Rott.)			2		3	2				2	К
<i>Aphantopus hyperantus</i> (L.)	4	4	4	4	4	4	4	4		4	К
<i>Erebia aethiops</i> (Esp.)**		1								1	КС
Hesperiidae											
<i>Muschampia tesselum</i> (Hbn.)	2	1								2	К
<i>P. malvae</i> (L.)	3	3	3			3				3	К
<i>P. serratulae</i> (Ramb.)		1	2		2					2	К
<i>Heteropterus morpheus</i> (Pall.)			2		2					2	К
<i>Carterocephalus silvicola</i> (Meig.)	1		1							1	К
<i>C. palaemon</i> (Pall.)	2		2							2	К
<i>Ochlodes sylvanus</i> (Esp.)	2	3	3	4	3	2	3	2		3	К
<i>Hesperia comma</i> (L.)	1	2			1					2	К
<i>Thymelicus lineola</i> (Ochs.)			3	3	3	3				3	К
<i>Th. sylvestris</i> (Poda)		1	2		1	1				2	К

Примечание. ЛА – балл ландшафтной активности (см. табл. 1). СО – предполагаемый статус обитания: к – коренной вид, м – регулярный или нерегулярный мигрант, кс – ксенобионт. + – виды, найденные на одной из преимагинальных стадий развития и количественно не учитывавшиеся в сборах. \* – данные по обилию и предварительная оценка ландшафтной активности для видов, у которых в период исследований уже заканчивался лёт имаго (весенне-раннелетний фенологический аспект) или только начинался (позднелетне-осенние виды). \*\* – охраняемый вид, включенный в Красную книгу Удмуртской Республики (2012). \*\*\* – подлежащий мониторингу вид, включенный в Приложение 2 Красной книги Удмуртской Республики (2012).

Большие площади в Закамском районе национального парка «Нечкинский» заняты сухими сосновыми лесами с хорошо развитым и разнообразным травянистым покровом. В составе подлеска и густого разнотравья этих насаждений встречаются неморальные и лесостепные элементы флоры. В древостое присутствуют широколиственные породы (липа, дуб), значительна примесь ели и березы. Сосняки, ранее пройденные сплошными, выборочными рубками и низовыми пожарами, возобновляются через липу и осину. Такие сложные по структуре остепненные сосново-широколиственные насаждения распространены преимущественно в рекреационной зоне, чередуются здесь с разнотравными суходолами и таким образом формируют сеть характерных опушечно-лесных и луговых местообитаний с богатым населением булавоусых чешуекрылых (Адаховский, 2000, 2010; Особо охраняемые..., 2002). На суходольных разнотрав-

ных лугах с липовой и осиновой порослью и разнотравных опушках подрастающих производных сосняков (учетные трансекты III, V, прилегающие к границам парка участки в излучине р. Камы) лидируют (по возрастанию численности) сенница *Coenonympha glycerion*, шашечница *Melitaea britomartis*, перламутровка *Fabriciana niobe*, голубянка *Plebeius idas*. В состав фоновых видов также входят голубянка *Plebeius argus*, перламутровки *Clossiana selene*, *Fabriciana adippe*, шашечница *Melitaea athalia*. Дифференцирующими видами, найденными только в данных биотопах, являются шашечницы *Melitaea didyma*, *M. phoebe*, *M. cinxia*, белянка *Euchloe ausonia*, червонцы *Lycaena tityrus*, голубянка *Scolitantides orion*, толстоголовка *Heteropterus morpheus*. По показателям видового богатства и выравненности видов по численности это самые разнообразные топические группировки булавоусых чешуекрылых локальной фауны (табл. 3).

Таблица 3. Показатели инвентаризационного разнообразия булавоусых чешуекрылых в Закамской части национального парка «Нечкинский»

Индекс разнообразия	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$S$	44	50	52	35	53	51	38	26
$D_{mg}$	9.047	10.768	10.255	6.751	10.573	10.180	8.508	6.546
$1-D_{sm}$	0.971	0.978	0.977	0.975	0.978	0.976	0.972	0.951
$d$	0.048	0.032	0.031	0.047	0.037	0.033	0.036	0.083

Примечание. I–VIII – см. рис. 1.

Разнотравные ассоциации из крупных злаков, зонтичных, сложноцветных, норичниковых, бобовых растений, сформировавшиеся на полянах и опушках лесных насаждений после пожаров и выборочных рубок (учетные трансекты II, VI, экскурсионные ходы), в большой численности заселены сатиридами *Lasiommata maera*, *Aphantopus hyperantus*, *Coenonympha glycerion*, весьма обильны здесь и голубянки *Plebeius idas*, *Vacciniina optilete*, червонец *Lycaena virgaureae*, толстоголовки *Ochlodes sylvanus*, *Pyrgus malvae*. К характерным видам данных местообитаний можно отнести пеструшку *Neptis sappho*, сенниц *Coenonympha hero*, *C. arcania*, перламутровку *Clossiana euphrosyne*, в других биотопах они встречаются значительно реже и в меньшей численности. Можно предположить, что здесь обычны еще белянки *Leptidea sinapis*, *Pieris napi*, *P. rapae*, *Anthocharis cardamines*, *Gonepteryx rhamni*, голубянки *Callophrys rubi*, *Cupido argiades*, *Celastrina argiolus*, пестрокрыльница *Araschnia levana*,

входящие в состав весеннего и поздневесеннего фенологических аспектов лета имаго (Адаховский, 2005). Уровень видового разнообразия булавоусых чешуекрылых данных местообитаний не уступает описанным выше опушкам остепненных сосняков и суходольных лугов и является одним из самых высоких в исследуемом районе Закамья.

В понижениях рельефа, вдоль водотоков, по берегам ручьев и стариц развиты насаждения высокоствольных сосен, елей, берез с заметной примесью липы, дуба, кустарниковым ярусом из черемухи, рябины, различных ив и богатым крупнотравным покровом (учетные трансекты I, IV, экскурсионные ходы). Они служат местообитаниями прежде всего лесным гелио- и сциомезофильным видам булавоусых чешуекрылых. В период исследований здесь в обилии встречались ленточник *Limenitis camilla*, сатириды *Lasiommata maera*, *Aphantopus hyperantus*, весьма обычны были крупноглазка *Lopinga achine*, хвостатка *Fixsenia pruni*, перелив-

ницы *Apatura ilia*, *A. iris*, перламутровка *Brenthis ino*. Только в данных биотопах были обнаружены немногочисленные и единичные особи хвостаток *Nordmannia ilicis*, *N. w-album*, червонца *Lycaena hippothoe*, краеглязки *Pararge aegeria*, ленточника *Limenitis populi*, перламутровки *Argynnis raphia*. Два последних вида на территории Нечкинского лесничества должны встречаться чаще и в большей численности, пик лёта имаго у них, очевидно, наблюдался после окончания наших полевых работ. Косвенным подтверждением этому предположению могут служить находки здесь зрелых гусениц и куколок перламутровки *A. raphia*. Число и обилие видов, предпочитающих открытые опушечные и луговые местообитания, на данных участках заметно ниже, у многих из них были отмечены лишь единичные особи имаго на пролете вдоль лесных просек и дорог, на цветущих травах и кустарниках или возле луж и на влажной почве. Соответственно уровень инвентаризационного разнообразия Papilionoidea, установленный по результатам количественных учетов видов, оказался здесь относительно невысоким.

Заповедная зона Закамского района национального парка в основном занята малонарушенными сосновыми и сосново-широколиственными лесными насаждениями. Количественные учеты на заложенных здесь трансектах (VII, VIII) ожидаемо выявили значительно меньшее число видов булавоусых чешуекрылых, чем на открытых участках рекреационной зоны, и даже уступили по показателям инвентаризационного разнообразия лесным приручьевым и пойменным лесным местообитаниям. Густой древостой, сильная затененность и относительно небогатый флористический состав цветущих трав делают данные местообитания малопривлекательными для дневных бабочек. Здесь виды концентрируются вдоль лесотаксационных визиров, лесных просек, бывших лесовозных дорог. Чаще всего встречаются те же лесные гелио- и сциомезофилы: переливницы *Apatura ilia*, *A. iris*, крупноглазка *Lopinga achine*, а также повсеместно обильные сатириды *Lasiommata maera*, *Aphantopus hyperantus*. Можно предположить, что основу позднелетнего и весеннего аспекта имаго в подобных местообитаниях формируют зимующие опушечно-лесные нимфалиды *Nymphalis antiopa*, *Polygonia c-album*, лимонница *Gonepteryx rhamni*, находившиеся в период полевых работ на преимагинальных стадиях развития.

Анализ дифференцирующего разнообразия кластерным методом выявил вполне предсказуемую картину соотношения топических группировок булавоусых чешуекрылых в рамках одной локальной фауны. На дендрограмме на уровне сходства около 45 % обособилось обедненное население Papilionoidea лесных насаждений заповедной зоны (рис. 2). Ожидается проявилась тесная связь (сходство около 80 %) богатых видами группировок открытых ксерофитных местообитаний (трансекты III, V), к ним присоединились группировки видов опушечно-лесного разнотравья, также характеризующиеся относительно высокими показателями инвентаризационного разнообразия. Наконец, четко отделились группировки видов, заселяющих околопойменные и приручьевые лесные местообитания.

#### Обсуждение

При обобщении полученных сведений по численности и встречаемости видов в разных типах местообитаний, лежащих в основе оценки их ландшафтной активности, можно представить следующий «таксономический портрет» фауны булавоусых чешуекрылых Закамского района национального парка «Нечкинский». Повсеместно по численности и встречаемости лидируют широко лесные и температурные интрастенозональные виды. Это прежде всего сатириды *Lasiommata maera*, *Coenonympha glycerion*, *Aphantopus hyperantus*, высокая ландшафтная активность наблюдается у голубянок *Plebeius idas*, *P. argus*, перламутровки *Clossiana selene*. В общий фоновый состав видов можно уверенно включить червонца *Lycaena virgaureae*, перламутровок *Fabriciana adippe*, *Brenthis ino*, ландшафтная активность которых здесь оценена нами как средняя. Высокая численность на разнотравных суходолах перламутровки *Fabriciana niobe*, шашечниц *Melitaea britomartis*, *M. athalia* также делает их одними из самых характерных видов рассматриваемой локальной фауны. Особо в этом ряду отметим голубянку *Vacciniina optilete*, которая входила в состав доминантов и субдоминантов по численности практически на всех обследованных участках, включая остепненное разнотравье, подобная относительная эвритопность в целом по ареалу не характерна для данного вида.

Период проведения полевых работ не позволил оценить в полной мере численность и встречаемость в Закамском районе национального парка белянок *Leptidea sinapis*, *Pieris napi*, *P. rapae*, нимфалид

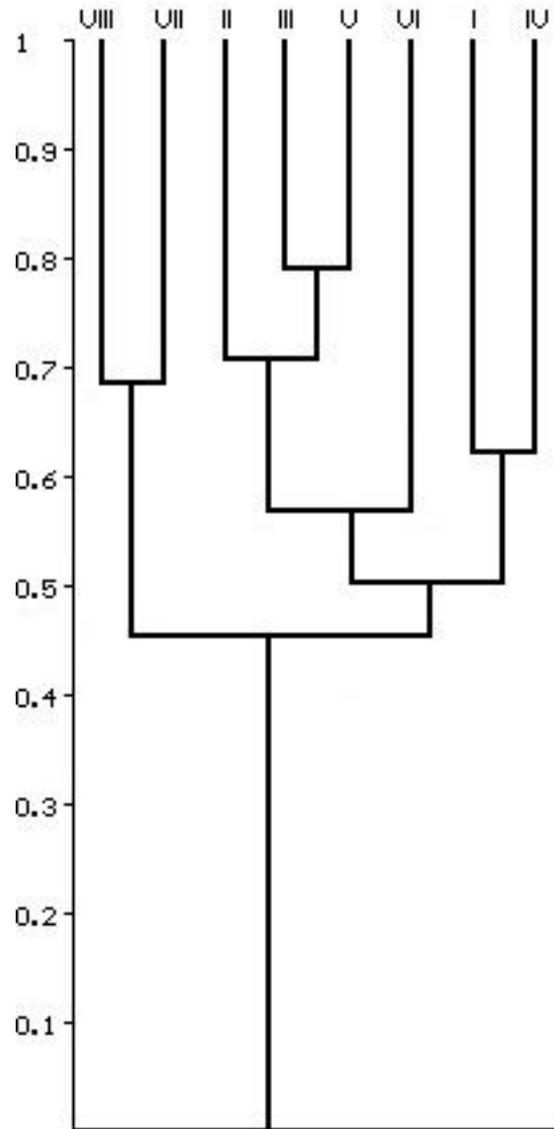


Рис. 2. Дендрограмма сходства состава булавоусых чешуекрылых с учетом обилия видов исследованных местообитаний Закамского района национального парка «Нечкинский». I–VIII – см. рис. 1

Fig. 2. Dendrogram of the similarity of the composition of butterflies, taking into account the abundance of species of the studied habitats in the Zakamsky district of the Nechkinsky National Park. I–VIII - see in the fig. 1

*Nymphalis urticae*, *N. io*, *N. antiopa*, *Polygonia c-album*, *Araschnia levana*, которые являются заметным элементом большинства локальных и зональных фаун умеренного пояса Русской равнины. Общие данные по ареалам, находки особей на преимагинальных стадиях развития (выводки гусениц, куколки) позволяют уверенно предполагать, что названные виды и здесь характеризуются высокой и средней ландшафтной активностью.

Выраженная мозаичность биотопов и сеть линейных ходов (просеки, дороги, визиры), связывающих различные участки в Закамской части национального парка, во

многом способствуют нивелированию различий между местными топическими группировками булавоусых чешуекрылых. Тем не менее общий тренд изменчивости состава и структуры доминирования видов прослеживается. Центром видовой разнообразия Papilionoidea является рекреационная зона на севере лесничества, где большие площади заняты суходольными лугами в сочетании с подрастающими остепненными сосново-широколиственными лесами. Кроме значительного числа широко распространенных температурных видов здесь обитает ряд ксерофильных чешуекрылых, зона экологического оптимума которых располагает-

ся в семиаридных районах суббореального географического подпоояса. Это немногочисленный, но очень значимый дифференцирующий компонент ландшафтно-зональной структуры закамской фауны Papilionoidea. Ландшафтная активность белянки *Euchloe ausonia*, желтушки *Colias myrmidone* в Закамье предсказуемо оказалась низкой или средней, как у шашечницы *Melitaea didyma*, тем не менее нет никаких сомнений, что в данном районе эти виды образуют устойчивые жилые популяции. В качестве мигранта отмечена нами сатирида *Melanargia russiae*, хотя тенденция к расселению на север этого вида позволяет ставить вопрос о смене его миграционного статуса обитания в полосе подтаежных лесов Русской равнины на резидентный. Впервые роль степных видов в формировании населения булавоусых чешуекрылых сосновых лесов Удмуртии отметил Д. А. Адаховский (2000). Наши наблюдения подтвердили и выявленную этим автором тесную связь с местными сухими сосняками пеструшки *Neptis sappho*: на протяжении своего ареала данный вид предпочитает прирубьевые и пойменные кустарниковые и древесные насаждения (Коршунов, 2002; Львовский, Моргун, 2007).

К югу открытые сухоходольные местообитания постепенно сменяются малонарушенными сосновыми и сосново-широколиственными лесными насаждениями охраняемой и заповедной зоны Нечкинского лесничества. Уровень разнообразия булавоусых чешуекрылых здесь заметно снижается, прежде всего по показателям числа и обилия постоянных видов. Для большинства зарегистрированных особей это лишь транзитные территории, не подходящие для обитания на протяжении всего жизненного цикла. Сравнительно небогатый видовой состав луговых и опушечно-лесных местообитаний в пойме и вдоль стариц надо объяснять, очевидно, сильными разливами в излучине р. Камы в период весеннего половодья. Косвенно это подтверждается отсутствием сформированного населения булавоусых чешуекрылых на обширных заливных лугах низкого левого берега, что заставило отказаться от проведения здесь количественных учетов видов.

Особо охраняемые природные территории играют важнейшую роль в сохранении генофонда редких и исчезающих растений, грибов и животных. При современном уровне трансформации природных сообществ и ландшафтов, перспективах и темпе хозяйственного развития регионов поддержание

численности популяций большинства видов, включенных в Красные книги субъектов Российской Федерации, возможно только посредством сетей ООПТ. В Красную книгу Удмуртской Республики (2012) включено 14 охраняемых видов булавоусых чешуекрылых, еще 19 видов подлежат мониторингу и рекомендованы для бионадзора. В национальном парке «Нечкинский» ранее были зарегистрированы шесть охраняемых видов, из которых в Закамском районе мы выявили четыре вида. Парусник *Iphiclides podalirius* здесь, возможно, не имеет жилых популяционных группировок, и все отмеченные бабочки кочевали с правобережья Камы или со стороны г. Чайковский. Единичные особи желтушки *Colias palaeno* и перламутровки *Clossiana eunomia* обнаружены в заповедной зоне Нечкинского лесничества (учетная трансекта VIII). Есть все основания полагать, что в данной местности на соседних сфагновых болотах сохраняются малочисленные локальные популяции этих гипоаркто-бореальных видов. Подтверждено присутствие в Закамье голубянки *Maculinea arion*, которая ранее указывалась для ближнего правобережья р. Камы: несколько экземпляров вида были зарегистрированы нами на разнотравных суходолах в рекреационной зоне и прилегающих к границам парка участках речной излучины. Нельзя исключать, что здесь будет найдена и другая краснокнижная голубянка этого рода – *Maculinea nausithous*, которая указывается для Камбарского района республики (Редкие..., 2011; Красная книга..., 2012). Это предположение косвенно подкрепляется находкой чернушки *Erebia aethiops*, она также ранее приводилась для южного Закамья. Отсутствие в сборах краснокнижных перламутровок *Argynnis laodice* и *Clossiana selenis* мы объясняем их малочисленностью и сроками проведения полевых работ, не совпавших с периодом активности имаго этих видов. Наконец, имеющиеся материалы о распространении на сопредельных с национальным парком территориях парусника *Driopa mnemosyne* и перламутровки *Clossiana thore* дают основание предполагать, что в ходе дальнейших исследований могут быть выявлены локальные местонахождения этих редких видов и в Закамье, во всяком случае подходящие для них местообитания и кормовые растения гусениц здесь имеются.

Помимо охраняемых краснокнижных видов булавоусых чешуекрылых в Закамской части национального парка «Нечкинский»

в ходе полевых исследований были найдены семь видов, подлежащих бионадзору. Состояние численности местной популяции пеструшки *Neptis sappho* можно оценить как не вызывающее опасений. Такую же оценку мы склонны дать и в отношении сатириды *Lopinga achine*, *Coenonympha arcania*, хотя они не отличаются здесь высокой ландшафтной активностью. У остальных видов – хвостатки *Nordmannia ilicis*, перламутровки *Clossiana titania*, шашечницы *M. cinxia*, краглазки *Pararge aegeria* – выявлены только единичные особи, но это, скорее всего, связано с условиями сбора материала, и в Закамье у этих чешуекрылых также сформировались немногочисленные, но устойчивые популяционные группировки. В связи с этим данные виды требуют повышенного внимания и мониторинговых наблюдений. Кроме того, желательнее организовать регулярные наблюдения за местными жилыми популяциями хвостаток *Fixsenia pruni*, *Nordmannia w-album*, червонцев *Lycaena alciphron*, *L. tytirus*, переливниц *Apatura ilia*, *A. iris*, ленточников *Limenitis camilla*, *L. populi*, шашечниц *Euphydryas maturna*, *Melitaea diamina*, *M. didyma*, *M. phoebe*, толстоголовок *Pyrgus serratulae*, *Heteropterus morpheus*. Перечисленные виды стали редкими во многих районах Русской равнины и включены в Красные книги ряда субъектов Российской Федерации, в том числе и соседних с Удмуртской Республикой. Их состояние в Закамской части национального парка «Нечкинский» не вызывает опасений, поэтому полученные здесь материалы натуральных наблюдений можно будет активно использовать для разработки рекомендаций по восстановлению и поддержанию численности этих видов в экосистемах с высокой степенью антропогенной нагрузки.

## Заключение

В Закамской части национального парка «Нечкинский» в общей сложности зарегистрировано 93 вида булавоусых чешуекрылых из шести семейств. Анализ литературных данных по Удмуртской Республике

(Адаховский, 2001, 2019) и сопредельным областям (Шернин, Чарушина, 1974; Мигранов, 1991; Шулаев и др., 2005) позволяет заключить, что состав этой локальной фауны выявлен на 75–80 %, возможно нахождение еще около 10 видов, сроки лёта которых не совпали с периодом проведенных полевых работ, являются очень редкими или не образуют здесь постоянных популяций.

В целом можно констатировать, что природоохранный статус национального парка «Нечкинский» способствует сохранению уникального многообразия ландшафтно-зональных и географических элементов фауны булавоусых чешуекрылых, сложившегося в рамках Закамского локалитета. В роли лимитирующих факторов численности популяций видов, в том числе включенных в региональную Красную книгу (2012), здесь может выступать вытаптывание людьми почвенно-растительного покрова при сборе лесных дикоросов и организации рекреационных мероприятий на природе, а также беспокойство бабочек и пылевое загрязнение их местообитаний при движении автотранспорта по грунтовым дорогам в вегетационный период. Однако степень этой антропогенной нагрузки даже в рекреационной и хозяйственной зонах нельзя назвать высокой.

Собранный материал по фауне и пространственно-типологической структуре населения булавоусых чешуекрылых может послужить основой для начала регулярных наблюдений за составом, численностью и территориальным размещением видов в условиях ограниченного антропогенного воздействия на природные сообщества. Чтобы повысить значение национального парка «Нечкинский» для формирования Единой государственной системы экологического мониторинга, необходимо принять более действенные меры по организации постоянного контроля за состоянием и динамикой популяций краснокнижных видов булавоусых чешуекрылых, на постоянной основе вести работу по выявлению и контролю лимитирующих факторов внешней среды.

## Библиография

- Адаховский Д. А. Ареалогическая структура и зонально-региональные особенности фауны булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Rhopalocera) Удмуртии // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2010. Вып. 2. С. 16–25.
- Адаховский Д. А. Булавоусые чешуекрылые (Lepidoptera, Rhopalocera) сосновых лесов Удмуртии // Актуальные проблемы биологии и экологии: Тез. докл. VII Молодежной научн. конф. 18–20 апреля 2000 г., Сыктывкар. Сыктывкар, 2000. С. 5.
- Адаховский Д. А. Дополнение к фауне дневных чешуекрылых (Lepidoptera: Hesperioidea, Papilionoidea) Удмуртии и Кировской области с замечаниями по фауне Вятско-Камского

- междуречья в целом // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29. Вып. 4. С. 544–548.
- Адаховский Д. А. Итоги и перспективы эколого-фаунистических исследований булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Rhopalocera) // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2001. № 7. С. 125–131.
- Адаховский Д. А. Фенологические особенности булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Rhopalocera) Удмуртии // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2005. № 10. С. 71–80.
- Каталог чешуекрылых (Lepidoptera) России . Издание 2 / Ред. С. Ю. Синёв. СПб.: Зоол. институт РАН, 2019. 448 с.
- Коршунов Ю. П. Булавоусые чешуекрылые Северной Азии . М.: Товарищество научных изданий КМК, 2002. 424 с.
- Красная книга Удмуртской Республики . Изд. 2-е / Под. ред. О. Г. Барановой. Чебоксары: Перфектум, 2012. 458 с.
- Круликовский Л. К. К сведениям о фауне чешуекрылых Вятской губернии. Чешуекрылые окрестностей г. Сарапула // Записки Уральского общества любителей естествознания. Екатеринбург, 1888. Т. XI. С. 203–233.
- Круликовский Л. К. Чешуекрылые Вятской губернии . М., 1913. 122 с.
- Львовский А. Л., Моргун Д. В. Булавоусые чешуекрылые Восточной Европы . М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. 443 с.
- Малков Ю. П. К методике учета булавоусых чешуекрылых // Животный мир Алтае-Саянской горной страны. Горно-Алтайск, 1994. С. 33–36.
- Мигранов М. Г. Булавоусые чешуекрылые Башкирии . Уфа, 1991. 192 с.
- Особо охраняемые природные территории Удмуртской Республики / Гл. ред. Н. П. Соловьева; Науч. ред. О. Г. Баранова, А. Г. Илларионов. Ижевск: Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Удмуртской Республике: Государственный природоохранный центр, 2002. 211 с.
- Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях . М.: Наука, 1982. 288 с.
- Редкие и исчезающие виды растений и животных южной половины Удмуртии и их охрана: Итоги научных исследований (2005–2011 годы) / О. Г. Баранова и др. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2011. 272 с.
- Рысин И. И. Физико-географическое (ландшафтное) районирование Удмуртии // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 1996. № 3. С. 131–150.
- Татаринов А. Г., Кулакова О. И. Ландшафтная и региональная активность булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Rhopalocera) восточноевропейской Гипоарктики // Известия Коми научного центра УрО РАН. Сер. «Экспериментальная биология и экология». Сыктывкар, 2020. № 3 (43). С. 15–27. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-3-15-27
- Шернин А. И., Чарушина А. Н. Чешуекрылые // Животный мир Кировской области. Киров, 1974. Т. 2. С. 351–477.
- Шулаев Н. В., Петров Н. Г., Шулаев М. В. Булавоусые чешуекрылые Татарстана: Аннотированный список видов . Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. 40 с.
- Hubalek Z. Measures of species diversity in ecology: an evaluation // Folia Zool. 2000. Vol. 49, № 4. P. 241–260.
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. Paleontological Statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4 (1). P. 1–9.
- Magurran A. E. Ecological Diversity and Its Measurement. London and New York: Springer, 1988. 114 p.
- Pollard E., Yates T. J. Monitoring butterflies for ecology and conservation. The British butterfly monitoring scheme. London: Chapman & Hall, 1993. 274 p.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам национального парка «Нечкинский» и персонально В. В. Машкиной за содействие в организации полевых работ.

# SPECIES COMPOSITION AND STRUCTURE OF POPULATION OF BUTTERFLIES (LEPIDOPTERA, PAPILIONOIDEA) IN THE NECHKINSKY NATIONAL PARK (UDMURT REPUBLIC)

**TATARINOV**  
Andrey Gennadyevich

*PhD, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), tatarinov.a@ib.komisc.ru*

**KULAKOVA**  
Oksana Ivanovna

*PhD, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), kulakova@ib.komisc.ru*

**Keywords:**  
butterflies  
Zakamye  
landscape species  
activity  
population structure  
species diversity

**Summary:** The article presents the results of a full-scale inventory of the species composition and population structure of the butterflies in natural communities of the Nechkinsky national park. It is located in the south-east of the Udmurt Republic. In June – July 2020, 91 representatives of the superfamily (more than 70% of the regional fauna) were registered in the Zakamsky district of the park, and two more species are known from the literature. Visual censuring of the number of imago was carried out on eight transects in the main types of habitats. A high level of species diversity of butterflies was established in areas of steppe pine-broad-leaved forests and dry meadows. We noted the significance of the species of the semiarid sub-boreal complex for the formation of the characteristic landscape-zonal structure of the fauna, as well as the spatial-typological structure of the population of butterflies of the Zakamsky landscape region. Quantitative surveys allowed us to form an idea of the landscape activity of butterfly species in conditions of limited anthropogenic impact on natural communities. The results of our research can serve as a basis for assessing the state of populations and organizing monitoring observations of the dynamics of the composition and structure of the population of butterflies in the unprotected territories of the Udmurt Republic. During the field work, the habitats of four protected and seven bio-monitored species included in the republican Red Book were identified. In particular, the conservation of local populations of hypo-arctic-boreal species, such as *Colias palaeno* and *Clossiana eunomia*, was confirmed in the forest and bog natural communities of the park. Based on the results of the field inventory, it was concluded that the Nechkinsky national park performs an important function of preserving the composition and structure of typical and unique species complexes, populations of rare species of lepidopterans of the Udmurt Republic and the entire Vyatka-Kama landscape region.

**Received on:** 18 January 2021

**Published on:** 15 June 2021

## References

- Adahovskiy D. A. Arealogical structure and zonal-regional features of the Butterfly fauna (Lepidoptera, Rhopalocera) of the Udmurt Republic, Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle. 2010. Vyp. 2. P. 16–25.
- Adahovskiy D. A. Butterflies (Lepidoptera, Rhopalocera) of the pine forests of Udmurtia, Aktual'nye problemy biologii i ekologii: Tez. dokl. VII Molodezhnoy nauchn. konf. 18–20 aprelya 2000 g., Syktyvkar. Syktyvkar, 2000. P. 5.
- Adahovskiy D. A. Phenological features of butterflies (Lepidoptera, Rhopalocera) Udmurt Republic, Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle. 2005. No. 10. P. 71–80.
- Adahovskiy D. A. Results and prospects of ecological and faunal studies of butterflies (Lepidoptera, Rhopalocera), Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle. 2001. No. 7. P. 125–131.

- Adahovskiy D. A. Supplement to the fauna of diurnal lepidoptera (Lepidoptera: Hesperioidea, Papilionoidea) of Udmurtia and the Kirov region with comments on the fauna of the Vyatka-Kama interfluvium as a whole, *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle*. 2019. T. 29. Vyp. 4. P. 544–548.
- Catalogue of the Lepidoptera of Russia. Izdanie 2, Red. P. Yu. Sinev. SPb.: Zool. institut RAN, 2019. 448 p.
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. Paleontological Statistics software package for education and data analysis, *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4 (1). P. 1–9.
- Hubalek Z. Measures of species diversity in ecology: an evaluation, *Folia Zool.* 2000. Vol. 49, No. 4. P. 241–260.
- Korshunov Yu. P. Butterflies of the Northern Asia. M.: *Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK*, 2002. 424 p.
- Krulikovskiy L. K. Lepidoptera of the Vyatka province. M., 1913. 122 p.
- Krulikovskiy L. K. On the fauna of Lepidoptera of Vyatka province. I. Lepidoptera of the vicinity of Sarapul, *Zapiski Ural'skogo obschestva lyubiteley estestvoznaniya*. Ekaterinburg, 1888. T. XI. P. 203–233.
- L'vovskiy A. L. Morgun D. V. Butterflies of Eastern Europe. M.: *Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK*, 2007. 443 p.
- Magurran A. E. *Ecological Diversity and Its Measurement*. London and New York: Springer, 1988. 114 p.
- Malkov Yu. P. To the method of censuring of butterflies, *Zhivotnyy mir Altae-Sayanskoy gornoy strany. Gorno-Altaysk*, 1994. P. 33–36.
- Migranov M. G. *Butterflies of Bashkiria*. Ufa, 1991. 192 p.
- Pesenko Yu. A. *Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies*. M.: Nauka, 1982. 288 p.
- Pollard E., Yates T. J. *Monitoring butterflies for ecology and conservation. The British butterfly monitoring scheme*. London: Chapman & Hall, 1993. 274 p.
- Rare and endangered species of plants and animals of the southern part of Udmurtia and their protection: Results of scientific research (2005–2011), O. G. Baranova i dr. Izhevsk: Udmurtskiy un-t, 2011. 272 p.
- Red Data Book of the Udmurt Republic. Izd. 2-e, Pod. red. O. G. Baranovoy. Cheboksary: Perfektum, 2012. 458 p.
- Rysin I. I. Physico-geographical (landscape) zoning of the Udmurt Republic, *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle*. 1996. No. 3. P. 131–150.
- Shernin A. I. Charushina A. N. Lepidoptera, *Zhivotnyy mir Kirovskoy oblasti*. Kirov, 1974. T. 2. P. 351–477.
- Shulaev N. V. Petrov N. G. Shulaev M. V. Butterflies of Tatarstan: Annotated listing of species. Kazan': ZAO «Novoe znanie», 2005. 40 p.
- Specially protected natural territories of the Udmurt Republic, Gl. red. N. P. Solov'eva; Nauch. red. O. G. Baranova, A. G. Illarionov. Izhevsk: Glavnoe upravlenie prirodnih resursov i ohrany okruzhayushey sredy MPR Rossii po Udmurtskoy Respublike: Gosudarstvennyy prirodoohrannyy centr, 2002. 211 p.
- Tatarinov A. G. Kulakova O. I. Landscape and regional activity of butterflies (Lepidoptera, Rhopalocera) of the Eastern European Hypoarctic, *Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN. Ser. «Eksperimental'naya biologiya i ekologiya»*. Syktyvkar, 2020. No. 3 (43). P. 15–27. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-3-15-27



УДК 630\*41

## ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ АВАРИЙНОСТИ ДЕРЕВЬЕВ В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ

**РУМЯНЦЕВ**  
Денис Евгеньевич

*доктор биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана, МО, Мытищи, 1-я Институтская, д. 1, ЛТ-2, dendro15@list.ru*

**ФРОЛОВА**  
Вера Алексеевна

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана, МО, Мытищи, 1-я Институтская, д. 1, ЛТ-6, frolova.vera@gmail.com*

**Ключевые слова:**  
аварийные  
деревья  
ядровая гниль  
фитопатология  
лесопатология

**Аннотация:** Выявление аварийных деревьев является актуальной практической задачей, которая в первую очередь значима для условий урбанизированной среды. Методическая база для решения данной задачи начала формироваться достаточно давно, но в силу биологических ограничений данный вопрос не может быть решен однозначно и в настоящее время. В статье рассматриваются существующие подходы к выявлению аварийных деревьев, обсуждаются биологические предпосылки их использования и возможные ограничения. Показано, что аварийность деревьев может обуславливаться рядом экологических и физиологических условий, среди которых наиболее велико практическое значение уровня развития скрытой стволовой гнили. Однако парусность кроны и характер ветровой нагрузки на ствол дерева в ландшафтном комплексе могут обуславливать разную аварийность ствола при одинаковом уровне динамической ветровой нагрузки. Аварийность дерева слабо связана с его лесопатологическим состоянием, для полноценного выявления аварийных деревьев возможна только инструментальная диагностика. Обсуждаются методы инструментальной диагностики и снижения аварийности. В качестве характерного примера приводятся результаты выявления аварийных деревьев в одном из парков Московской области по данным диагностики уровня развития стволовой гнили с помощью бурава Пресслера

© Петрозаводский государственный университет

**Рецензент:** С. В. Залесов  
**Рецензент:** Н. С. Иванова  
**Рецензент:** Е. В. Колтунов

**Получена:** 23 ноября 2020 года

**Подписана к печати:** 18 июня 2021 года

### Введение

Диагностика аварийных деревьев – ответственное и сложное мероприятие. Прежде всего потому, что это вероятностный процесс. Упасть может любое дерево, однако вероятность этого события может быть разной. В 1823 г. известный американский писатель Джеймс Фенимор Купер опубликовал роман «Пионеры, или У истоков Саскуихан-

ны» (Купер, 1981). Он любопытен как исторический документ, отражающий практические представления тех лет о механизмах устойчивости стволов деревьев: «Внезапное падение дерева – самое опасное явление в лесу, потому что его нельзя предусмотреть, – сказал Мармадьюк. – Оно происходит не из-за сильного ветра и не по какой-либо другой видимой причине. Причина падения деревьев, судья Темпл, совершенно очевид-

на, – сказал шериф, – дерево состарилось, постепенно ослабело от морозов, подгнило, и его центр тяжести уже не приходится на середину основания дерева – в таком случае оно непременно падает... Не подходи близко к корням гнилого дерева, и ты в безопасности» (Купер, 1981). С момента написания романа Купера прошло уже почти 200 лет, но с тех пор мало что изменилось. Деревья все также продолжают падать и приносить разрушения, иногда и с опасными для здоровья людей последствиями. И все также единственным способом борьбы с этой угрозой является избегание соседства с потенциально аварийными деревьями, их своевременное выявление и удаление.

Актуальность выявления аварийных деревьев хорошо демонстрируют последствия урагана в Москве и Московской области 29 мая 2017 г. Ураганом были причинены сильные разрушения построек, повреждения автотранспорта, помимо этого более 40 человек обратились в медицинские учреждения с сильными травмами, число слабых травм не поддается учету, но самое главное, были и смертельные исходы. Основной причиной этих разрушительных действий были упавшие деревья, и в первую очередь деревья, пораженные гнилью в сильной степени.

Действующие «Правила санитарной безопасности в лесах» (2017) стали подразумевать выявление при лесопатологическом обследовании насаждений такой категории деревьев, как аварийные (балл 7). К ним относятся «деревья со структурными изъянами (наличие дупел, гнилей, обрыв корней, опасный наклон), способными привести к падению всего дерева или его части и причинению ущерба населению или государственному имуществу и имуществу граждан». Данная по сути верная характеристика при практической интерпретации может допускать разночтения в трактовках при определении категории состояния конкретного дерева. Это делает актуальным совершенствование, детализацию методик выявления аварийных деревьев.

Деревья являются необходимым компонентом урбанизированной среды, выполняя важные экосистемные функции (Румянцев, Фролова, 2019; Wolf et al., 2020). Полностью избавиться от них в городской среде мы никогда не сможем, и поэтому регулярное формирование аварийных деревьев является и будет являться «неизбежным злом» для городского коммунального хозяйства. Потребность в выявлении аварийных деревьев

существует, во многих случаях она предписана законодательно.

Целью данного обзора является анализ существующих методов выявления аварийности деревьев и биологических предпосылок для их применения. Данный обзор актуален, т. к. общепринятой методики выявления аварийных деревьев, по нашему мнению, в настоящее время не существует.

## Материалы

Материалы статьи базируются на обзоре литературных источников, а также многолетнем опыте диагностики аварийных деревьев с помощью нескольких методов: визуальных, с использованием бурава Пресслера, с использованием специализированного оборудования фирмы РИНТЕХ (приборы РЕЗИСТОГРАФ, АРБОТОМ). Исследования выполнялись на объектах Москвы и Московской области в рамках лесопатологического обследования и/или судебно-ботанических экспертиз. Сопряженное использование принципиально разных методов позволило установить особенности их работы при диагностике и очертить приблизительные рамки их адекватного биологически обоснованного применения. Зачастую диагностика состояния дерева выполнялась уже после установления факта его падения, как правило, сопряженного с материальным ущербом (чаще всего разрушением автотранспорта).

Отдельным объектом, на основе которого выполнено одно из наших исследований (приведенное в качестве характерного примера практической диагностики аварийности деревьев в урбанизированной среде), является парк в окрестностях г. Красногорска Московской области. Объект расположен на территории бывшей усадьбы Опалиха-Алексеевское в микрорайоне Опалиха г. Красногорска. В 1670-х гг. Опалиха – вотчина дьяка Литвинова, в начале XVIII в. – Чаадаевых. Материалы Генерального межевания сообщают, что в 1768 г. сельцо находилось в собственности генерал-майора Николая Егоровича Николева. Здесь уже сложилась усадьба, был построен деревянный господский дом, рядом с ним вырыты пруды и разбит регулярный сад с плодовыми деревьями. Сохранился составленный в это время план имения, на котором господская усадьба показана напротив крестьянских дворов, а также отмечены большие копаные пруды площадью почти 2 десятины. При Николаеве был построен флигель на каменном фундаменте с башенкой, в котором действовала

небольшая домовая церковь. Затем, после смены ряда владельцев, в 1825 г. усадьбу приобрел князь Николай Борисович Юсупов, который являлся владельцем соседнего имения Архангельское.

Сельцо Опалиха-Алексеевское занимало удобное положение около тракта, который шел из Москвы в Ново-Иерусалимский монастырь и далее на Волоколамск. После Октябрьской революции землю национализировали. До 1923 г. во флигеле размещался клуб, затем детская колония «Васильки». В 1930-х гг. старые постройки были снесены, на месте деревянного дома было возведено здание пансионата Коммунистического университета трудящихся Востока, переданное затем Международному обществу помощи рабочим. В 1942 г. здесь был госпиталь, а в 1945 г. – дом отдыха «Опалиха». По результатам выполнявшихся ранее сотрудниками компании НПК «Спецлесозащита» дендрохронологических исследований было установлено, что возраст наиболее старых деревьев в парке составляет более 200 лет.

### Традиционные методы исследований

Теория вопроса устойчивости стволов деревьев уходит в глубину веков. Пожалуй, первым значимым постулатом этой теории были представления о рациональной конфигурации балки, сформулированные Галилео Галилеем в 1638 г. (Раздорский, 1955). На основании выведенных им формул, выражающих сопротивление изгибу балок различного сечения, Галилей пришел к заключению, что «сопротивление двух цилиндров из одного и того же материала, имеющих один и тот же вес и одинаковую длину – один из которых полый, а другой массивный, относится как их диаметры». Из этого следует, что у полый балки без увеличения веса сохраняется то же сопротивление и полотрубчатая конструкция, поэтому является более рациональной для тел, подвергающихся статическому изгибу под действием силы тяжести.

В качестве примера реализации этой концепции в природе Галилей приводит стебель злаков: «Если бы соломина злака, поддерживающая колос, более тяжелый, нежели весь стебель, была произведена при том же количестве материала, но была бы сплошной, то она являлась бы гораздо менее сопротивляющейся изгибу и излому». В свете изложенных выкладок наличие в ядре дерева гнили не кажется существенным изъяном, более того, оно может рассматриваться

как фактор, увеличивающий механическую устойчивость ствола! На первый взгляд этот вывод противоречит всей дендрологической практике, но следует иметь в виду, что он справедлив лишь для стебля, испытывающего статическую нагрузку под действием силы тяжести. Важным условием справедливости вывода является также строгая центрированность полости в стволе дерева относительно вектора действия силы тяжести.

С практической точки зрения описанные закономерности важны для понимания того, что иногда в городской застройке либо в глубине лесных насаждений обнаруживаются деревья с чрезвычайно развитой ядровой гнилью, которые существуют с ней уже долгие годы. По-видимому, стечение обстоятельств обуславливает то, что их стволы испытывают преимущественно статическую нагрузку и почти не преимущественно от доли поздней древесины в годичном кольце. У хвойных доля поздней древесины наиболее велика у основания ствола и непрерывно убывает по направлению к вершине. Это имеет для дерева большое значение: для ствола вероятность излома под действием порывов ветра значительно возрастает в направлении от верха к низу. Повышенная прочность ствола в районе корневой шейки достигается как за счет общего утолщения ствола, так и за счет увеличения прочности древесины из-за увеличения доли поздней древесины в годичном кольце. Современные представления об устойчивости столов растений были подытожены немецким физиком Франком Ринном (Rinn, 2005, 2006).

Ф. Ринн отмечает, что тот, кто судит об устойчивости дерева, полностью опираясь на свой опыт либо свои внутренние ощущения, может в определенных случаях правильно оценить состояние дела и прийти к правильным выводам. Однако подобная оценка распространена среди непрофессионалов (совет общины или суд). Кроме того, т. к. даже совершенно здоровые деревья могут ломаться, то в принципе никакая методика измерений не может гарантировать абсолютной безопасности. Также верно и то, что никакой конкретный метод и никакой прибор не могут сами по себе, не доводя дело до разрушения дерева, обеспечить получение точного результата. По мнению Ринна, дерево ломается, когда сила (или изгибающий момент), воздействующая из-за ветра, слишком велика и древесина ствола не может устоять при подобной нагрузке. Так называемый изгибающий момент (сила,

умноженная на длину плеча рычага) определяется из значений скорости ветра  $v$ , площади (поверхности) кроны  $A$ , плеча воздействия силы  $l$  (расстояния от центра тяжести кроны до ствола), плотности воздуха и так называемого коэффициента (лобового) сопротивления  $c_w$ :

$$B = F \times l = c_w \times 1/2 \times \delta \times v^2 \times A \times l.$$

Сопротивление дерева этой нагрузке зависит от размера и формы поперечного сечения ствола и прочности древесины. Точная взаимозависимость между разрушающей нагрузкой, площадью поперечного сечения, формой сечения, прочностью древесины и пределом прочности на растяжение может быть исключительно сложной. Так называемый момент сопротивления должен воспроизводить реакцию поверхности и формы поперечного сечения, для округлых дуплистых стволов (с круглой, концентричной внутренней полостью) при внешнем диаметре  $D$  и диаметре внутренней полости  $d$  имеем:

$$W = 3.14 \times (D^4 - d^4) / (32 \times D).$$

Чем более пустотелое дерево и чем больше вскрыто его поперечное сечение, тем скорее оно сломается. Но свою роль здесь играют не только форма и размер поперечного сечения, свойства материала (древесины) также имеют решающее значение. Так, к примеру, древесина какого-то одного дерева может быть вдвое более стойкой к излому, чем древесина другого дерева той же породы.

Таким образом, по мнению Ринна, изгибающему моменту под воздействием ветра ( $B$ ) противостоят момент сопротивления ( $W$ ) и прочность древесины ( $\sigma$ ). При обследовании дерева следует выяснить, достаточны ли момент сопротивления и прочность его древесины для того, чтобы выдержать нагрузки, обусловленные изгибающим моментом из-за воздействия ветра. Следовательно, независимо от того, насколько точно может быть исследована древесина конкретного ствола и определена его прочность, расчет его запаса прочности никогда не может быть точнее определения воздействующего ветрового изгибающего момента, т. е. ветровой нагрузки. Это означает, что конечный результат любого расчета и определения запаса прочности обременен по крайней мере погрешностями, обусловленными ветровой нагрузкой, вне зависимости от точности измерений. Даже ядерно-спиновые томографические снимки серии поперечных сечений ствола и точное измерение предела

прочности на растяжение образцов древесины из ствола не могут изменить это положение. Так как совершенно невозможно, как показано выше, хотя бы раз надежно оценить ветровую нагрузку, то также в принципе невозможно выдать рассчитываемые с ее учетом точное значение запаса прочности и надежные его оценки. Поэтому, по нашему мнению, подобные расчеты при современном состоянии науки бесполезны. Следовательно, при правовом рассмотрении все лица, ответственные за состояние дерева, должны иметь в виду эту очевидную неопределенность, если дело касается оценки запаса прочности, поскольку дерево является сложным объектом, ветровая нагрузка на него – неопределенной.

При соотношении толщина остаточной стенки к радиусу менее одной трети вероятность излома дерева при определенных условиях сильно возрастает, а именно тогда и только тогда, когда, к примеру, сохраняется наличие цельной кроны при ниспадающей ветровой нагрузке в месте расположения, либо приходится считаться с внезапными увеличениями ветровой нагрузки (например, в связи с эффектом всасывания из-за появления новых построек или же высвобождения свободных пространств), либо процессы разрушения древесины протекают быстрее, чем происходит дальнейшее развитие дерева после его подлечивания.

Таким образом, точных критериев связи процента гнили в стволе и вероятности падения дерева в настоящее время, по мнению Ф. Ринна, вывести нельзя. Остается использовать различные косвенные оценки, точность которых может быть либо приемлемой, либо неприемлемой в зависимости от конкретных целей исследования и/или экспертизы.

Характерным примером, отражающим современные реалии выявления аварийных деревьев, являются результаты исследований авторитетных воронежских ученых-лесопатологов (Царалунга и др., 2020). В рамках обследования насаждений вдоль Большой Воронежской экологической тропы ими были проведены исследования по определению качественных и количественных характеристик патологий на деревьях, которые не учитываются в инструктивных документах, но фактически определяют эти деревья как аварийные. Кроме стволовых гнилей и опасного наклона ствола, рекомендованных инструкциями, учитывались деревья с комлевыми дуплами, раковыми опухолями на

стволе, расщеплением ствола и усохшими скелетными ветвями. Собранный материал и его анализ показали, что в случае учета таких патологий количество деревьев, относимых к категории аварийных, может возрасти на 62 %. Среди дополнительных патологий лидируют комлевые дупла. Указано, что кроме данных патологий, характерных для дубравных древостоев, есть еще ряд фатальных для деревьев патологий, встречающихся в других типах насаждений. Сделан вывод, что современная методика выделения аварийных деревьев несовершенна, поскольку не учитывает значительное количество древесных патологий, которые увеличивают вероятность облома или вывала дерева, чем однозначно делает такие деревья аварийно опасными.

Как отмечает М. Е. Ткаченко, «беспорядочная рубка может вызвать катастрофические последствия в лесу» (Ткаченко, 1955). Изреживание увеличивает скорость ветра. Деревья, устойчивые в древостое, при меньших пределах максимально возможной скорости ветра после изреживания подвержены ветровалу и бурелому. Эти общеизвестные в лесоводстве сведения, основанные на эмпирических наблюдениях, подтверждены и более строгими исследованиями, демонстрирующими, что вероятность падения отдельного дерева в насаждении под действием ветра зависит от числа его ближайших соседей и относительной высоты дерева над пологом насаждения (Филенкова и др., 2011).

### **Оригинальные методы исследований**

Не вызывает сомнений, что аварийные деревья в городе необходимо выявлять и удалять. Какими же предпосылками нужно руководствоваться при этом? С биологической точки зрения причины падения дерева, точнее пусковые механизмы падения, могут быть разными. Перечисленные ниже причины отчасти взаимосвязаны и могут дополнять друг друга, но практический механизм, запустивший падение дерева, в каждом случае отличается.

Группы причин падения деревьев:

1. Сильное развитие гнили в стволе дерева.
2. Сильное развитие гнили в корнях дерева.
3. Резкое изменение полноты насаждения, несоответствие между формой ствола и архитектурой кроны и существующим в настоящее время уровнем динамической ветровой нагрузки.

4. Резкое поднятие уровня грунтовых вод, отмирание значительной части корневой системы в результате анаэробногения.

5. Повреждение корневой системы при строительстве.

При выявлении аварийных деревьев в первую очередь необходимо определить деревья, пораженные гнилью. Основные внешние признаки присутствия гнили в стволе дерева:

- 1) наличие дупла с загнившими стенками;
- 2) наличие табачных сучьев;
- 3) наличие плодовых тел грибов-трутовиков.

Косвенными признаками, говорящими о возможном присутствии в стволе гнили, являются:

- 1) патологическое утолщение комлевой части ствола;
- 2) растрескивания коры и смолотечения по стволу дерева;
- 3) суховершинность, изреженность кроны, бледная окраска хвои.

Согласно приложению 4а к действующим «Правилам создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы», установить пораженность гнилями «можно по образцам древесины, взятым с помощью приростного бурава или выстукиванием ствола обухом топора. В последнем случае гулкий, нечистый звук будет свидетельствовать о наличии в стволе гнили (как правило, в последней стадии)» (Правила создания..., 2002–2018). Последний способ мы рекомендуем использовать только людям с хорошим музыкальным слухом и большим опытом практической работы. Следует отметить, что действующие правила также предписывают удалять деревья с наклоном ствола от 45°. Диагностика гнили с помощью бурава, по нашему опыту работы, это наиболее надежный, простой и, что немаловажно, действенный способ определения факта наличия гнили и оценки уровня ее развития.

Аналогичную возможность (определение процента здоровой и гнилой древесины по радиусу) дают приборы типа резистографа. Разница заключается в том, что образец древесины мы наблюдаем непосредственно, а работая с резистографами различного типа, получаем косвенные оценки динамики плотности древесины (даже не сами показатели плотности), на основании которых судим о наличии в стволе гнили и уровне ее развития.

Еще более косвенные оценки уровня развития гнили получают с помощью различно-



Рис. 1. Аномальное утолщение ствола ели в комлевой части свидетельствует о развитии ядровой гнили (вероятно, корневая губка)

Fig. 1. Abnormal thickening of the trunk of the spruce in the clump part indicates the development of heart rot (probably root sponge)

го рода томографов. Резистограф позволяет оценивать состояние ствола, измеряя сопротивление его участков пробуриванию тонким сверлом (по мере деструкции древесины под действием возбудителя гниения ее сопротивление пробуриванию снижается). Импульсный томограф оценивает состояние ствола на основе данных о скорости прохождения звука в разных участках ствола (по мере деструкции древесины под действием возбудителя гнили снижается ее звукопроводимость).

Технология работы с резистографом и Арботом подробно описана в статье А. В. Анциферова (2020). Данные приборы безусловно являются полезным инструментом исследований, но их применение, как и применение любого методического подхода в науке, имеет ограничения. Главным из них является биологически обусловленное варьирование плотности здоровой (не пораженной гнилью) древесины.

Резистограф в ходе работы измеряет не саму плотность древесины, а количество



Рис. 2. Плодовое тело трутовика Швейница у комля лиственницы свидетельствует о поражении корневой системы дерева гнилью

Fig. 2. The fruit body of the polypore of Shveynits in the larch clump indicates that the root system of the tree is affected by rot

электричества, затрачиваемое на прохождение сверла на каждом участке ствола. Естественно, что чем глубже входит сверло в ствол, тем сильнее увеличивается поверхность трения сверла о древесину и тем больше электричества тратится на просверливание древесины. Поэтому гниль выявляют по резкому отклонению плотности древесины от линии тренда затрат электричества, но не по некоторым количественным критериям. В этом может скрываться методическая неточность, когда сверло попадает на участок древесины с широкими годичными кольцами пониженной плотности, поэтому результаты интерпретации работы резистографа в наиболее ответственных случаях необходимо вести с учетом данных визуального обследования керна, отобранного буровом Пресслера, с помощью которого гниль выявляется непосредственно и достоверно.

Аналогично Арботом при определенных режимах работы может ввести неискушенного исследователя в заблуждение. Древесина ствола в поперечном сечении варьирует по плотности. Как правило, у хвойных наблюдается следующая закономерность: в центре ствола расположены широкие годич-

ные кольца с малой долей поздней древесины (малая плотность), а на периферии, около коры, расположены узкие годичные кольца с большим процентом поздней древесины (высокая плотность). С учетом того, что работа Арботома построена не на четких количественных показателях скорости прохождения звука по древесине (что затруднено по биологическим причинам), а на анализе относительных значений, при определенных условиях может складываться ошибочное мнение о наличии в ядре древесины, подвергнувшейся деструкции. Однозначно данный вопрос в спорных случаях может быть разрешен с помощью отбора керна древесины.

На практике исходным материалом, используемым при работах, связанных с массовой диагностикой гнили, должен быть дендрологический план, отражающий распределение в пространстве всех деревьев, чей диаметр на момент выполнения геодезической съемки превышал 10 см. Каждое дерево на плане должно быть пронумеровано. К плану составляется перечетная ведомость, в которой отражены вид дерева, диаметр на высоте 1.3 м, высота и состояние дере-



Рис. 3. Отбор керна древесины для диагностики гнили в стволе дерева  
Fig. 3. Wood core sampling for the diagnosis of rot in the tree trunk

ва. Для диагностики наличия гнили в стволе дерева, как правило, керны отбираются на высоте 1.3 м с помощью бурава Пресслера. С каждого учетного дерева отбирается по 1 керну по произвольно выбранному радиусу. Образовавшиеся в стволе отверстия заделываются садовым варом.

С помощью рулетки измеряется длина окружности каждого дерева. Далее керны упаковываются в бумажные пакеты, на которые наносится номер учетного дерева, обозначается его порода, дата отбора керна и зафиксированная длина окружности. Керны направляются в лабораторию, там проводится их обработка. Для этого на основе длины окружности керна рассчитывается средний радиус ствола на высоте отбора керна. На

отобранных кернах измеряется длина участков здоровой древесины, затем рассчитывается процент гнили.

Для оценки степени пораженности ствола ядровой гнилью с использованием бурава Пресслера рекомендуется следующий алгоритм:

1. Отбирается керн древесины.
2. Измеряется длина участка здоровой древесины на керне ( $X$ ).
3. Измеряется длина окружности ствола в месте отбора керна ( $L$ ).
4. Определяется радиус ствола ( $R$ ) по формуле  $R = 0.16 * L$ .
5. Определяется процент гнили в стволе ( $Y$ ) по формуле  $Y = ((R - X)/R) * 100 \%$ .

По результатам диагностики необходимо принять решение о судьбе дерева.

Пример результатов выполненных расчетов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Развитие гнили в стволе дерева по данным анализа

№ дерева по перечетной ведомости	Порода дерева	Длина окружности на высоте отбора керна, см	Средний радиус окружности, см	Измеренный радиус здоровой древесины, см	Процент стволовой гнили относительно здоровой, %
12	липа	172	27,39	23,0	гнили нет
16	липа	185	29,46	13,0	55,9
20	липа	176	28,03	25,0	10,8

Для деревьях, расположенных в черте населенных пунктов либо на участках, предназначенных для рекреации, предлагаются следующие придержки:

1. Если ядровая гниль занимает более 80 %, необходимо удаление дерева.

2. Если ядровая гниль занимает от 40 до 79 %, дерево представляет угрозу падения. Если такое дерево расположено рядом с жилыми постройками, социально значимыми объектами инфраструктуры, то его рекомендуется также удалить.

3. Если ядровая гниль занимает от 5 до 39 %, угроза падения дерева в ближайшие годы невелика.

Рекомендуется следить за развитием гнили, а также производить лечение заболевания хирургическими и терапевтическими методами, возможно, снизить парусность кроны за счет кронирования дерева. Практика ухода за зелеными насаждениями показала, что важным фактором оценки угрозы падения дерева может быть также уровень окольцовывания ствола гнилью, раком, механическими повреждениями. Известный отечественный фитопатолог И. В. Журавлев (1964) у хвойных пород относит к потенциально аварийным деревья с окольцовыванием ствола от 50 до 70 %, у лиственных пород – деревья с окольцовыванием ствола от 60 до 85 %.

Прогноз развития гнили в стволе дерева и время перехода его в разряд аварийных теоретически можно оценить. Например, в работе А. С. Матвеева-Мотина и И. А. Алексеева (1963) приводятся данные о средней скорости роста гнилей в % от площади сечения ствола. Для серно-желтого трутовика на дубе этот показатель равен 0.4–1.8 %, для ложного трутовика – 0.2–0.7 %, для ложного трутовика на осине – 2.5–3.8 %. Следует отметить, что дерево в этот период тоже растет и общая площадь сечения ствола увеличивается параллельно с увеличением площади

сечения гнили. Так как прирост древесины варьирует во времени (варьирует от года к году, закономерно меняется с возрастом) и прирост гнили также, вероятно, должен варьировать, то моделирование такого рода процессов представляет исследовательский интерес, но далеко от возможности практического применения.

В качестве характерного примера применения рассматриваемого метода диагностики аварийности деревьев на основе кернов, отобранных буровом Пресслера, рассмотрим результаты исследований в одном из подмосковных парков. Объектом исследования служил парк «Опалиха», расположенный в Красногорском районе Московской области. Целью работы являлась диагностика развития стволовых гнилей в старовозрастном парке г. Красногорска (микрорайон Опалиха) на материале выборки деревьев, которые, согласно плану застройки, будут расположены поблизости от объектов социальной инфраструктуры.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи

1. На основе предоставленных материалов таксации произвести отбор кернов древесины с 1000 деревьев, расположенных в значимых для проекта будущей застройки местах.

2. В лаборатории провести анализ кернов на наличие гнили, выполнить расчеты процентного содержания гнили в стволе деревьев.

3. Проанализировать распределение гнилей в исследуемой выборке, дать рекомендации по удалению отдельных деревьев.

Работа выполнялась в увязке с планами технического задания, сформулированного согласно договору по экспертизе для научно-производственной компании «Спецлесозащита». Осенью 2016 г. на территории объекта исследования производился отбор кернов древесины. Исходными материала-

ми, использованными при работе, был дендрологический план, отражающий распределение в пространстве всех деревьев, чей диаметр на момент выполнения геодезической съемки превышал 10 см. Каждое дерево на плане было пронумеровано. К плану прилагалась перечетная ведомость, в которой были отражены вид дерева, диаметр на высоте 1.3 м, высота и состояние дерева. С использованием данных материалов нами выполнялась диагностика наличия гнили в стволе дерева. Для этого керны отбирались на высоте 1.3 м с помощью бурава Пресслера. С каждого учетного дерева отбиралось по одному керну по произвольно выбранному радиусу. Образовавшиеся в стволе отверстия заделывались садовым варом.

Специалисты городского зеленого хозяйства Московской области на практике при-

знают аварийным дерево, которое содержит не менее 50 % стволовой гнили. Таким образом, для целей диагностики аварийности дерева и принятия решения о его судьбе не требуется определять параметры гнили с точностью до нескольких процентов. Та точность, которую дает один керн, отобранный с помощью бурава Пресслера, является более чем достаточной для принятия решения о дальнейшей судьбе дерева.

Некоторые деревья имели визуальные признаки аварийности. Так, на рис. 4 изображено дерево клена остролистного с выраженным наклоном ствола и плодовыми телами трутовика. На рис. 5 – дерево клена остролистного с наклоном ствола и обширным дуплом. Такие деревья назначались для диагностики в первую очередь.



Рис. 4. Дерево клена с наклоном ствола и плодовыми телами трутовиков  
Fig. 4. Maple tree with the slope of the trunk and fruit bodies of polypore



Рис. 5. Дерево клена с наклоном ствола и обширным дуплом  
Fig. 5. Maple tree with the slope of the trunk and a large hollow

Несмотря на то, что многие деревья имели в стволе развитую ядровую гниль, состояние их кроны (ассимиляционного аппарата) было очень хорошим, примером чему служит дерево, изображенное на рис. 6.

В процессе полевых работ с помощью рулетки измерялась длина окружности каждого дерева. Далее отобранные керны упаковывались в бумажные пакеты, на которые наносился номер учетного дерева, обозначалась его порода, дата отбора керна и зафиксированная длина окружности. Керны поступали в лабораторию дендрохронологии Мытищинского филиала МГТУ им. Н. Э. Баумана, где проводилась их обработка. Для этого на основе длины окружности керна рассчитывали средний радиус ствола на высоте отбора керна. На отобранных кернах измерялась длина участков здоровой древесины, рассчитывался процент гнили.

По результатам обработки кернов была составлена обобщенная таблица, отражающая количество деревьев разных пород и

количество аварийных деревьев (деревьев с высоким уровнем гнили) (табл. 2).

По результатам исследования 1000 деревьев было установлено, что 82 из них имеют гниль более 50 % от исследованного радиуса ствола. Если в дальнейшем в насаждении планируется проводить рубки, которые снизят его полноту, то выявленные деревья должны рассматриваться как потенциально аварийные. Изменение полноты насаждения приведет к увеличению динамической ветровой нагрузки на оставшуюся часть древостоя и формированию бурелома деревьев, пораженных гнилью в сильной степени.

Если проанализировать распределение аварийных деревьев по породам, то можно заключить следующее.

Во-первых, среди исследованных пяти тополей не было обнаружено ни одного аварийного. Этот факт идет вразрез с общепринятыми представлениями. Так, по опыту работ НПК «Спецлесозащита» до 90 % об-



Рис. 6. Общий вид кроны у дерева клена, пораженного ядровой гнилью  
Fig. 6. General view of the crown of a maple tree affected by heart rot

ращений граждан по вопросу экспертизы внезапно упавшего на машину аварийного дерева связано с родом Тополь. Причина несоответствия в том, что в урбанизированной среде тополь получает механические повреждения, через которые легче, чем другие породы, заражается гнилью, многие тополя испытывали в течение своей жизни обрезку ветвей, что могло послужить заражению гнилью. Тополя лесопарка не получали механических повреждений, не подвергались обрезке, поэтому оказались здоровыми.

Во-вторых, среди аварийных деревьев преобладает липа, на втором месте ель и клен, затем дуб и береза. Если посчитать процент аварийных деревьев для этих пород, то окажется следующее: липа – 8 %; клен – 9 %;

ель – 7 %, дуб – 8 %, береза – 8 %. Таким образом, все рассматриваемые породы имеют практически идентичную долю аварийных деревьев, нельзя назвать породу, которая отличалась бы особой «аварийностью». Рассматривать другие породы не имеет смысла из-за незначительной их представленности в выборке, иначе получится, например, что для яблони характерна аварийность 50 %, что абсурдно.

Наиболее подробный материал для исследований закономерностей распространения гнилей дает липа мелколистная, в нашей выборке присутствует 634 дерева, что составляет 63.4 % объема выборки по количеству деревьев.

Прежде всего можно проверить версию

Таблица 2. Распределение деревьев по породам и степени аварийности

Порода	Количество учетных деревьев	Средний диаметр	Процентная доля в выборке	Количество деревьев с гнилью более 50 %
Тополь	5	38	0.5	0
Береза	59	42	5.9	5
Дуб	61	37	6.1	5
Ель	168	34	16.8	12
Ива	8	47	0.8	0
Клен	115	30	11.5	10
Липа	634	33	63.4	48
Осина	9	30	0.9	0
Сосна	13	45	1.3	1
Туя	5	30	0.5	0
Черемуха	1	32	0.1	0
Яблоня	2	10	0.2	1
Ясень	4	39	0.4	1

о том, что уровень поражения гнилью связан с диаметром дерева. Для нее имеются два биологических обоснования: во-первых, больший диаметр характерен для более старых деревьев, у которых больше отмерших сучьев и выше риск заражения, во-вторых, для деревьев с более широкими годичными кольцами, в древесине которых гниль развивается легче. Нами был рассчитан коэффициент корреляции между средним радиусом ствола и процентом гнили в стволе дерева, его значение составило 0.26. Это говорит о том, что существует достоверная положительная связь между диаметром дерева и его пораженностью гнилью, однако по тесноте эта связь очень слабая. Следовательно, на заражение дерева гнилью и развитие гнили в стволе влияют много факторов, среди которых, вероятно, значим индивидуальный полиморфизм по иммунитету к уровню развития гнили и поливариантность онтогенеза в зависимости от световой обстановки (разная интенсивность образования сухих ветвей у экземпляров одинакового возраста и диаметра).

Второй вопрос, который представляет несомненный интерес, – это распределение деревьев с разным уровнем развития гнили в выборке. Уровень развития гнили приблизительно менее 15 % лежит за пределами точности наших измерений из-за геометрических эффектов строения ствола. С практической точки зрения он не важен, т. к. деревья, имеющие гниль 15 %, в любом случае не подлежат удалению. В нашей выборке оказалось 291 условно здоровое дерево, т. е. 54 % выборки деревьев можно считать

пораженными ядровой гнилью. Анализируя выборку, возможно оценить процент разных категорий деревьев согласно следующим критериям:

Категория 1. Если гниль занимает 80 %, необходимо удаление дерева.

Категория 2. Если гниль занимает от 40 до 79 %, дерево представляет угрозу падения.

Категория 3. В случае, когда гниль занимает от 5 до 39 %, угроза падения дерева в ближайшие годы невелика. Требуется следить за развитием гнили.

Если анализировать распределение деревьев с разным уровнем гнили в выборке, то можно понять, что 260 деревьев относятся к категории 3, т. е. не представляют угрозу падения. Вместе с условно здоровыми деревьями они составляют 86 % исследуемой выборки. Следовательно, подавляющая часть исследованных деревьев не требует удаления.

К категории 2 относится 76 деревьев, или 12 % выборки. Это деревья, статус которых не определен и зависит от режима ведения хозяйства (фактор снижения полноты насаждения, фактор наличия поблизости объектов социальной инфраструктуры).

Очень небольшое число деревьев (5 шт., или 0.7 %) требуют немедленного удаления даже в том случае, если застройка участка производиться не будет и территория будет функционировать в качестве рекреационного лесопарка.

Для более полного восприятия эти же данные могут быть представлены несколько в ином виде. Непрерывный ряд изменчивости гнили был разбит на дискретные интер-

валы: от 15 до 25, от 25.1 до 35, от 35.1 до 45, от 45.1 до 55, от 55.1 до 65, от 65.1 до 75, от 75.1 до 85, от 85.1 до 95. Для каждого из

интервалов было определено число деревьев, полученное распределение отражает график на рис. 7.

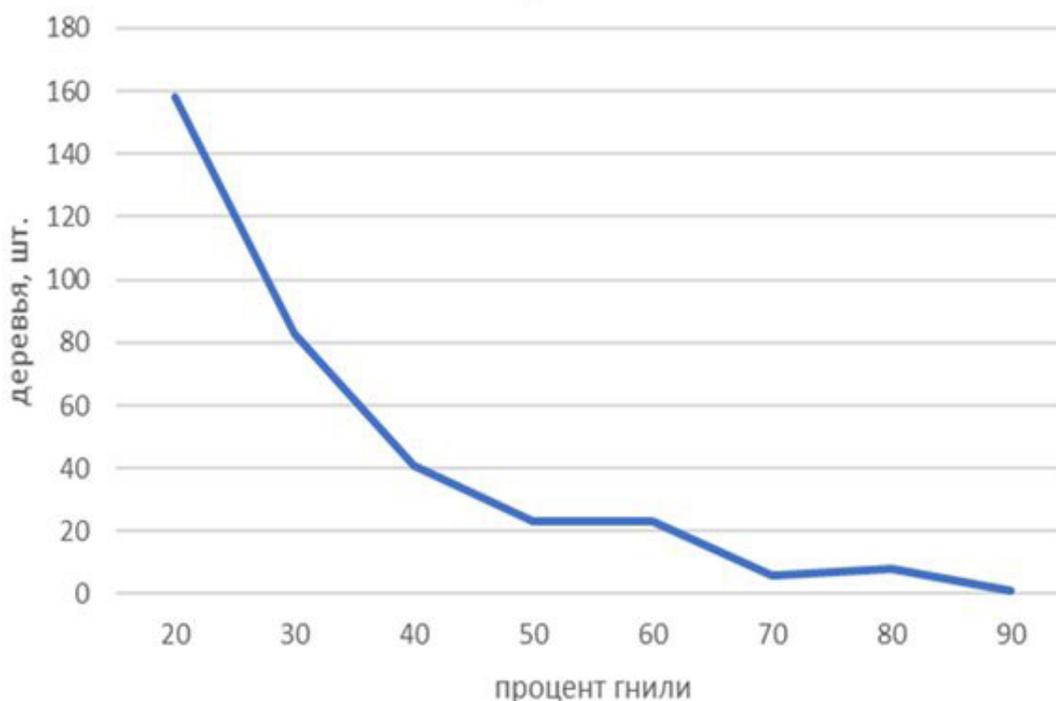


Рис. 7. Встречаемость деревьев с разным уровнем развития гнили

Fig. 7. Occurrence of trees with different levels of rot development

Из графика на рис. 7 видно, что наблюдается четкая зависимость: чем выше уровень развития гнили, тем меньше деревьев присутствует в насаждении. Вероятно, это связано с тем, что с возрастанием развития гнили возрастает риск гибели дерева в результате бурелома.

Полученная зависимость носит экспоненциальный характер, она очень хорошо описывается уравнением вида  $y = 314.54e^{-0.63x}$ . Это уравнение показывает зависимость с высокой точностью: коэффициент детерминации, характеризующий точность аппроксимации исходной кривой, заданной функцией, равен 0.92, что значит, что функция описывает 92 % наблюдаемой изменчивости.

Таким образом, в результате выполненного исследования нами были установлены некоторые закономерности изменчивости уровня развития гнили в стволах деревьев на достаточно крупной выборке на примере липы мелколистной, а также даны практические рекомендации по уходу за насаждением (удаление аварийных деревьев), рекомендации по уходу за деревьями при

двух режимах ведения хозяйства – застройке части территории парка и создании вписанного в ландшафт парка комплекса социальной инфраструктуры либо при функционировании парка как рекреационной зоны с минимальным вмешательством человека в области преобразования существующих насаждений.

### Обсуждение

Подведем краткий итог обзору теории устойчивости ствола дерева. Причиной падения деревьев чаще всего является динамическая нагрузка. Динамическую нагрузку на ствол дерева создают преимущественно порывы ветра. Сила воздействия ветра пропорциональна при прочих равных условиях парусной поверхности тел. Парусность кроны дерева обусловлена, с одной стороны, ее площадью, с другой стороны, ее плотностью. Существенным фактором устойчивости ствола является высота дерева, которая определяет длину плеча рычага, точкой опоры которого является район корневой шейки, т. е. место закоривания ствола дерева корневой системой для удержания его в вер-

тикальном положении. Варьирование перечисленных факторов создает объективные трудности для выработки четких критериев определения аварийности дерева, например на основании процента развития гнили по площади поперечного сечения ствола дерева. В зависимости от вида дерева и условий роста древесина его ствола может обладать разными физико-механическими свойствами. В зависимости от условий роста ствол может иметь разную высоту и архитектуру, что существенно для расчета величины момента силы динамической нагрузки. В зависимости от характера ландшафта, окружающего ствол дерева, ветровые потоки могут по-разному распределяться в пространстве. Таким образом, теоретические данные показывают, что, с одной стороны, наличие гнили в стволе влияет на его механическую прочность, с другой стороны, высокоточная оценка геометрических параметров развития гнили в стволе очень мало дает с точки зрения приращения точности выявления аварийного дерева, т. к. существуют иные весомые переменные этой функции, не поддающиеся столь же точной прямой оценке.

Перспективы развития исследований в рассматриваемом направлении, на наш взгляд, могут быть связаны с накоплением эмпирического материала, что может быть выполнено только сообществом специалистов и в региональном аспекте. Если каждый специалист, столкнувшийся с фактом падения дерева, будет фиксировать процент гнили в стволе в районе корневой шейки, вид дерева, длину ствола, вид возбудителя гнили (если возможно определить по плодovому телу), уровень окольцовывания ствола гнилью (если оно было и если это возможно определить), а также иные особенности, важные с его точки зрения, а затем публиковать эти данные, тогда будет накоплен первичный массив эмпирического материала в региональном аспекте. Только после осуществления этого этапа возможно приблизиться к формированию объективных методик оценки аварийности деревьев в урбанизированной среде российских городов. Важно подчеркнуть, что в основе диагностики аварийности деревьев в первую очередь лежат биологические закономерности, которые отличаются динамичностью изменения во времени и вариацией в зависимости от экологических условий. Поэтому в зависимости от целей работы (исследование, лесопатологическое обследование, судебная экспертиза) для диагностики выявления

аварийных деревьев могут использоваться разные визуальные и инструментальные методы.

### **Заключение или выводы**

Подводя итог обзору, можно сформулировать следующие основные выводы.

В настоящее время отсутствует единое законодательство, которое определяло бы технологии мониторинга и ухода за деревьями в урбанизированной среде. Однако, в силу единства биологических закономерностей развития древесных растений, существующие документы являются до известной степени взаимодополняющими. Вопросы мониторинга древесных растений в урбанизированной среде детально проработаны в «Правилах создания, содержания и охраны зеленых насаждений и природных сообществ г. Москвы» (2002–2018). В соответствии с ними, гнилевые болезни относятся к числу наиболее опасных болезней древесных пород в городских насаждениях. Согласно приложению 4а указанных Правил, установить пораженность стволов деревьев гнилями «можно по образцам древесины, взятым с помощью приростного бурава».

В настоящее время нет четких критериев, связывающих аварийность дерева с процентом развития гнили в его стволе. Если каждый специалист, столкнувшийся с фактом падения дерева, будет фиксировать процент гнили в стволе в районе корневой шейки, вид дерева, высоту его ствола, вид возбудителя гнили (если возможно определить по плодovому дереву), уровень окольцовывания ствола гнилью, а также другие особенности, важные с его точки зрения, и в итоге публиковать эти данные, тогда будет накоплен первичный массив материала. Только после осуществления этого этапа возможно будет приблизиться к формированию более объективных методик оценки аварийности деревьев в урбанизированной среде.

Характерным примером, иллюстрирующим практические аспекты диагностики аварийности деревьев путем определения уровня развития гнили в стволе дерева, являются результаты одного из выполненного нами исследований. На территории подмосковного парка было обследовано 1000 деревьев. В результате было установлено, что 82 из них имеют гниль более 50 % от исследованного радиуса ствола. Если в дальнейшем в рассматриваемом насаждении планируется проводить рубки, которые снизят его полноту, то выявленные деревья долж-

ны рассматриваться как потенциально аварийные. Изменение полноты насаждения приведет к увеличению динамической ветровой нагрузки на оставшуюся часть древо- стоя и формированию бурелома деревьев, пораженных гнилью в сильной степени.

## Библиография

- Анциферов А. В. Судебные экспертизы по установлению причин падения деревьев // Теория и практика судебной экспертизы. 2020. Т. 15, № 2. С. 62–69.
- Журавлев И. В. Защита зеленых насаждений от болезней . Л.: ВЗЛТИ, 1964. 88 с.
- Купер Дж. Ф. Пионеры, или У истоков Саскуиханны . М.: Машиностроение, 1981. 415 с.
- Матвеев-Мотин А. С., Алексеев И. А. Скрытые пороки древесины и методы их распознавания . М.: Гослесбумиздат, 1963. 208 с.
- Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы . М.: Департамент природопользования и охраны окружающей среды, 2002–2018. 138 с.
- Правила санитарной безопасности в лесах . Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2017 г. № 607. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_217315/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_217315/)
- Раздорский В. Ф. Архитектоника растений . М.: Советская наука, 1955. 431 с.
- Румянцев Д. Е., Фролова В. А. Методологические подходы к изучению разнообразия экосистемных услуг зеленых насаждений в мегаполисе // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 10–2 (88). С. 28–34.
- Ткаченко М. Е. Общее лесоводство . М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. 599 с.
- Филенкова Н. В., Суховольский В. Г., Захаров Ю. В., Овчинникова Н. Ф. Кластерная модель ветроустойчивости деревьев с учетом ближайших соседей // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. XXVIII. № 1–2. С. 91–96.
- Царалунга В. В., Царалунга А. В., Короткая А. В. Проблема выявления и назначения в рубку аварийных деревьев на территории Гослесфонда // Лесотехнический журнал. 2020. № 3 (39). С. 86–94.
- Rinn F. Arbotom. 3-D Tree Impulse tomograph. Version 1.67 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. User Manual. Heidelberg: Rinntech, 2005. 43 p.
- Rinn F. DECOM Scientific. Software for Evaluation of RESISTOGRAPH® — Micro-Drill Resistance Measurements. Version 2.16 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. User Manual. Heidelberg: Rinntech, 2006. 45 p.
- Wolf K. L., Lam S. T., McKeen J. K., Richardson G. R. A., van den Bosch M., Bardekjian A. Urban trees and human health: a scoping review // Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17 (12). P. 4371–4401.

# THE PROBLEM OF DIAGNOSING THE ACCIDENT RATE OF TREES IN AN URBAN ENVIRONMENT

**RUMYANTSEV Denis Evgenyevich** *PhD, Mytishchi branch of N.E. Bauman Moscow State Technical University, dendro15@list.ru*

**FROLOVA Vera Alekseevna** *PhD, Mytishchi branch of N.E. Bauman Moscow State Technical University, frolova.vera@gmail.com*

**Keywords:**  
emergency trees  
sound rot  
phytopathology  
forest pathology

**Summary:** Identification of emergency trees is an urgent practical task, which is primarily important for the conditions of the urban environment. The methodological basis for solving this problem began to form quite a long time ago, but due to biological limitations, this issue cannot be solved unambiguously at the present time. The article considers the existing approaches to the identification of emergency trees and discusses the biological prerequisites for their use and possible limitations. It is shown that the accident rate of trees can be caused by a numbers of environmental and physiological factors, among which the greatest practical significance has the level of development of hidden stem rot. However, the crown windage and the nature of the wind load on the tree trunk in a landscape can cause different accidents of the trunk at the same level of dynamic wind load. The accident rate of a tree is poorly related to its pathological condition, for the full identification of emergency trees, only instrumental diagnostics is possible. Methods of instrumental diagnostics, as well as methods to reduce the accident rate of trees are discussed. As a typical example, the results of the identification of emergency trees in one of the parks of the Moscow region are presented according to the diagnostic data of the level of trunk rot development using the Pressler increment borer

**Reviewer:** S. V. Zalesov  
**Reviewer:** N. S. Ivanova  
**Reviewer:** E. V. Koltunov

**Received on:** 23 November 2020

**Published on:** 18 June 2021

## References

- Anciferov A. V. Forensic examination to establish the causes of falling trees, *Teoriya i praktika sudebnoy ekspertizy*. 2020. T. 15, No. 2. P. 62–69.
- Caralunga V. V. Caralunga A. V. Korotkaya A. V. The problem of identifying and assigning emergency trees to felling in the territory of the State Forest Resource, *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2020. No. 3 (39). P. 86–94.
- Filenkova N. V. Suhovol'skiy V. G. Zaharov Yu. V. Ovchinnikova N. F. Clastre model of wind resistance of trees, taking into account the nearest neighbours, *Hvoynnye boreal'noy zony*. 2011. T. XXVIII. No. 1–2. P. 91–96.
- Motin A. S. Alekseev I. A. Hidden defects of wood and how to recognize them. M.: Goslesbumizdat, 1963. 208 p.
- Pioneers or at the source of the Saskuihanna. M.: Mashinostroenie, 1981. 415 p.
- Razdorskiy V. F. Architectonics of plants. M.: Sovetskaya nauka, 1955. 431 p.
- Rinn F. Arbotom. 3-D Tree Impulse tomograph. Version 1.67 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. User Manual. Heidelberg: Rinntech, 2005. 43 p.
- Rinn F. DECOM Scientific. Software for Evaluation of RESISTOGRAPH® — Micro-Drill Resistance Measurements. Version 2.16 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. User Manual. Heidelberg: Rinntech, 2006. 45 p.
- Rules for creation, maintenance and protection of green plantating in Moscow. M.: Departament prirodopol'zovaniya i ohrany okruzhayushey sredy, 2002–2018. 138 p.
- Rules of sanitary safety. Uтверzhdeny postanovleniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federacii ot 20 maya 2017 g. No. 607. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_217315/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_217315/)
- Rumyantsev D. E. Frolova V. A. Methodological approaches to the study of the diversity of ecosystem

- services of green planting in the megapolis, *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2019. No. 10–2 (88). P. 28–34.
- Tkachenko M. E. *General forestry*. M.; L.: Goslesbumizdat, 1955. 599 p.
- Wolf K. L., Lam S. T., McKeen J. K., Richardson G. R. A., van den Bosch M., Bardekjian A. Urban trees and human health: a scoping review, *Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17 (12). P. 4371–4401.
- Zhuravlev I. V. *Protection of green plantating from diseases*. L.: VZLTI, 1964. 88 p.



## ПРАКТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ В СРЕДУ R

**ГОРБАЧ**

**Вячеслав Васильевич**

*д. б. н., доцент, Петрозаводский государственный университет,  
185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, gorbach@psu.karelia.ru*

**Получена:** 25 июня 2021 года

**Подписана к печати:** 23 июня 2021 года

Среда R нужна тем, кто хочет обрабатывать данные максимально быстро и полно, решать нетривиальные задачи при выполнении статистического анализа в биологических и экологических исследованиях. В отличие от специальных статистических пакетов, в R реализованы практически все мыслимые процедуры количественной обработки данных. А то, чего нет, можно сделать самому. Основное препятствие для широкого внедрения R – использование команд, которые вводят с клавиатуры компьютера в виде командной строки. Значит, для выполнения любого вида обработки данных необходимо понять структуру языка, выучить основные правила синтаксиса и овладеть некоторыми навыками для составления своих программ.

Вышедшее в Издательстве ПетрГУ учебное пособие (Коросов, Горбач, 2021) призвано помочь начинающим сформировать навыки работы в среде R. Авторы стремились создать руководство, способное сократить время для освоения этой программы студентами. В пособии в доступной форме изложены основы программирования на языке R, принципы организации баз данных и работы с ними. Кратко рассмотрены способы построения диаграмм и основные методы статистической обработки, начи-

ная с описательной статистики и заканчивая компонентным анализом и имитационным моделированием. Особое внимание уделено способам формирования выборок и подготовки их к статистической обработке в среде R.

Современная литература по практическому использованию среды R разнообразна, в ней можно найти ответы практически на все вопросы относительно методов обработки биологической и экологической информации. В то же время для начинающих эти книги достаточно сложны. Они незаменимы, но не позволяют овладеть навыками программирования для решения конкретных биометрических задач. С другой стороны, книги по программированию на R основаны на математических примерах, что очень усложняет процесс овладения языком для биологов и экологов.

На наш взгляд, необходимы адаптивные руководства, которые постепенно подвели бы читателей к профессиональному использованию программы R. Ключевые слова нашего пособия: программирование на R, биологические задачи, простота. Оно предназначено для студентов старших курсов, специалистов-биологов и экологов.

### Библиография

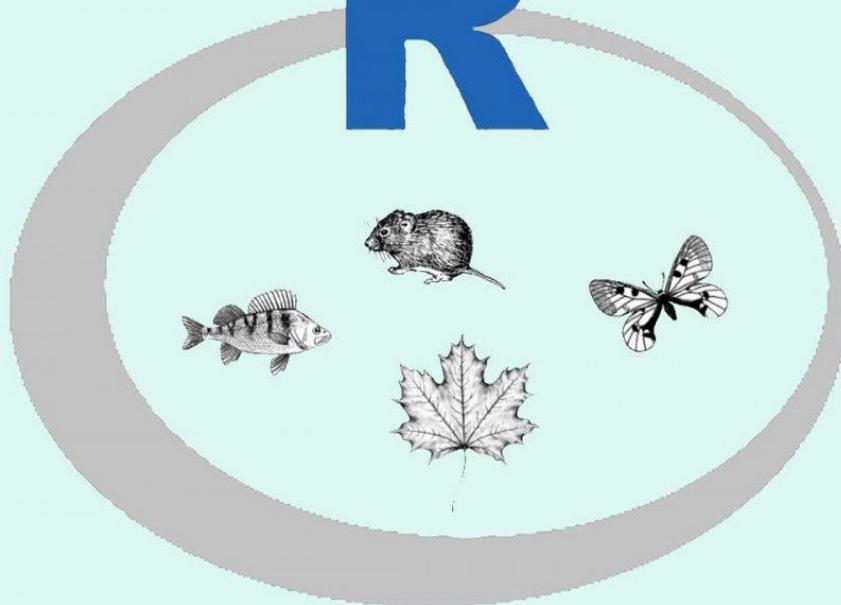
Коросов А. В., Горбач В. В. Практическое введение в среду R. Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2021. 117 с.

*А.В. Коросов*

*В.В. Горбач*

**Практическое  
введение  
в среду**

**R**



*Петрозаводск 2021*

# A PRACTICAL INTRODUCTION TO THE R

**GORBACH**  
Vyacheslav Vasilevich

*Petrozavodsk State University, gorbach@psu.karelia.ru*

**Received on:** 25 June 2020

**Published on:** 26 June 2021