

ПОВОЛЖСКИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Povolzhskiy Journal of Ecology

Номер 3

2023

Number 3



СОДЕРЖАНИЕ

Беликов А. С., Болдырев В. А., Седова О. В., Торгашкова О. Н. Структура сообществ макрофитов малых рек города Саратова в условиях антропогенной нагрузки	259
Бонина О. М., Ефремова Е. А., Удальцов Е. А., Зубарева И. М., Борцова М. С. Описторхиды в урбозкосистеме Новосибирска	274
Кондракова К. Д. Сравнительный анализ поведения серого журавля (<i>Grus grus</i>) и красавки (<i>Anthropoides virgo</i>) (Gruidae, Aves) в предмиграционный период	290
Олькова А. С., Медведева Е. В. Обработка видеоизображений <i>Daphnia magna</i> Straus (Cladocera, Crustacea) как основа автоматизированных методов биотестирования	301
Опарина А. М., Политаева Н. А., Ильин И. В. Глобальные перспективы перехода на зеленую энергетику в Саратовской области	314
Пархоменко А. С., Кондратьева А. О., Богослов А. В., Шилова И. В., Кашин А. С. Морфологическая изменчивость в популяциях таксонов <i>Chondrilla</i> (Asteraceae, Magnoliophyta) в Европейской России и на прилегающих территориях	331
Плешакова Е. В., Глинская Е. В., Коробейникова А. С., Голубев Д. М., Шеуджен А. Ш., Решетников М. В. Микробиологическая оценка состояния городских почв нефтегазоносного региона (на примере территории Когалыма)	352

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Кидов А. А., Иванов А. А., Иволга Р. А., Кондратова Т. Э., Кидова Е. А. Возрастная структура популяции восточной веретеницы – <i>Anguis colchica orientalis</i> (Reptilia, Anguinae) в Талышских горах	374
--	-----



CONTENTS

Belikov A. S., Boldyrev V. A., Sedova O. V., Torgashkova O. N. Structure of the macrophyte communities of small rivers in Saratov under anthropogenic load	259
Bonina O. M., Efremova E. A., Udaltsov E. A., Zubareva I. M., Bortsova M. S. Opisthorchids in the Novosibirsk urboecosystem	274
Kondrakova K. D. Comparative analysis of the behavior of the Common crane (<i>Grus grus</i>) and Demoiselle crane (<i>Anthropoides virgo</i>) (Gruidae, Aves) during their pre-migration period	290
Olkova A. S., Medvedeva E. V. Video image processing of <i>Daphnia magna</i> Straus (Cladocera, Crustacea) as a basis for automated biotesting methods	301
Oparina A. M., Politaeva N. A., Illin I. V. Global perspectives of transition to green energy generation in the Saratov region	314
Parkhomenko A. S., Kondratieva A. O., Bogoslov A. V., Shilova I. V., Kashin A. S. Morphological variability in <i>Chondrilla</i> taxon populations in European Russia and adjacent territories	331
Pleshakova Y. V., Glinskaya E. V., Korobeinikova A. S., Golubev D. M., Sheudzhn A. Sh., Reshetnikov M. V. Microbiological assessment of the state of urban soils of the oil and gas region on the example of the territory of Kogalym ...	352

SHORT COMMUNICATIONS

Kidov A. A., Ivanov A. A., Ivolga R. A., Kondratova T. E., Kidova E. A. Age structure of the population of <i>Anguis colchica orientalis</i> (Reptilia, Anguidae) in the Talysh Mountains	374
--	-----

Оригинальная статья

УДК 581.52+581.9

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-259-273>

СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ МАКРОФИТОВ МАЛЫХ РЕК ГОРОДА САРАТОВА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

А. С. Беликов[✉], В. А. Болдырев, О. В. Седова, О. Н. Торгашкова

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Поступила в редакцию 22.03.2023 г., после доработки 20.05.2023 г., принята 22.05.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. Представлены результаты исследований флор малых рек в пределах г. Саратова (Елшанка, Назаровка, 1-я Гусёлка и 2-я Гусёлка). Видовой состав водных растений исследованных водотоков представлен 37 видами макрофитов, принадлежащих к 23 родам, 17 семействам и трем отделам Charophyta, Polypodiophyta и Magnoliophyta. По количеству представленных видов преобладают семейства Potamogetonaceae, Suraeaceae и Lemnaceae. Значения индекса Менхиника свидетельствуют, что наибольшее флористическое разнообразие характерно для рек Елшанка и Назаровка (соответственно 3.1 и 3.4). Видовой состав водных растений исследованных рек в пределах городской территории имеет низкий коэффициент сходства с флорами рек с относительно низкой антропогенной нагрузкой. Самой многочисленной экологической группой являются гидрофиты (22 вида). Согласно индексу доминирования Паляя – Ковнацки, среди макрофитов изученных рек большинство видов относится к субдоминантам (57.28%) (*Potamogeton perfoliatus*, *Typha angustifolia*, *Lemna trisulca* и др.), к доминантам принадлежат 37.18% (*Phragmites australis*, *Potamogeton pectinatus*, *Lemna minor*, *Ceratophyllum demersum*), остальная часть (11.54%) определены как субдоминанты первого порядка. Исключительное преобладание характерно для *Ceratophyllum demersum* и *Phragmites australis*, которые выступали в роли доминантов на всех изученных реках. Значительная часть рек характеризуется низкой степенью зарастания русла гидрофильной растительностью от слабо зарастающего до не зарастающего. Основными типами распределения водной и прибрежно-водной растительности выступают поясной и фрагментарный. Сообщества макрофитов характеризуются упрощенной структурой (одно- или двухъярусные), с абсолютным доминированием одного вида растений и наличием от двух до четырех сопутствующих видов с низкими значениями проективного покрытия. Результаты расчетов индексов (макрофитный индекс для малых рек (S_m), Indice Biologique Macrophytique en Riviere (IBMR)) на основе структурных параметров макрофитов показали, что изученные реки имеют удовлетворительный экологический статус.

Ключевые слова: макрофиты, малые реки, гидрофильная флора, индекс доминирования, сообщества макрофитов, МО г. Саратов

✉ Для корреспонденции. Кафедра ботаники и экологии Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

ORCID и e-mail адреса: Беликов Александр Сергеевич: <https://orcid.org/0000-0002-5359-1065>, a.belik99@mail.ru; Болдырев Владимир Александрович: <https://orcid.org/0000-0003-0322-3755>, boldyrev52@bk.ru; Седова Оксана Владимировна: <https://orcid.org/0000-0001-9866-6094>, sedova_ov@mail.ru; Торгашкова Ольга Николаевна: <https://orcid.org/0000-0002-3478-5526>, torgaschkova88@mail.ru.

Для цитирования. Беликов А. С., Болдырев В. А., Седова О. В., Торгашкова О. Н. Структура сообществ макрофитов малых рек города Саратова в условиях антропогенной нагрузки // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 259 – 273. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-259-273>

ВВЕДЕНИЕ

Макрофиты являются основой функционирования водных экосистем и в то же время самым динамичным и уязвимым их компонентом, так как при антропогенном загрязнении водоемов отмечаются снижение разнообразия водных растений, упрощение структуры их сообществ, смена доминирующих видов макрофитов (Чукина, Борисова, 2010; Винокурова и др., 2015; Melzer, Schneider, 2001; Bornette, Puijalon, 2011; Wiegleb, Gebler, 2016; Abell et al., 2022; Jewell et al., 2023). Изменения структуры и состава растительных сообществ, которые наблюдаются в водотоках в течение нескольких лет, свидетельствуют об их антропогенной трансформации. Следовательно, состояние сообществ макрофитов является необходимым критерием в экологических исследованиях водоёмов (Дубына и др., 1993; Свириденко и др., 2012; Лобкова и др., 2021; Baldantoni et al., 2005; Szoszkiewicz et al., 2009, 2010; Bornette, Puijalon, 2011; Singh et al., 2016; Ceschin et al., 2021; Scofield et al., 2023).

Цель данного исследования – выявить состав и структуру сообществ макрофитов некоторых рек в пределах муниципального образования «Город Саратов» (МО г. Саратов), характеризующихся разными формами антропогенной нагрузки, и на основе полученных данных оценить экологическое состояние речных экосистем.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на малых реках Елшанка, Назаровка, 1-я Гусёлка и 2-я Гусёлка, протекающих по территории МО г. Саратов. По данным Государственного водного реестра России, изученные реки относятся к Нижневолжскому бассейновому округу (Государственный..., 2023).

Река Елшанка начинается в районе пос. Жасминный и течёт на северо-восток по пос. Елшанка. Длина реки составляет 26 км, площадь бассейна – 176 км². Русло реки извилистое, ширина у истока не более 1 м, затем расширяется до 4 м. Впадает в р. Курдюм.

Река Назаровка берет начало в прудах у пос. Тепличный. Длина ее составляет около 20 км. Ниже по течению река соединяется со своим притоком Березиной речкой и впадает в Волгоградское водохранилище в районе пос. Увек.

Исток р. 1-я Гусёлка находится вблизи ипподрома. Длина водотока равна 12 км, водосборная площадь составляет 87.7 км². Исток р. 2-я Гусёлка располагается в районе пруда Зеркальный у Вольского тракта. Длина водотока 2-й Гусёлки равна 12 км, водосборная площадь составляет 36.6 км². За Гусельским мостом реки соединяются и впадают в Гусельский залив.

Изучение видового состава гидрофильных растительных сообществ осуществлялось в вегетационные сезоны 2020 – 2022 гг. Растительность изучали на

СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ МАКРОФИТОВ МАЛЫХ РЕК

профилях, которые закладывались от уреза воды вглубь водотока. Каждый профиль состоял из серии пробных площадок, размер которых определялся в зависимости от ширины поясов – 2×2 м, 1×4 м, 0.5×8 м, либо естественными границами фитоценозов. Осуществлялось подробное описание водных и прибрежно-водных фитоценозов: составлялся список видов, отмечались максимальная высота растений, проективное покрытие (ПП) и обилие. Выявлялись особенности размещения макрофитов (куртинами, фрагментами, поясами и др.) по площади водоема (Катанская, 1981; Соловьева, Лапилов, 2013).

Названия видов растений приведены по сводке С. К. Черепанова (1995).

Гидрохимический анализ воды и донных отложений осуществлялся методами фотометрического определения растворенных ортофосфатов, железа с сульфосалициловой кислотой; перманганатная окисляемость – методом Кубеля; сульфаты – комплексонометрическим методом; хлорид-ионы – методом аргентометрии; нитриты – спектрофотометрическим методом (Петин, 2006; Давиденко и др., 2011; Порфирьева и др., 2018).

При выявлении видового сходства исследуемых сообществ применялся индекс Чекановского – Серенсена (Матвеев и др., 2005). Для оценки доминирования видов рассчитывался индекс доминирования Паля – Ковнацки D_i (Палий, 1961; Kownacki, 1971). Также вычислялись индексы видового разнообразия Менхиника D_{mn} (Menhinick, 1964), индекс гидрофитности I_{Hq} (Свириденко и др., 2012), индекс загрязненности воды (ИЗВ) (Глотова, 2006), макрофитный индекс для малых рек (Зуева, 2007) и индекс IBMR (Indice Biologique Macrophytique en Riviere), основанный на сравнении флористических списков водотоков и учете индикаторной значимости видов макрофитов (Зуева и др., 2019; Naury et al., 2006). Зависимость числа видов от экологического состояния речных экосистем анализировали с помощью аппроксимации нелинейной степенной функцией, качество которой оценивали с помощью коэффициента детерминации (R^2).

Статистическая обработка выполнена в пакетах программ MS Excel 2010 (Microsoft Corp.) и Statistica 6.0 (StatSoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основными источниками поступления загрязняющих веществ в изученные реки являются сбросы предприятий (Саратовский нефтеперерабатывающий завод (СНПЗ), ООО «Саратоворгсинтез»), коммунально-бытовых сточных вод, поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий.

В результате изучения видового состава сообществ макрофитов малых рек МО г. Саратов было выявлено 37 видов растений, принадлежащих к 23 родам, 17 семействам и трем отделам Charophyta, Polypodiophyta и Magnoliophyta. Отделы Charophyta и Polypodiophyta содержат по одному виду *Chara* sp. и *Salvinia natans* соответственно. В исследованной флоре по количеству представленных видов господствуют семейства Potamogetonaceae (18.9% от общего числа видов), Cyperaceae (16.3%) и Lemnaceae (10.8%). На долю семейств Hydrocharitaceae, Poaceae, Nymphaeaceae, Ceratophyllaceae, Alismataceae, Typhaceae приходится по 5.4% (по два

вида), а семейств Characeae, Salviniaceae, Lythraceae, Polygonaceae, Umbelliferae, Butomaceae, Iridaceae и Najadaceae – по 2.7% (по одному виду).

Значения индекса Менхиника свидетельствуют, что наибольшее видовое разнообразие характерно для рек Елшанка и Назаровка (соответственно $D_{mn} = 3.1$ и 3.4), что объясняется наличием на этих реках доступных мест обитания для макрофитов, например, создание прудов способствует расширению зоны мелководий и замедлению течения. Обедненной является флора р. 1-я Гуселка ($D_{mn} = 2.3$), поскольку преобладающую часть вегетационного периода русло на значительном протяжении пересыхает.

Изученные реки характеризуются низкой степенью зарастания русла гидрофитной растительностью от слабо зарастающего до не зарастающего. Основными типами распределения водной и прибрежно-водной растительности выступают поясный и фрагментарный. На доступных для произрастания участках гелофитная растительность представлена преимущественно фитоценозами *Phragmites australis*, расположенными узкими (2 – 3 м) поясами или обширными массивами, в составе которых встречаются куртины *Typha angustifolia* или *T. latifolia*. Либо *T. angustifolia* узкой полосой окаймляет заросли *Phragmites australis*, а небольшие массивы *T. latifolia* встречаются в виде отдельных участков на реках Елшанка и Назаровка. В толще воды повсеместно господствует *Ceratophyllum demersum*. На открытых участках всех водотоков встречаются *Potamogeton perfoliatus* и *P. crispus*. На реках Назаровка и Елшанка в небольшом количестве зарегистрированы *Potamogeton pectinatus*, *P. lucens* и *P. nodosus*. Для некоторых участков рек, особенно Назаровки, характерно обильное разрастание сплошным ковром *Lemna minor* и *L. gibba*. Отмечены единичные экземпляры *Potamogeton acutifolius* на р. 2-я Гуселка и *P. berchtoldii* на р. Елшанке. Сообщества макрофитов характеризуются упрощенной структурой (одно- или двухъярусные) с абсолютным доминированием одного вида растений и наличием от двух до четырех сопутствующих видов с низкими значениями проективного покрытия.

Согласно индексу доминирования Паляя – Ковнацки среди макрофитов изученных рек большинство видов относится к субдоминантам (57.28%) (*Potamogeton perfoliatus*, *Typha angustifolia*, *Lemna trisulca* и др.), к доминантам принадлежат 37.18% (*Phragmites australis*, *Potamogeton pectinatus*, *Lemna minor*, *Ceratophyllum demersum*), остальные виды (11.54%) определены как субдоминанты первого порядка.

Макрофиты изученной флоры принадлежат к трём основным экологическим группам: гидрофитам, гелофитам и гидрогелофитам по классификации, предложенной В. Г. Папченковым (2001). Самой многочисленной экологической группой являются гидрофиты, насчитывающие 22 вида (60.5%). Большинство из них (35.29%) представлены группой погруженных в воду, укореняющихся гидрофитов (*Potamogeton acutifolius*, *P. berchtoldii*, *P. pectinatus*, *P. crispus*, *P. lucens*, *P. perfoliatus*, *Najas major*). На долю укореняющихся гидрофитов с плавающими на поверхности воды листьями (*Potamogeton natans*, *Nuphar lutea*, *Nymphaea candida*) и гидрофитов не укореняющихся, свободно плавающих на поверхности воды (*Lemna minor*, *L. gibba*, *Salvinia natans*, *Hydrocharis morsus-ranae*) приходится по 11.76%. Наиболее малочисленной группой являются погруженные в воду не укореняющиеся

гидрофиты, к которой относятся два вида: *Lemna trisulca* и *Ceratophyllum demersum* (5.88%).

Гелофиты представлены пятью видами: *Typha angustifolia*, *T. latifolia*, *Butomus umbellatus*, *Scirpus lacustris*, *Phragmites australis*, *Alisma plantago-aquatica*, *A. gramineum*, что составляет 18.4% от всех макрофитов. Гигрогелофитами являются восемь видов: *Agrostis stolonifera*, *Bolboschoenus maritimus*, *Carex pseudocyperus*, *C. acuta*, *Scirpus sylvaticus*, *Iris pseudacorus*, *Lythrum salicaria*, *Stium latifolium*, на их долю приходится 21.1%.

Таксономическая и экологическая структура флор рек, имеющих свой водосбор и русло на урбанизированной территории и в условиях со сниженным антропогенным прессом, значительно отличаются (рис. 1).

Реки Терешка и Терса, протекающие на значительном протяжении по территории Национального парка «Хвалынский», имеют более богатые флоры, нежели реки МО г. Саратов (Старчиков и др., 2017; Седова и др., 2020). Регрессионная линия отражает закономерное снижение числа видов при увеличении антропогенной нагрузки (рис. 2).

Результаты анализа гигроморф водотоков с незначительной антропогенной нагрузкой показали, что наибольшая роль в формировании их флор принадлежит заходящим в воду береговым растениям и растениям умеренно увлажненных местообитаний (рис. 3).

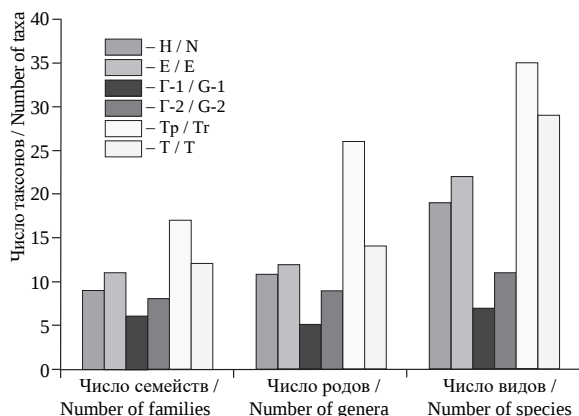


Рис. 1. Таксономическая структура флор некоторых рек Саратовского Правобережья: Н – Назаровка, Е – Елшанка, Г-1 – 1-я Гуселка, Г-2 – 2-я Гуселка, Тр – Терешка, Т – Терса

Fig. 1. Taxonomic structure of the floras of some rivers of the Saratov Volga right bank: N – Nazarovka, E – Yelshanka, G-1 – 1st Guselka, G-2 – 2nd Guselka, Tr – Tereshka, T – Tersa

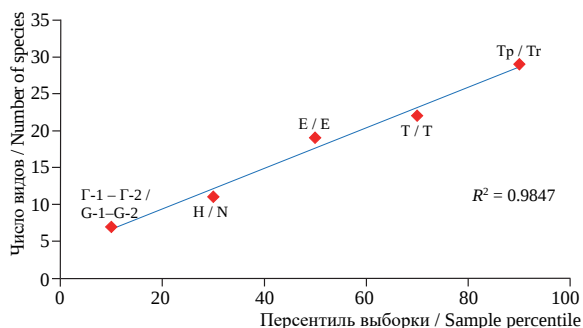


Рис. 2. Видовое разнообразие водной флоры некоторых рек Саратовского Правобережья, характеризующихся разным уровнем антропогенной нагрузки: Г-1 – 1-я Гуселка, Г-2 – 2-я Гуселка, Н – Назаровка, Е – Елшанка, Т – Терса, Тр – Терешка

Fig. 2. Species diversity of the aquatic flora of some rivers of the Saratov Volga right bank, characterized by different levels of anthropogenic load: G-1 – 1st Guselka, G-2 – 2nd Guselka, N – Nazarovka, E – Yelshanka, T – Tersa, Tr – Tereshka

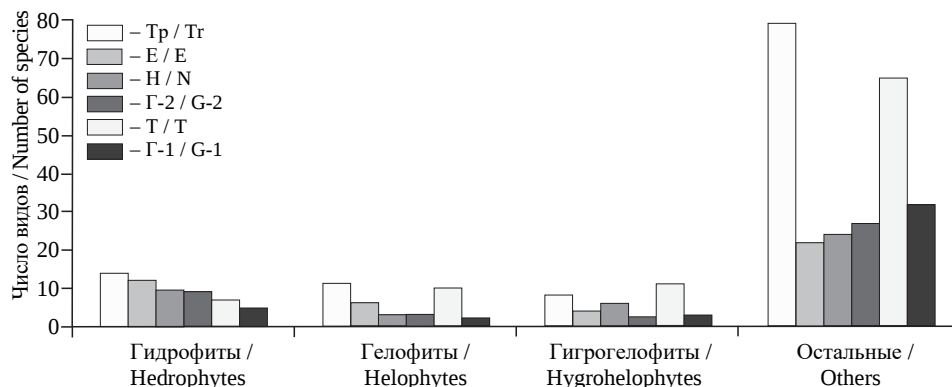


Рис. 3. Экологический состав водной флоры некоторых рек Саратовского Правобережья: Тр – Терешка, Е – Елшанка, Н – Назаровка, Г-2 – 2-я Гуселка, Т – Терса, Г-1 – 1-я Гуселка
Fig. 3. Ecological composition of the aquatic flora of some rivers of the Saratov Volga right bank: Tr – Tereshka, E – Elshanka, N – Nazarovka, G-2 – 2nd Guselka, T – Tera, G-1 – 1st Guselka

Основными ценозообразователями этих рек являются гелофиты *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Butomus umbellatus* и *Sparganium erectum*. Гидрофиты здесь в сложении флоры и растительности значительной роли не играют (Седова, Лаврентьев, 2021).

Во флоре малых рек МО г. Саратов доминирующей группой растений были гидрофиты (22 вида), гигрофитов обнаружено только 12 видов, что составляет 28.94% от числа видов всей флоры. Снижение разнообразия гигрофитов связано с отсутствием для них возможных мест обитания в исследованных реках, что выражается в значительной забетонированности, либо захламленности твердыми бытовыми отходами. Результаты проведенных наблюдений подтверждаются и значениями индексов гидрофитности исследованных водотоков (табл. 1).

Таблица 1. Индексы гидрофитности I_{Hg} некоторых рек Саратовского правобережья

Table 1. Hydrophytic indices I_{Hg} of some rivers of the Saratov Volga right bank

Река / River	Индекс гидрофитности / Hydrophytic index
Терешка / Tereshka	-0.1
Терса / Teresa	-0.8
Елшанка / Elshanka	0.04
Назаровка / Nazarovka	0.05
1-я Гуселка / 1 st Guselka	0.03
2-я Гуселка / 2 nd Guselka	0.04

считаны попарные коэффициенты сходства Серенсена – Чекановского их флористического состава (табл. 2).

Как видно из табл. 1, все реки характеризуются низкой долей гидрофитов, но в водотоках МО г. Саратов эта группа растений участвует в формировании растительного покрова наравне с гелофитами и гигрогелофитами.

На основании данных по видовому составу высшей водной растительности исследованных рек были рас-

СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ МАКРОФИТОВ МАЛЫХ РЕК

Таблица 2. Коэффициенты сходства флористического состава исследованных рек

Table 2. Coefficients of similarity of the floristic composition of the studied rivers

Река / River	Елшанка / Elshanka	Назаровка / Nazarovka	1-я Гуселка / 1st Guselka	2-я Гуселка / 2nd Guselka	Терешка / Tereshka	Терса / Tersa
Елшанка / Elshanka	1	0.34	0.19	0.17	0.29	0.26
Назаровка / Nazarovka		1	0.22	0.19	0.29	0.24
1-я Гуселка / 1 st Guselka			1	0.37	0.13	0.11
2-я Гуселка / 2 nd Guselka				1	0.18	0.11
Терешка / Tereshka					1	0.31
Терса / Tersa						1

Наиболее близки флоры рек Назаровки и Елшанки, 1-й и 2-й Гуселок. 2-я Гуселка значительно отличается во флористическом отношении от других рек МО г. Саратов. Здесь, помимо повсеместно встречающихся видов растений, отмечены *Najas major*, *Scirpus lacustris*, *Lemna trisulca*, *Nuphar lutea*, *Nymphaea candida*. На состав флоры этой реки оказывает значительное влияние флора Волгоградского водохранилища, при этом основное ее разнообразие приходится на устьевой участок. Видовой состав водных растений исследованных рек в пределах городской территории имеет низкий коэффициент сходства с флорами рек с относительно низкой антропогенной нагрузкой. На значительном протяжении русла городских рек зарегулированы, воды загрязнены химическими и бытовыми отходами, берега забетонированы и здесь в основном обитают виды с широкой экологической валентностью, а наиболее чувствительные виды выпадают. В растительных сообществах малых рек отмечено исключительное преобладание *Ceratophyllum demersum* и *Phragmites australis*, которые выступали в роли доминантов на всех изученных водотоках.

Результаты химического анализа воды показали, что содержание хлоридов и сульфатов во всех реках не превышает предельно-допустимых концентраций (ПДК). Кислородный режим рек благоприятный (величина перманганатной окисляемости 7.1 мг/дм³), содержание общего органического вещества колеблется от 19 до 22 мг/дм³. В некоторых пунктах отмечены максимальные концентрации аммонийного азота (от 0.07 до 0.14 мг/дм³), меди (от 0.02 до 0.05 мг/дм³), железа (от 0.11 до 0.41 мг/л), йода (от 0.4 до 1.4 мг/л), марганца (от 0.11 до 1.9 мг/л), нитритного азота (от 0.016 до 0.025 мг/дм³), превышающие ПДК. Концентрация нефтепродуктов, превышающая ПДК, отмечена во всех пунктах р. Назаровки (2 – 3 ПДК) и некоторых пунктах рек Елшанки (1.2 ПДК) и Гуселок (1.1 ПДК).

По индексу загрязнения воды (ИЗВ) все исследованные реки относятся к 4-му классу качества и оцениваются как загрязненные. При этом наибольшим загрязнением характеризуется р. Назаровка, а наименьшим – р. 1-я Гуселка (табл. 3).

Результаты расчетов индексов на основе структурных параметров макрофитов показали, что экологическое состояние всех изученных рек имеет удовлетворительный экологический статус. При этом значения этого индекса приближаются к нижней границе интервала удовлетворительного экологического состояния. Зна-

чение *IBMR* более десяти баллов характерно для водных экосистем истоков рек, где экологическая ситуация по суммарному антропогенному загрязнению оценивается как «относительно благоприятная». Трофический статус рек – «очень высокий». По показателям структурных параметров макрофитов водные экосистемы рек являются сильно загрязненными, что сопоставимо с их оценкой по гидрохимическим характеристикам.

Табл. 3. Значения некоторых индексов для рек МО г. Саратов
Table 3. Values of some indices for the rivers of Saratov municipal district

Индекс / Index	Река / River			
	Елшанка / Elshanka	Назаровка / Nazarovka	1-я Гуселка / 1 st Guselka	2-я Гуселка / 2 nd Guselka
<i>IBMR</i>	6.4	7	6	6
S_m	6 (грязная / dirty)	6.3 (грязная / dirty)	6.5 (грязная / dirty)	6.7 (грязная / dirty)
ИЗВ	2.76	3.48	2.73	2.89
Класс качества воды по трофности / Water quality class by trophicity	Очень высокая трофность / Very high trophicity	Очень высокая трофность / Very high trophicity	Очень высокая трофность / Very high trophicity	Очень высокая трофность / Very high trophicity
Класс качества воды по ИЗВ / WPI water quality class	IV класс – загрязненная / IV class – polluted	IV класс – загрязненная / IV class – polluted	IV класс – загрязненная / IV class – polluted	IV класс – загрязненная / IV class – polluted
Экологическое состояние / Ecological status	Удовлетворительное / Satisfactory	Удовлетворительное / Satisfactory	Удовлетворительное / Satisfactory	Удовлетворительное / Satisfactory

Примечание. *IBMR* – Indice Biologique Macrophytique en Riviere, S_m – макрофитный индекс для малых рек, ИЗВ – индекс загрязненности воды.

Note. *IBMR* – Indice Biologique Macrophytique en Riviere, S_m – macrophyte index for small rivers, ИЗВ – water pollution index.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во флорах малых рек МО г. Саратов в отличие от рек Терешка и Терса с относительно низкой антропогенной нагрузкой, наиболее многочисленной группой были гидрофиты, видовой состав остальных экотипов обеднен. Снижение видового разнообразия гелофитов и гигрофитов связано с отсутствием для них возможных мест обитания.

Видовой состав водных растений водотоков в пределах городских территорий и рек с относительно низкой антропогенной нагрузкой имеет низкие коэффициенты сходства. В городских водотоках в основном обитают виды с широкой экологической валентностью. *Ceratophyllum demersum* и *Phragmites australis* выступают в роли доминантов во всех изученных реках. Согласно индексу доминирования Палия – Ковнацки, среди макрофитов изученных рек большинство видов относится к субдоминантам (57.28%) (*Potamogeton perfoliatus*, *Typha angustifolia*, *Lemna trisulca* и др.), к доминантам принадлежат 37.18% (*Phragmites australis*, *Potamogeton pectinatus*, *Lemna minor*, *Ceratophyllum demersum*), остальные (11.54%) определены как субдоминанты первого порядка.

По ИЗВ все исследованные реки относятся к 4-му классу качества и оцениваются как загрязненные, что сопоставимо с оценкой рек по биологическому индексу макрофитов (IBMR). Результаты расчетов индексов на основе структурных параметров макрофитов показали, что реки имеют удовлетворительный экологический статус.

Таким образом, выявленные таксономические и экологические характеристики растительных сообществ урбанизированных рек МО г. Саратов в значительной мере определяются степенью антропогенной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Винокурова Н. В., Соловых Г. Н., Донскова С. А. Макрофиты в структуре формирования экосистем р. Урал // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 10. С. 108 – 111.

Глотова Н. В. Мониторинг среды обитания: учебное пособие к практическим занятиям. Челябинск: Издательство Южно-Уральского государственного университета, 2006. 22 с.

Государственный водный реестр. 2023. URL: <https://textual.ru/gvr/> (дата обращения: 25.02.2023).

Давиденко Т. Н., Невский С. А., Торгашкова О. Н., Давиденко О. Н. Ботанико-экологический практикум: методы сбора и анализа данных. Саратов: Издательский центр «Наука», 2011. 67 с.

Дубына Д. В., Гейны С., Стойко С. М., Сытник К. М., Тасенкевич Л. А., Шеляг-Сосонко Ю. Р., Гроудова З., Гусак Ш., Отягелова Г., Эржабкова О. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды. Киев: Наукова думка, 1993. 435 с.

Зуева Н. В. Оценка экологического состояния малых рек Северо-Запада России на основе структурных характеристик сообществ макрофитов (на примере Ленинградской области): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2007. 24 с.

Зуева Н. В., Алексеев Д. К., Куличенко А. Ю., Примак Е. А., Зуев Ю. А., Воякина Е. Ю., Степанова А. Б. Биоиндикация и биотестирование в пресноводных экосистемах: учебное пособие для высших учебных заведений. СПб.: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2019. 140 с.

Катанская В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1981. 187 с.

Лобкова Г. В., Тихомирова Е. И., Симонова З. А. Оценка воздействия солей тяжелых металлов на фотосинтетическую активность водных растений // Поволжский экологический журнал. 2021. № 3. С. 310 – 318. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-3-310-318>

Матвеев В. И., Соловьева В. В., Саксонов С. В. Экология водных растений: учебное пособие. 2-е изд., доп. и перераб. Самара: Самарский научный центр РАН, 2005. 282 с.

Палий В. Ф. О количественных показателях при обработке фаунистических материалов // Зоологический журнал. 1961. Т. 60, вып. 1. С. 3 – 12.

Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: Международный университет бизнеса и новых технологий, 2001. 213 с.

Петин А. Н., Лебедева М. Г., Крымская О. В. Анализ и оценка качества поверхностных вод: учебное пособие. Белгород: Белгородский государственный университет, 2006. 252 с.

Порфирьева А. В., Зиятдинова Г. К., Медянцева Э. П., Евтюгин Г. А. Гидрохимический анализ: учеб. пособие. Казань: Издательство Казанского университета, 2018. 88 с.

Свириденко Б. Ф., Мамонтов Т. В., Свириденко Т. В. Использование гидромacroфитов в комплексной оценке экологического состояния водных объектов Западно-Сибирской равнины. Сургут: ООО «Студия рекламы «Матрёшка», 2012. 231 с.

Седова О. В., Лаврентьев М. В. Гидрофильная флора и растительность водоемов и водотоков Национального парка «Хвалынский». Саратов: Амирит, 2021. 147 с.

Седова О. В., Лаврентьев М. В., Чарыев Р. Р. Растительность реки Терсы в пределах Саратовской области // Теоретические проблемы экологии и эволюции. Качество воды и водные биоресурсы (VII Любичевские чтения): материалы международных научных чтений / под ред. Г. С. Розенберга, С. В. Саксонова. Тольятти: Анна, 2020. С. 313 – 315.

Соловьева В. В., Липуров А. Г. Гидробиотика: учебник для высших учебных заведений. Самара: Поволжская государственная социально-гуманитарная академия, 2013. 354 с.

Старчиков А. А., Седова О. В., Лаврентьев М. В. Структура флоры реки Терешки на территории НП «Хвалынский» // Научные труды Национального парка «Хвалынский». Саратов; Хвалынский: Амирит, 2017. Вып. 9. С. 53 – 56.

Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья-95, 1995. 990 с.

Чукина Н. В., Борисова Г. Г. Структурно-функциональные показатели высших водных растений из местообитаний с разным уровнем антропогенного воздействия // Биология внутренних вод. 2010. № 1. С. 49 – 56.

Abell J. M., Özkundakci D., Hamilton D. P., Reeves P. Restoring shallow lakes impaired by eutrophication: Approaches, outcomes, and challenges // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 52, iss. 7. P. 1199 – 1246. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1854564>

Baldantoni D., Maisto G., Bartoli G., Alfani A. Analyses of three native aquatic plant species to assess spatial gradients of lake trace element contamination // Aquatic Botany. 2005. Vol. 83, iss. 1. P. 48 – 60. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.05.006>

Bornette G., Puijalon S. Response of aquatic plants to abiotic factors: A review // Aquatic Sciences. 2011. Vol. 73, iss. 1. P. 1 – 14. <https://doi.org/10.1007/s00027-010-0162-7>

Ceschin S., Bellini A., Scalici M. Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: A review // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28, iss. 5. P. 4975 – 4988. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11496-3>

Haury J., Peltre M.-C., Trémolières M., Barbe J., Thiébaud G., Bernez I., Daniel H., Chate-net P., Haan-Archipof G., Muller S., Dutartre A., Laplace-Treytore C., Cazaubon A., Lambert-Servien E. A new method to assess water trophy and organic pollution – the Macrophyte Biological Index for Rivers (IBMR): Its application to different types of river and pollution // Macrophytes in Aquatic Ecosystems: From Biology to Management / eds. J. M. Caffrey, A. Dutartre, J. Haury, K. J. Murphy, P. M. Wade. Dordrecht: Springer, 2006. P. 153 – 158. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5390-0_22

Jewell M. D., Moorsel S. J. van, Bell G. Geographical distribution of floating aquatic plants in relation to environmental conditions in southern Quebec, Canada // Aquatic Botany. 2023. Vol. 187. Article number 103657. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2023.103657>

Kownacki A. Taxocens of Chironomidae in streams of the Polish High Tatra Mts // Acta Hydrobiology. 1971. Vol. 13, № 4. P. 439 – 464.

Melzer A., Schneider S. Submerse Macrophytes als Indikatoren der Nährstoffbelastung // Handbuch Angewandte Limnologie / eds. C. Steinberg, W. Calmano, H. Klapper, R.-D. Wilken. Landsberg: Ecomed Verlagsgesellschaft, 2001. Bd. VIII. S. 1 – 13.

Menhinick E. F. A comparison of some species-individuals diversity indices applied to samples of field insects // Ecology. 1964. Vol. 45, № 4. P. 859 – 861.

Scofield B. D., Fields S. F., Chess D. W. Aquatic macrophytes show distinct spatial trends in contaminant metal and nutrient concentrations in Coeur d'Alene Lake, USA // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30, iss. 25. P. 66610 – 66624. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27211-x>

Singh N. K., Raghubanshi A. S., Upadhyay A. K., Rai U. N. Arsenic and other heavy metal accumulation in plants and algae growing naturally in contaminated area of West Bengal, India // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 130. P. 224 – 233. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.04.024>

Szoszkiewicz K., Zbierska J., Staniszewski R., Jusik S. The variability of macrophyte metrics used in river monitoring // *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2009. Vol. 38, iss. 4. P. 117 – 126. <https://doi.org/10.2478/v10009-009-0049-x>

Szoszkiewicz K., Zbierska J., Jusik S., Zgoła T. Makrofitowa Metoda Oceny Rzek – Podręcznik metodyczny do oceny i klasyfikacji stanu ekologicznego wód płynących w oparciu o rośliny wodne. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2010. 82 S.

Wiegand G., Gebler D., Van De Weyer K., Birk S. Comparative test of ecological assessment methods of lowland streams based on longterm monitoring data of macrophytes // *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 541. P. 1269 – 1281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.005>

Structure of the macrophyte communities of small rivers in Saratov under anthropogenic load

A. S. Belikov✉, V. A. Boldyrev, O. V. Sedova, O. N. Torgashkova

Saratov State University
83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Received: March 22, 2023 / revised: May 20, 2023 / accepted: May 22, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. The article presents the results of investigations of the flora of small rivers within the city of Saratov (Yelshanka, Nazarovka, 1st Gussyolka, and 2nd Gussyolka). The species composition of aquatic plants of the streams studied is represented by 37 macrophyte species belonging to 23 genera, 17 families and three divisions (Charophyta, Polypodiophyta, and Magnoliophyta). The families Potamogetonaceae, Cyperaceae and Lemnaceae predominate by the number of represented species. The values of the Menchinik index indicate that the greatest floristic diversity is characteristic of the Yelshanka and Nazarovka rivers (3.1 and 3.4, respectively). The species composition of aquatic plants of the studied rivers within the urban area has a low similarity coefficient with the flora of rivers with relatively low anthropogenic load. Hydrophytes are the most numerous ecological group (22 species). According to the Paley–Kownacki dominance index, among the macrophytes of the studied rivers, most species are subdominant (57.28%) (*Potamogeton perfoliatus*, *Typha angustifolia*, *Lemna trisulca*, etc.). 37.18% (*Phragmites australis*, *Potamogeton pectinatus*, *Lemna minor*, *Ceratophyllum demersum*) belong to dominants, and the rest (11.54%) is defined as subdominants of the first order. Exceptional predominance is characteristic of *Ceratophyllum demersum* and *Phragmites australis*, which acted as dominants in all studied rivers. A significant part of the rivers is characterized by a low degree of overgrowth by hydrophilous vegetation, from slightly overgrown to not overgrown. The main types of distribution of aquatic and riparian-water vegetation are belted and fragmentary. Macrophyte communities are characterized by a simplified structure (one- or two-tiered), with absolute predominance of one plant species and the presence of two to four associated species with low values of projective coverage. The results of our calculations of indices (macrophyte index for small rivers (S_m), Indice Biologique Macrophytique in Riviere (IBMR)) based on the structural parameters of macrophytes showed that the studied rivers have a satisfactory ecological status.

Keywords: macrophytes, small rivers, hydrophilic flora, dominance index, macrophyte communities, Saratov

For citation: Belikov A. S., Boldyrev V. A., Sedova O. V., Torgashkova O. N. Structure of the macrophyte communities of small rivers in Saratov under anthropogenic load. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 259–273 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-259-273>

✉ Corresponding author. Department of Botany and Ecology, Saratov State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Alexander S. Belikov: <https://orcid.org/0000-0002-5359-1065>, a.belik99@mail.ru; Vladimir A. Boldyrev: <https://orcid.org/0000-0003-0322-3755>, boldyrev52@bk.ru; Oksana V. Sedova: <https://orcid.org/0000-0001-9866-6094>, sedova_ov@mail.ru; Olga N. Torgashkova: <https://orcid.org/0000-0002-3478-5526>, torgaschkova88@mail.ru.

REFERENCES

- Vinokurova N. V., Solovovyykh G. N., Donskova S. A. Macrophytes in the structure of formation of the Ural river ecosystem. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2015, no. 10, pp. 108–111 (in Russian).
- Glotova N. V. *Monitoring sredy obitaniia: uchebnoe posobie k prakticheskim zaniatiim* [Habitat Monitoring: Textbook for practical classes]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2006. 22 p. (in Russian).
- Gosudarstvennyi vodnyi reestr [State Water Register]. 2023. Available at: <https://textual.ru/gvr/> (accessed February 25, 2023).
- Davidenko T. N., Nevsky S. A., Torgashkova O. N., Davidenko O. N. *Botaniko-ekologicheskii praktikum: metody sbora i analiza dannykh* [Botanico-ecological Workshop: Methods of Data Collection and Analysis]. Saratov, Izdatel'skii tsentr "Nauka", 2011. 67 p. (in Russian).
- Dubyna D. V., Gainy S., Stoyko S. M., Sytnik K. M., Tassenkevich L. A., Shelyag-Sosonko Y. R., Groudova Z., Husak Sh., Otyagelova G., Erzhabkova O. *Makrofity – indikatory izmenenii prirodnoi sredy* [Macrophytes – Indicators of Changes in the Natural Environment]. Kiev, Naukova dumka, 1993. 435 p. (in Russian).
- Zueva N. V. *Assessment of the Ecological State of Small Rivers of North-West Russia on the Basis of Structural Characteristics of Macrophyte Communities (on the example of the Leningrad Region)*. Thesis Diss. Cand. Sci. (Geogr.). Saint Petersburg, 2007. 24 p. (in Russian).
- Zueva N. V., Alekseev D. K., Kulichenko A. Yu. Yu. Y., Stepanova A. B. *Bioindikatsiia i biotestirovanie v presnovodnykh ekosistemakh: uchebnoe posobie dlia vysshikh uchebnykh zavedenii* [Bioindication and Biotesting in Freshwater Ecosystems: Textbook for higher educational institutions]. Saint Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2019. 140 p. (in Russian).
- Katanskaya V. M. *Vysshaya vodnaya rastitel'nost' kontinental'nykh vodoemov SSSR* [Higher Aquatic Plants in USSR Continental Water Bodies]. Leningrad, Nauka Publ., 1981. 187 p. (in Russian).
- Lobkova G. V., Tikhomirova E. I., Simonova Z. A. Assessment of the effect of heavy metal salts on the photosynthetic activity of aquatic plants. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 3, pp. 310–318 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-3-310-318>
- Matveev V. I., Solovieva V. V., Saxonov S. V. *Ekologiia vodnykh rastenii: uchebnoe posobie. 2-e izd., dop. i pererab.* [Ecology of Aquatic Plants: Textbook. 2nd edition, supplement and revision]. Samara, Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2005. 282 p. (in Russian).
- Paliy V. F. On quantitative indicators in the processing of faunistic materials. *Zoologicheskii zhurnal*, 1961, vol. 60, iss. 1, pp. 3–12 (in Russian).
- Papchenkov V. G. *Rastitel'nyi pokrov vodoemov i vodotokov Srednego Povolzh'ia* [Vegetation Cover of Water Bodies and Watercourses of the Middle Volga Region]. Yaroslavl, International University of Business and New Technologies Publ., 2001. 213 p. (in Russian).
- Petin A. N. N., Lebedeva M. G., Krymskaya O. V. *Analiz i otsenka kachestva poverkhnostnykh vod: uchebnoe posobie* [Analysis and Assessment of Surface Water Quality: Textbook]. Belgorod, Belgorod State University Publ., 2006. 252 p. (in Russian).
- Porfirieva A. V., Ziyatdinova G. K., Medyantseva E. P., Evtyugin G. A. *Gidrokhimicheskii analiz: uchebnoe posobie* [Hydrochemical Analysis: Textbook]. Kazan, Kazan University Publishing House, 2018. 88 p. (in Russian).
- Sviridenko B. F., Mamontov Yu. S., Sviridenko T. V. *The Use of Hydro-macrophytes in a Comprehensive Evaluation of the Ecological Condition of Water Bodies of the West Siberian*

Plain. Surgut, Limited Liability Company «Studio advertisement “Matryoshka”, 2012. 231 p. (in Russian).

Sedova O. V., Lavrentiev M. V. *Gidrofil'naia flora i rastitel'nost' vodoemov i vodotokov Natsional'nogo parka “Khvalynskii”* [Hydrophilic Flora and Vegetation of Water Bodies and Watercourses of the National Park “Khvalynsky”]. Saratov, Amirit, 2021. 147 p. (in Russian).

Sedova O. V., Lavrentiev M. V., Charyev R. R. Vegetation of the Tersa river within the Saratov region. In: G. S. Rosenberg, S. V. Saxonov, eds. *Theoretical Problems of Ecology and Evolution. Water Quality and Aquatic Bioresources (VII Lyubishchev Readings): Proceedings of the International Scientific Readings*. Togliatti, Anna, 2020, pp. 313–315 (in Russian).

Solovieva V. V., Lapirov A. G. *Gidrobotanika: uchebnik dlia vysshikh uchebnykh zavedenii* [Hydrobotany: Textbook for higher educational institutions]. Samara, Volga State Social and Humanitarian Academy Publ., 2013. 354 p. (in Russian).

Starchikov A. A., Sedova O. V., Lavrentiev M. V. Structure of the flora of the Tereshka River on the territory of the Khvalynsky National Park. *Scientific Papers of Khvalynsky National Park*. Saratov, Khvalynsk, Amirit, 2017, vol. 9, pp. 53–56 (in Russian).

Cherepanov S. K. *Vascular Plants of Russia and Adjacent States (the former USSR)*. Saint Petersburg, Mir i sem'ia-95, 1995. 990 p. (in Russian).

Chukina N. V., Borisova G. G. Structural and functional parameters of higher aquatic plants from habitats differing in levels of anthropogenic impact. *Inland Water Biology*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 44–50.

Abell J. M., Özkundakci D., Hamilton D. P., Reeves P. Restoring shallow lakes impaired by eutrophication: Approaches, outcomes, and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, vol. 52, iss. 7, pp. 1199–1246. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1854564>

Baldantoni D., Maisto G., Bartoli G., Alfani A. Analyses of three native aquatic plant species to assess spatial gradients of lake trace element contamination. *Aquatic Botany*, 2005, vol. 83, iss. 1, pp. 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.05.006>

Bornette G., Puijalon S. Response of aquatic plants to abiotic factors: A review. *Aquatic Sciences*, 2011, vol. 73, iss. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00027-010-0162-7>

Ceschin S., Bellini A., Scalici M. Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, iss. 5, pp. 4975–4988. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11496-3>

Haury J., Peltre M.-C., Trémolières M., Barbe J., Thiébaud G., Bernez I., Daniel H., Chate-net P., Haan-Archipof G., Muller S., Dutartre A., Laplace-Treytore C., Cazaubon A., Lambert-Servien E. A new method to assess water trophy and organic pollution – the Macrophyte Biological Index for Rivers (IBMR): Its application to different types of river and pollution. In: J. M. Caffrey, A. Dutartre, J. Haury, K. J. Murphy, P. M. Wade, eds. *Macrophytes in Aquatic Ecosystems: From Biology to Management*. Dordrecht, Springer, 2006, pp. 153–158. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5390-0_22

Jewell M. D., Moorsel S. J. van, Bell G. Geographical distribution of floating aquatic plants in relation to environmental conditions in southern Quebec, Canada. *Aquatic Botany*, 2023, vol. 187, article number 103657. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2023.103657>

Kownacki A. Taxocens of Chironomidae in streams of the Polish High Tatra Mts. *Acta Hydrobiologia*, 1971, vol. 13, no. 4, pp. 439–464.

Melzer A., Schneider S. Submerse Macrophytes als Indikatoren der Nährstoffbelastung. In: C. Steinberg, W. Calmano, H. Klapper, R.-D. Wilken, eds. *Handbuch Angewandte Limnologie*. Landsberg, Ecomed Verlagsgesellschaft, 2001, Bd. VIII, S. 1–13.

Menhinick E. F. A comparison of some species-individuals diversity indices applied to samples of field insects. *Ecology*, 1964, vol. 45, no. 4, pp. 859–861.

Scofield B. D., Fields S. F., Chess D. W. Aquatic macrophytes show distinct spatial trends in contaminant metal and nutrient concentrations in Coeur d'Alene Lake, USA. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, iss. 25, pp. 66610–66624. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27211-x>

Singh N. K., Raghubanshi A. S., Upadhyay A. K., Rai U. N. Arsenic and other heavy metal accumulation in plants and algae growing naturally in contaminated area of West Bengal, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, vol. 130, pp. 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.04.024>

Szozzkiewicz K., Zbierska J., Staniszewski R., Jusik S. The variability of macrophyte metrics used in river monitoring. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2009, vol. 38, iss. 4, pp. 117–126. <https://doi.org/10.2478/v10009-009-0049-x>

Szozzkiewicz K., Zbierska J., Jusik S., Zgoła T. *Makrofitowa Metoda Oceny Rzek – Podręcznik metodyczny do oceny i klasyfikacji stanu ekologicznego wód płynących w oparciu o rośliny wodne*. Poznań, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2010. 82 S.

Wiegand G., Gebler D., Van De Weyer K., Birk S. Comparative test of ecological assessment methods of lowland streams based on longterm monitoring data of macrophytes. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 541, pp. 1269–1281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.005>

Оригинальная статья

УДК 619:616.995.122

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-274-289>

ОПИСТОРХИДЫ В УРБОЭКΟΣИСТЕМЕ НОВОСИБИРСКА

О. М. Бонина^{1✉}, Е. А. Ефремова¹, Е. А. Удальцов²,
И. М. Зубарева³, М. С. Борцова³

¹ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН
Россия, 630501, Новосибирская обл., п.г.т. Краснообск, ул. Центральная, д. 26

² Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект Маркса, д. 20

³ Новосибирский государственный аграрный университет
Россия, 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160

Поступила в редакцию 06.06.2023 г., после доработки 30.06.2023 г., принята 11.07.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. Описторхоз в Новосибирске и Новосибирской области регистрируется ежегодно. Значительные различия в показателях эпидемического процесса в Новосибирске отмечены в сравнении с таковыми по РФ, где максимальный, минимальный среднегодовалый показатели заболеваемости в 6 – 10 раз ниже, чем в Новосибирске. В структуре заболеваемости описторхозом в Новосибирской области на долю городского населения приходится более 75% случаев. Уровень заболеваемости людей описторхозом в разных районах города варьирует от 85.0 на 100 тысяч населения до 170.3 в 2005 – 2015 гг., наблюдается увеличение темпов роста заболеваемости в большинстве административных районов и в целом по городу. Уровень зараженности домашних плотоядных описторхидами составляет 15%. Кошки инвазированы чаще, чем собаки – 18.1 и 10.7% соответственно. В двух районах города – Кировском и Советском уровень зараженности домашних плотоядных и показатели заболеваемости людей заметно превышают таковые по остальным районам. У рыб семейства Cyprinidae 6 видов (*Leuciscus idus*, *L. leuciscus*, *Rutilus rutilus*, *Abramis brama*, *Leucaspis delineatus*, *Carassius carassius*), отловленных в городских и пригородных водоемах, выявлено 3 вида описторхид: *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884), *Metorchis bilis* (Braun, 1890) и *M. xanthosomus* (Creplin, 1846). Первые два вида имеют эпидемическое значение, последний – эпизоотическое. Общая экстенсивность инвазии язей промысловых размеров личинками описторхид в реке Обь составила 71.8%, из них метацеркариями *O. felineus* – 69.1%. Общий уровень зараженности у туводных рыб в мелких реках: Нижняя Ельцовка 45.8%, Иня 55.3% и Тула 22.2%. Таким образом, в Новосибирске сложились благоприятные экологические условия для трансформации природного очага описторхоза в антропогенный.

Ключевые слова: описторхиды, описторхоз, урбоэкосистема, мегаполис, экстенсивность инвазии, заболеваемость, эпидемическая ситуация, Новосибирск

✉ Для корреспонденции. Лаборатория оптимизации противоэпизоотических систем Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН.

ORCID и e-mail адреса: Бонина Ольга Михайловна: <https://orcid.org/0000-0001-9480-1797>, olga-bonina@mail.ru; Ефремова Елена Александровна: <https://orcid.org/0000-0002-4062-3822>, alfa_parazit@maik.ru; Удальцов Евгений Анатольевич: <https://orcid.org/0000-0002-2005-6285>, ugodnic@gmail.com; Зубарева Ирина Михайловна: <https://orcid.org/0009-0008-4624-6248>, zim-mail@bk.ru; Борцова Марина Сергеевна: <https://orcid.org/0009-0001-7438-9122>, dorien@mail.ru.

Для цитирования. Бонина О. М., Ефремова Е. А., Удальцов Е. А., Зубарева И. М., Борцова М. С. Описторхиды в урбоэкосистеме Новосибирска // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 274 – 289. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-274-289>

ВВЕДЕНИЕ

Опасное гельминтозное заболевание человека – описторхоз, представляет собой паразитарную систему с комплексом разнообразных проблем. Одна из этих проблем – экологическая, обусловленная интенсивным биологическим загрязнением окружающей среды. Экологическая составляющая проблемы описторхоза связана, прежде всего, с эволюционно сложившейся природной очаговостью описторхоза и интенсивно идущими изменениями (трансформация природных очагов в очаги антропогенные или смешанные). Эти процессы протекают под влиянием разнообразных и многочисленных факторов антропопрессии: миграционные потоки населения, размывающие изоляционные барьеры между популяциями паразитов; гидротехническое строительство, нарушающее стабильность естественных экосистем; особую роль играет урбанизация и формирование мегаполисов, где экологические проблемы тесно переплетаются с социальными. По мнению С. А. Безра (2005), на современном этапе эволюции паразитарных систем мощные факторы антропопрессии ведут к серьезным изменениям в структуре очагов описторхозов, касающихся всех его сторон, в том числе эпидемиологического и эпизоотологического характера.

Различают 3 типа очагов паразитозов: природный, антропогенный и смешанный (Сидоров, 1983). В смешанных очагах роль диких животных, человека и синантропных, в том числе и домашних, животных в циркуляции описторхид в расхождении яиц, по-видимому, равноценна или близка к этому. Смешанный тип очага является результатом трансформации природных очагов, связанный с освоением человеком соответствующих территорий. Скорость этого процесса определяется скоростью и интенсивностью такого освоения. В условиях Новосибирской области очаги описторхоза относятся к смешанному типу, а в Новосибирске – антропогенному и имеют урбанистический характер (в силу высокой концентрации на ограниченной территории мегаполиса человек как биологический хозяин описторхид все более интенсивно вовлекается в функционирование паразитарной системы).

Описторхиды с учетом их биологических особенностей относятся к гидроксенным трематодам с выраженной полигостальностью и поликсенностью. Успешная реализация их жизненных циклов предполагает наличие определенных экологических условий, различных для разных хозяев в зависимости от их потребности в привязке к биотомам определенного типа, в пределах которых они становятся компонентами урбоэкосистем.

В Новосибирской области описторхоз является доминирующим гельминтозом в структуре заболеваемости населения биогельминтозами – на протяжении десятилетий его удельный вес превышает 90%. Однако по проблемам описторхоза в большинстве случаев работы посвящены вопросам распространения и видового разнообразия возбудителя и его хозяев, генетической идентификации вида *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884), отдельные исследования направлены на выяв-

ление локальных очагов описторхоза в бассейне Новосибирского водохранилища и, в меньшей мере, по Новосибирску (Ильинских и др., 2007; Маюрова, Кустикова, 2019; Симакова и др., 2019; Сербина, Козминский, 2020; Сербина, 2022; Polyakov et al., 2010; Domatskiy, Sivkova, 2022).

Город Новосибирск, выбранный нами в качестве модели урбозкосистемы, представляет собою крупнейший сибирский мегаполис, расположенный на территории самого большого в мире очага описторхоза, вызываемого трематодами сем. *Opisthorchidae* Lühe, 1911 – *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884) и *Metorchis bilis* (Braun, 1890).

Большая площадь города обуславливает многообразие экологических условий (ландшафтных, гидрологических и др.), дифференцированно подходящих для существования дефинитивных (человек и домашние плотоядные), первых промежуточных (моллюски-битинииды) и вторых промежуточных (рыбы сем. *Cyprinidae* – карповые) хозяев описторхид и в целом функционирования паразитарных систем описторхоза. Актуальность работы обусловлена наличием региональной проблемы в отношении описторхоза населения Новосибирской области, фрагментарностью работ в вопросах комплексной характеристики описторхид в урбозкосистеме Новосибирска.

Цель исследований – выявить структурно-функциональные особенности паразитарной системы описторхид в экосистеме мегаполиса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Эпидемическую ситуацию по описторхозу анализировали, используя данные Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Новосибирской области о заболеваемости описторхозом населения города Новосибирска по 10 районам и Новосибирской области, а также материалов Государственных докладов о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в РФ и Новосибирской области. Для оценки эпидемической ситуации по описторхозу использованы следующие показатели – показатель заболеваемости (ПЗ) на 100 тыс. населения, средний многолетний показатель заболеваемости (СМПЗ), которые рассчитывали, используя общепринятую в эпидемиологии методику, кроме того, рассчитали темпы роста (снижения) показателя заболеваемости (Сон и др., 2009).

Инвазированность кошек и собак описторхидами определяли в разные периоды с 1995 по 2021 гг. с использованием прижизненных и посмертных методов. Всего методом неполного гельминтологического вскрытия (НПГВ) (Скрябин, 1928) было исследовано 426 животных (248 кошек и 178 собак) Новосибирска и пригородных территорий. Прижизненную диагностику описторхоза у плотоядных выполнили исследованием проб фекалий копроовоскопическим методом Г. А. Котельникова и А. А. Вареничева (Котельников, 1983) с последующим расчетом показателя экстенсивности инвазии (ЭИ) – % зараженных животных. Всего исследовано 5594 пробы фекалий (кошек – 1621, собак – 3973 пробы).

При изучении ситуации по описторхозу второго промежуточного хозяина описторхид и выявлению водоемов, неблагополучных по заболеванию, материалами для исследования послужила рыба сем. *Cyprinidae* (карповые), отловленная в

р. Обь и ее притоках – реках Нижняя Ельцовка, Иня и Тула, протекающих в границах г. Новосибирска, а также в пригородном водоеме – Бердском заливе.

В черте г. Новосибирска в русловой части р. Обь выловлено 110 язей *Leuciscus idus* (Linnaeus, 1758) промысловых размеров, в ее притоках в р. Нижняя Ельцовка перед ее впадением в Обь, в р. Иня в районе Ключ-Камышенского плато и в р. Тула – 130 экз. рыбы сем. Cyprinidae (карповые) туводных непромыслового размера, в том числе язя *L. idus* (L.) 42 экз., плотвы *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758) – 50 экз., леща *Abramis brama* (Linnaeus, 1758) – 20 экз., ельца *Leuciscus leuciscus* (Linnaeus, 1758) – 15 экз. и верховки *Leucaspis delineatus* (Heckel, 1843) – 3 экз. Кроме того, отловлено и исследовано 495 карповых рыб из Бердского залива, расположенного в пригородной зоне (73 язя, 42 леща, 173 плотвы, 192 ельца, 7 верховок и 8 карасей *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758)). Метацеркарии описторхид выявляли в мышцах второго промежуточного хозяина общепринятым в паразитологии компрессорным методом (Котельников, 1983). Для анализа зараженности рыб метацеркариями трематод использовали такие показатели, как экстенсивность инвазии (ЭИ) и интенсивность инвазии (ИИ) – среднее число личинок паразита на 1 зараженную особь (Федоров, Ласкин, 1980). Систематическая принадлежность исследованных рыб определена по справочнику-определителю «Рыбы СССР» (Лебедев и др., 1969). Для идентификации трематод и их метацеркарий использовали «Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР» (1987).

Рассчитывали среднее арифметическое и стандартное отклонение ($M \pm SD$), диапазон изменений признаков ($min - max$), а также коэффициент ранговой корреляции Спирмена (корреляция заболеваемости людей и зараженности кошек и собак). Данные обрабатывали методами вариационной и непараметрической статистики с использованием ПО MS Excel 2013 (Microsoft Corp., USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эпидемическая ситуация по описторхозу. В Российской Федерации, Новосибирской области и г. Новосибирске описторхоз регистрируется в медицинских учреждениях ежегодно. Динамика эпидемического процесса в Новосибирске и области сходна и носит волнообразный характер (рис. 1). В Новосибирске ПЗ за период с 1990 по 2020 гг. варьировал от максимального значения 259.1 в 2000 г. до минимума 60.2 в 2020 г. и в среднем составил 131.0, что сопоставимо с аналогичным показателем по области (123.0 на 100 тыс. населения).

Динамика заболеваемости людей описторхозом в г. Новосибирске существенно не отличается от областной. В структуре заболеваемости в Новосибирской области на долю городского населения приходится более 75% случаев описторхоза.

Значительные различия в показателях эпидемического процесса в Новосибирске отмечены в сравнении с таковыми по РФ, где максимальный, минимальный ПЗ и СМПЗ в 6 – 10 раз ниже, чем в Новосибирске и области и составляют соответственно 32.3, 12.1 и 12.99 на 100 тыс. населения. В Российской Федерации отмечается более равномерное течение процесса описторхоза, характеризующееся снижением заболеваемости населения в настоящее время. Исходя из анализа тенденций развития эпидемической ситуации по описторхозу в Новосибирске за 1990 –

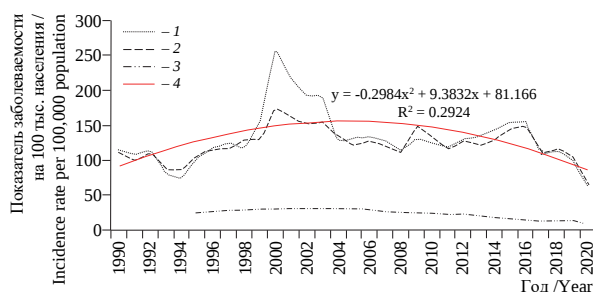


Рис. 1. Динамика заболеваемости населения описторхозом в г. Новосибирске (1), Новосибирской области (2) и Российской Федерации (3); 4 – полиномиальная линия тренда (г. Новосибирск)

Fig. 1. Opisthorchiasis incidence dynamics in the city of Novosibirsk (1), the Novosibirsk region (2) and the Russian Federation (3); 4 – polynomial trend line (Novosibirsk city)

2020 гг. можно утверждать о незначительном и недостоверном (коэффициент аппроксимации $R^2 = 0.3$) снижении уровня заболеваемости (см. рис. 1).

Результаты анализа данных о ситуации по описторхозу в отдельных районах г. Новосибирска за последние годы свидетельствуют об увеличении среднегодовых темпов роста ПЗ к 2015 г. в большинстве районов и лишь Кировский и Советский имеют небольшой, а Центральный – заметный

спад темпов роста показателя заболеваемости (табл. 1).

Таблица 1. Динамика заболеваемости описторхозом по районам г. Новосибирска за пятилетние временные периоды

Table 1. Opisthorchiasis incidence dynamics in the districts of the city of Novosibirsk for five-year time periods

Административный район / Administrative district	СМПЗ, на 100 тыс. населения / Average annual incidence rate, per 100 thousand population			Среднегодовые темпы роста (снижения), % / Average annual growth (decrease), %	
	2005 – 2015	2005 – 2009	2011 – 2015	2005 – 2009	2011 – 2015
Новосибирск / Novosibirsk	130.1	126.3	135.1	0.20	6.33 ↑
Дзержинский / Dzerzhinsky	104.8	106.6	108.0	-9.43	1.21 ↑
Железнодорожный / Zheleznodorozhnyy	85.0	81.1	94.8	3.07	9.16 ↑
Заельцовский / Zaeltsovsky	120.5	127.0	115.1	-3.42	1.52 ↑
Калининский / Kalininsky	100.8	84.1	124.7	-8.20	11.20 ↑
Кировский / Kirovsky	170.3	172.9	166.3	1.13	0.16 ↓
Ленинский / Leninsky	135.6	126.7	147.9	6.19	13.97 ↑
Октябрьский / Oktyabrsky	115.0	101.9	130.0	-2.97	10.49 ↑
Первомайский / Pervomaisky	85.5	78.9	97.1	-3.55	14.51 ↑
Советский / Sovetskiy	169.9	185.3	137.5	8.20	-0.91 ↓
Центральный / Tsentralnyy	165.1	143.2	193.4	11.41	9.42 ↓

Примечание. ↑ – темпы роста заболеваемости, ↓ – темпы снижения заболеваемости.

Note. ↑ – the incidence increase rate, ↓ – the incidence decline rate.

В целом по Новосибирску отмечается рост числа заболевших, разница темпов роста в начале исследований и в конце составляет более чем в 30 раз, что говорит о неблагоприятной эпидемической ситуации в городе. Следует подчеркнуть, что 3 района – Октябрьский, Калининский и Первомайский ярко выделяются в этом отношении, в них с 2005 по 2009 г. наблюдается выраженное снижение заболевае-

мости населения и затем к 2015 г. фиксируется подъем ПЗ и показатели темпа роста соответственно составляют 10.49, 11.2 и 14.5%. В Советском районе наблюдается противоположная ситуация: если в начале темпы роста составляли 8.2%, то к 2015 г. район отмечено постепенное снижение заболеваемости (-0.91%).

Первомайский район служит убедительным примером того, как местоположение, а также особенности современной застройки, когда возводятся не отдельные дома, а целые микрорайоны, могут косвенно неблагоприятно влиять на ситуацию по описторхозу. Данный муниципальный район расположен между двумя реками – Обь и ее притоком р. Иня. Территория характеризуется наличием водоемов дистрофного типа, мелководий и заводей с хорошо прогреваемой и аэрируемой прибрежной зоной. Сложившиеся условия весьма благоприятны для развития популяции пресноводных моллюсков, в том числе битинид, первого промежуточного хозяина описторхид. Этот район на начало исследований в период преобладания частого сектора – один из наиболее благополучных по уровню заболеваемости населения описторхозом. Однако по темпам роста заболеваемости населения в последние годы он находится на первом месте (см. табл. 1), что, по нашему мнению, связано с замещением частного сектора крупными густонаселенными жилыми массивами по береговой линии р. Иня – водоема, в котором рыба заражена личинками описторхид (Бонина, Трошкина, 2019).

Зараженность описторхидами домашних плотоядных. Обобщающие данные по инвазированности описторхидами кошек и собак города Новосибирска и пригородного Бердска, полученные постмортальными методами, свидетельствуют о том, что городские домашние животные достаточно часто (ЭИ составляет 15%) заражены описторхидами. Причем кошки инвазированы практически в 2 раза чаще, чем собаки – 18.1 и 10.7% соответственно (табл. 2).

Таблица 2. Уровень зараженности домашних плотоядных описторхидами в Новосибирске и Бердске (по результатам посмертных вскрытий)

Table 2. Opisthorchid infection rate of domestic carnivores in Novosibirsk and Berdsk (according to the results of post-mortem autopsies)

Вид хозяев / Host type	Исследовано, экз. / Investigated, spec.	Заражено, экз. / Infected, spec.	ЭИ, % / Extensiveness of infection, %
Кошки / Cats	248	45	18.1±2.4
Собаки / Dogs	178	19	10.7±2.3
Итого / Total	426	64	15.0±1.7

Результаты, полученные прижизненно с помощью копроовоскопического метода, пусть и не настолько точны и полны (по ним нельзя определить интенсивность заражения), но зато гораздо более многочисленны и получены по разным районам города, что служит нашим задачам по проведению территориального анализа состояния ситуации по описторхозу в условиях мегаполиса.

Инвазированность собак и кошек в Кировском и Советском районах в 2 и более раза выше среднегогородского уровня зараженности плотоядных и составляет соответственно 6.9 и 10.3; 27.7% (табл. 3). Данные показатели сопоставимы с высокими показателями зараженности населения этих же районов возбудителями

описторхозов. Более высокий уровень зараженности описторхидами собак (в 2 и более раза от среднегородского – 3.3%) отмечен в Кировском (ЭИ 6.9%) и Советском (6.9%) районах, кошек – в Советском (27.7%), Кировском (10.3%) и Калининском (10.2%) районах, практически в тех же районах города, что и у людей (см. табл. 3).

Таблица 3. Уровень зараженности домашних плотоядных описторхидами в Новосибирске и его пригородах (по результатам прижизненных исследований овоскопическим методом, 2004 – 2007 гг.)

Table 3. Opisthorchid infection rate of domestic carnivores in Novosibirsk and its suburbs (according to the results of intravital oviscopic studies, 2004–2007)

Административный район / Administrative district	Кошки / Cats		Собаки / Dogs	
	Количество проб / Number of samples	ЭИ, % / Extensiveness of infection, %	Количество проб / Number of samples	ЭИ, % / Extensiveness of infection, %
Ленинский / Leninsky	158	1.9±1.1	570	1.1±0.4
Кировский / Kirovsky	126	10.3±2.7	507	6.9±4.1
Центральный / Tsentralnyy	168	8.3±2.1	402	1.0±0.5
Калининский / Kalininsky	137	10.2±2.6	319	2.8±0.9
Советский / Sovetskiy	142	27.5±3.7	262	6.9±1.6
Железнодорожный / Zheleznodorozhnyy	93	4.3±2.1	204	2.0±1.0
Первомайский / Pervomaisky	107	8.4±2.7	282	3.2±1.0
Заельцовский / Zaeltsovsky	132	6.8±2.2	243	0.8±0.6
Дзержинский / Dzerzhinsky	89	6.7±2.7	345	2.3±0.8
Октябрьский / Oktyabrsky	90	4.4±2.2	430	3.5±0.9
Всего по районам города / Total by districts of the city	1242	9.4±0.8	3564	3.1±0.3
пос. Верх-Тула / township of Upper Tula	26	7.7±5.2	25	4.0±3.9
г. Обь / town of Ob	27	11.1±6.0	42	4.8±3.3
пос. Краснообск / township of Krasnoobsk	67	11.9±4.0	66	7.6±3.3
г. Бердск / city of Berdsk	49	8.2±3.9	32	–
пос. Огурцово / township of Ogurtsovo	39	17.9±6.1	52	9.6±4.1
пос. Тулинский / township of Tulinsky	29	3.4±3.4	22	–
с. Марусино / village of Marusino	19	–	50	–
пос. Мочище / township of Mochishche	52	9.6±4.1	43	4.7±3.2
пос. Пашино / township of Pashino	42	16.7±5.8	41	4.9±3.4
пос. Кольцово / township of Koltsovo	29	13.8±6.4	36	8.3±4.6
Всего в пригородной зоне / Total in suburban area	379	10.8±1.6	409	4.9±1.1
Итого / Total	1621	9.6±0.7	3973	3.3±0.28

Этот результат вполне объясним, так как и домашние плотоядные, и человек имеют одинаковый функциональный паразитарный статус, являясь дефинитивным хозяином в цикле развития трематоды *O. felineus*.

Выявлена положительная, недостаточно высокая корреляция заболеваемости людей и зараженности кошек ($r = 0.418$, $p < 0.005$) и, в меньшей степени, собак ($r = 0.225$, $p < 0.005$), что свидетельствует о возможности использования показателей инвазированности кошек в качестве векторных маркеров в оценке функциони-

рования паразитарной системы описторхид в эндемичных по заболеванию территорий.

В пригородной зоне наибольшая ЭИ отмечена у собак в пос. Огурцово (9.6%) и пос. Кольцово (8.3%), у кошек – в пос. Огурцово (17.9%), пос. Пашино (19.7%) и пос. Кольцово (13.8%). Следует отметить, что эти населенные пункты территориально либо находятся в черте города (Огурцово), либо близко примыкают к нему (Пашино, Кольцово) и расположены в достаточно обводненных зонах с обилием ручьев, малых рек и озер.

По результатам исследований, полученных методами посмертной и прижизненной диагностики, можно отметить, что степень инвазированности описторхидами кошек в 2 – 3 раза превышает зараженность собак.

Таким образом, в Новосибирске отмечается высокий уровень зараженности описторхидами дефинитивных хозяев – людей и домашних плотоядных. По территориально-административному распределению наиболее высокий уровень СМПЗ населения отмечен в Кировском (170.3), Советском (169.9), Центральном (165.1) и Ленинском (135.6) районах; зараженность кошек превышает среднюю по городу в Советском (27.5%), Кировском (10.3%) и Калининском (10.2%) районах, а собак – в Советском (6.9%), Кировском (6.9%), Октябрьском (3.5%) и Первомайском (3.2%) районах. Таким образом, люди и домашние плотоядные Кировского и Советского районов наиболее часто заражены описторхидами. Эти районы имеют удобное расположение для любителей-рыболовов – близ р. Обь, а также нескольких крупных притоков Оби, что позволяет без труда найти место для отлова пресноводной рыбы, в том числе семейства карповых, либо для дальнейшего употребления самостоятельно, либо на корм домашним кошкам или собакам.

Инвазированность рыб метацеркариями описторхид в водоемах Новосибирска. Новосибирск достаточно хорошо обеспечен водоемами. Город лежит на обоих берегах р. Обь. Кроме того, на территории Новосибирска протекают несколько малых рек (Иня, Ельцовка, Тула и др.). Южная часть Новосибирска лежит на берегах Новосибирского водохранилища; плотина Новосибирской ГЭС находится на территории Советского района города. Из пригородных водоемов можно отметить Бердский залив как часть Новосибирского водохранилища.

Лов рыбы промысловых размеров, употребляемой в пищу горожанами, осуществляется, главным образом, в водохранилище и в р. Обь. Любительский лов широко распространен и осуществляется во всех водоемах. Официальный (лицензионный) отлов наиболее часто – в черте города в р. Обь ниже плотины Новосибирской ГЭС. Неофициальный любительский лов – круглогодично во всех водоемах города. Рыбаки-любители ловят рыбу и для собственных нужд, и для продажи. Чаще всего они продают рыбу на стихийных рынках либо в свежем виде, либо в копченом или вяленом, реже – в соленом виде. И, конечно, немалая часть рыбы, особенно мелкоразмерной, идет на корм домашним животным – кошкам и собакам.

Знания об уровне зараженности рыб семейства карповых в очагах описторхоза – один из важнейших этапов контроля ситуации по этому заболеванию. Из 110 исследованных язей промысловых размеров, отловленных в русловой части р. Обь ниже плотины ОбьГЭС, 79 оказались зараженными метацеркариями описторхид

(общая ЭИ составила 71.8%) трех видов: *O. felineus*, *M. bilis* и *M. xanthosomus*. Первые два вида имеют эпидемическое значение, последний – эпизоотическое. Инвазированность язя метацеркариями *O. felineus* составляет 69.1%, что в 25 раз выше, чем личинками *M. bilis* (2.7%) и в 4 – *M. xanthosomus* (18.2%). Средняя ИИ метацеркарий *O. felineus* варьировала в разные годы от 26 до 265 экз. на 1 язя, *M. bilis* – от 8 до 149 экз. и *M. xanthosomus* – от 1 до 30 экз. на 1 рыбу (табл. 4).

Таблица 4. Зараженность карповых рыб личинками описторхид в водоемах Новосибирска
Table 4. Infection of cyprinids with opisthorchid larvae in the water bodies of Novosibirsk

Вид рыбы / Species of fish	Исследовано, экз. / Investigated, specimen	ЭИ, % / Extensiveness of infection, %	O. felineus		M. bilis		M. xanthosomus	
			ЭИ, % / Extensiveness of infection, %	ИИ, min – max / Invasion intensity, min–max	ЭИ, % / Extensiveness of infection, %	ИИ, min – max / Invasion intensity, min–max	ЭИ, % / Extensiveness of infection, %	ИИ, min – max / Invasion intensity, min–max
Река Обь / Ob River								
Язь / <i>Leuciscus idus</i> *	110	71.8±4.3	69.1±4.4	26–26.5	2.7±1.5	8–149	18.2±3.7	1–30
Река Нижняя Ельцовка / Nizhnyaya Eltsovka river								
Язь / <i>Leuciscus idus</i>	42	73.8±6.8	0	0	69.0±7.1	1–25	4.8±3.3	2
Елец / <i>Leuciscus leuciscus</i>	10	20.0±12.6	20.0±12.6	7	0	0	10.0±9.5	2
Плотва / <i>Rutilus rutilus</i>	8	12.5±11.7	0	0	0	0	12.5±11.7	3
Лещ / <i>Abramis brama</i>	20	5.0±4.9	5.0±4.9	1	5.0±4.9	1	0	0
Верховка / <i>Leucaspis delineatus</i>	3	100.0	0	0	100.0	2–28	0	0
Всего / Total	83	45.8±5.5	3.6±2.0	1–7	39.7±5.4	1–28	4.8±2.3	2–3
Река Иня / Inya river								
Плотва / <i>Rutilus rutilus</i>	38	55.3±8.1	55.3±8.1	1–33	0	0	2.6±2.58	2
Река Тула / Tula river								
Елец / <i>Leuciscus leuciscus</i>	5	40.0±21.9	40.0±21.9	3	0	0	0	0
Плотва / <i>Rutilus rutilus</i>	4	0	0	0	0	0	0	0
Всего / Total	9	22.2±13.9	22.2±13.9	3	0	0	0	0
Итого / Total	240	58.3±3.2	42.5±3.2	1–265	15.0±2.3	1–149	10.4±2.0	1–30

Примечание. * – рыба промысловых размеров.

Note. * – commercial size fish.

Инвазированность промысловой рыбы личинками описторхид обуславливает эпидемическую ситуацию в мегаполисе. Неоднозначная ситуация сложилась с язями в Оби в черте города. Язи традиционно и заслуженно считаются основным источником возбудителя описторхоза для человека на территории Обско-Иртышского очага описторхоза. Они способны совершать длительные нагульные и репродуктивные миграции. Мы считаем, что язи, отловленные весной, летом и в начале осени в промысловый сезон в районе нижнего бьефа Новосибирской ГЭС, не аборигенные, а приплывают сюда из нижележащих участков Оби из Томской

области и Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) для летнего нагула и, не имея возможности преодолеть плотину ГЭС, концентрируются у ее нижнего бьефа в черте города, где их в больших количествах вылавливают местные рыбаки. Учитывая, что Томская область и ХМАО являются гиперэндемичными по описторхозу субъектами РФ, с высоким уровнем заражения рыб метацеркариями описторхид, очевиден «вынос» инвазии с более зараженных территорий в менее зараженные – в Новосибирскую область. С большой долей вероятности можно предполагать, что жители города Новосибирска чаще заражаются метацеркариями описторхид не от местной рыбы, а от мигрирующей из более опасных по описторхозу территорий.

Выявление локальных очагов описторхоза предполагает наличие данных об уровне зараженности местных мелких туводных карповых рыб. У мелких промысловых рыб сем. Cyprinidae, отловленных в притоках Оби в реках Нижняя Ельцовка, Иня и Тула, обнаружены метацеркарии 3 видов трематод: *O. felineus*, *M. bilis* и *M. xanthosomus* (см. табл. 4). Общий уровень зараженности у туводных рыб в малых реках вполне сопоставим: 45.8% в Нижней Ельцовке, 55.3% в Ине, и почти в 2 раза меньше – 22.2% в р. Тула. Наиболее полно и подробно представлены данные по р. Нижняя Ельцовка, где обследовано 5 видов рыб. Они поражены всеми 3 видами описторхид: *O. felineus*, *M. bilis* и *M. xanthosomus*. Причем чаще всего встречались метацеркарии *M. bilis* – 39.7%, гораздо меньше *O. felineus* и *M. xanthosomus* (3.6 и 4.8% соответственно). Ранее нами в этом водоеме были исследованы моллюски-битинииды и выявлена их зараженность партенитами описторхид (Сербина, Бонина, 2011).

В р. Иня исследован только один вид рыб – плотва, она оказалась заражена 2 видами описторхид – *O. felineus* (ЭИ 55.3%) и *M. xanthosomus* (ЭИ 2.6%). В Ине также были отмечены битинииды (Сербина, Козминский, 2020). В р. Тула отловлены и обследованы 2 вида рыб – елец и плотва, зараженным оказался только елец метацеркариями *O. felineus* (ЭИ 40%). ИИ всеми видами описторхид невысока.

Исследованная рыба из пригородного Бердского залива оказалась заражена описторхидами в 33.7% случаев. По отдельным видам описторхид ЭИ представлена следующим образом: *O. felineus* – 31.1%, *M. bilis* – 3.4%, *M. xanthosomus* – 1.2% и *M. spp.* – 1.8%.

На рис. 2 представлены в схематичном виде объединенные результаты исследования рыб в разных точках Новосибирска и пригороде (Бердский залив).

Анализ видового разнообразия дополнительного хозяина описторхид и его зараженности в водоемах г. Новосибирска свидетельствует, что все виды исследованных рыб поражены личинками описторхид, однако уровень инвазирования их, в том числе метацеркариями разных видов описторхид, отличается (рис. 3). Наибольшее видовое разнообразие описторхид выявлено у язя.

Наибольший уровень заражения метацеркариями описторхид из исследованных видов рыб отмечен у язя (ЭИ промысловых составляет 71.8%, туводных – 73.8%). Плотва и елец также довольно часто (44.0 и 26.7% соответственно) инвазированы личинками опасных трематод. Лещ является слабо зараженным видом (см. рис. 3). На рисунке не обозначена зараженность верховок, поскольку исследо-

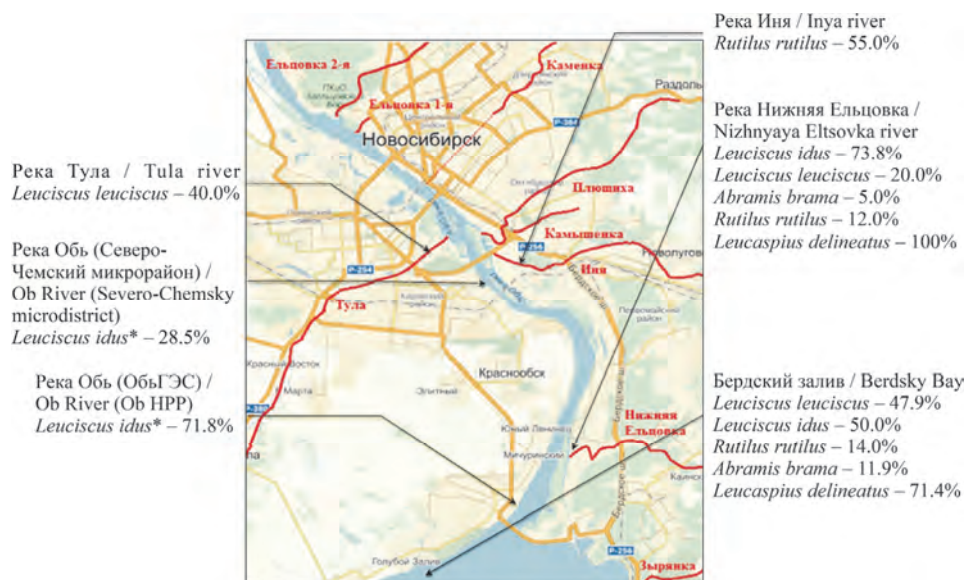


Рис. 2. Зараженность рыб метацеркариями описторхид в водоемах Новосибирска и его пригородах; * – рыба промысловых размеров

Fig. 2. Infection of fish with opisthorchid metacercariae in the water bodies of Novosibirsk and its suburbs; * – commercial size fish

вано всего 3 экз. и все оказались зараженными. Верховка мелкая рыба, в пищу человека вряд ли часто используется, поэтому значимого эпидемического значения не имеет.

По нашему мнению, утверждать о наличии локального очага на определенной территории можно при выявлении зараженных описторхидами всех трех видов

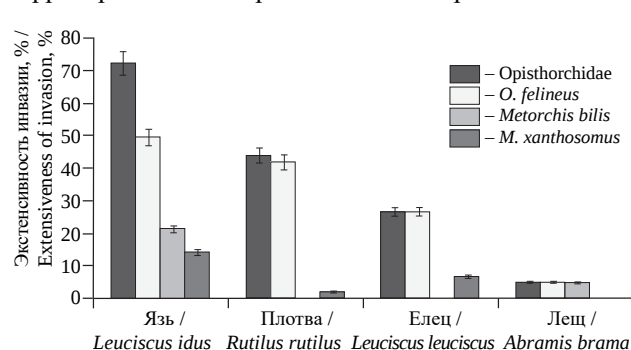


Рис. 3. Уровень зараженности рыб разных видов личинками описторхид в водоемах Новосибирска

Fig. 3. Infection level of fish of several species with opisthorchid larvae in the water bodies of Novosibirsk

хозяев: первого промежуточного, второго промежуточного и дефинитивного. Но даже присутствие последних двух категорий хозяев, зараженных описторхидами, говорит о высокой степени вероятности наличия локального очага. Таким образом, выявление высокого уровня зараженности рыб туводных форм сем. Cyprinidae метацеркариями *O. felineus*, *M. bilis* и *M. xanthosomus* в реках

Нижняя Ельцовка (Советский район), Иня (Первомайский район) и Тула (Кировский и Ленинский районы), протекающих в границах г. Новосибирска, позволяет сделать вывод о наличии локальных очагов описторхозов на территории мегаполиса. Очаги носят антропогенный характер, потому что дефинитивными хозяевами являются главным образом люди, а зараженные плотоядные – синантропы. И, кроме того, очаги, можно сказать, имеют урбанистическую локацию, так как расположены они не только в пригородных территориях, но и в черте города.

Высокий уровень зараженности аборигенного язя метацеркариями *M. bilis* (см. табл. 4), по нашему мнению, способствует заражению населения не только описторхами, но и меторхами. Это согласуется с данными об инвазированности пациентов 1-й инфекционной больницы Новосибирска, где под наблюдением находились 43 больных острым и хроническим описторхозом. У 20 больных (46.5%) реакция тонкослойного иммунного анализа (ТИА) была положительной только на антиген *O. felineus*, у трех больных (7%) – только на антиген *M. bilis*, у 20 (46.5%) – на оба антигена (Федоров и др., 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Новосибирске и его окрестностях сложились благоприятные экологические условия для трансформации природного очага описторхоза в антропогенный:

- высокая концентрация дефинитивных хозяев на компактной территории (люди и синантропные домашние плотоядные), обуславливающая значительный поток яиц описторхид в окружающую среду;

- наличие в черте города и проточных водоемов с большим количеством в них зараженной промысловой карповой рыбы, и малопроточных мелководных водоемов, представляющих благоприятные условия для проживания моллюсков-битинид – первых промежуточных хозяев описторхид и заражения туводных карповых рыб метацеркариями описторхид;

- плотина ГЭС и водохранилище в черте города, которые вносят коррективы в миграционный процесс промыслового язя, увеличивая его концентрацию в р. Обь в пределах города, что в конечном итоге приводит к увеличению уровня зараженности населения города описторхидами.

Таким образом, в условия мегаполиса наиболее полно реализуется биологический потенциал описторхид *O. felineus* и *M. bilis*, имеющих эпидемическое, и *M. xanthosomus* – эпизоотическое значение, способствуя сохранению напряженной паразитарной ситуации по описторхозам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безр С. А. Биология возбудителя описторхоза. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 336 с.

Бонина О. М., Трошкина Е. И. Инвазированность рыбы описторхидами в водоемах города Новосибирска // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2019. Вып. 20. С. 146 – 150. <https://doi.org/10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.146-150>

Ильинских Е. Н., Новицкий В. В., Ильинских Н. Н., Лепехин А. В. Инвазии *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884) и *Metorchis bilis* (Braun, 1890) у человека в различных регионах Обь-Иртышского речного бассейна // Паразитология. 2007. Т. 41, № 1. С. 55 – 64.

Котельников Г. А. Гельминтологические исследования животных и окружающей среды: справочник. М.: Колос, 1983. 208 с.

Лебедев В. Д., Спановская В. Д., Савваитова К. А., Соколов Л. И., Цепкин Е. А. Рыбы СССР. М.: Мысль, 1969. 447 с.

Маюрова А. С., Кустикова М. А. Особенности распространения первых промежуточных хозяев *Opisthorchis felineus* вблизи крупных городов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (Западная Сибирь) // Социально-экологические технологии. 2019. Т. 9, № 4. С. 481 – 501.

Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Т. 3. Паразитические многоклеточные / под ред. О. Н. Бауера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. 584 с.

Сербина Е. А. Численность моллюсков семейства Bithyniidae в водоемах и водотоках Новосибирской области (юг Западной Сибири) // Чтения памяти В. И. Жадиной: к 125-летию со дня рождения: тезисы докладов I Всероссийской научной конференции (с международным участием). СПб.: СПбФ ИИЕТ РАН, 2022. С. 70 – 71.

Сербина Е. А., Бонина О. М. Выявление очагов описторхоза в пойме реки Обь и в Новосибирском водохранилище. Сообщение 2. Численность переднежаберных моллюсков и их зараженность партенитами трематод // Российский паразитологический журнал. 2011. № 4. С. 55 – 59.

Сербина Е. А., Козминский Е. В. Двадцатипятилетняя динамика зараженности битинид (Gastropoda, Bithyniidae) описторхидами в пойме Оби (окрестности города Новосибирска) // Концептуальные и прикладные аспекты научных исследований и образования в области зоологии беспозвоночных: сборник статей V международной конференции. Томск: Издательство Томского государственного университета, 2020. С. 300 – 304. <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2018-2-6>

Сидоров Е. Г. Природная очаговость описторхоза. Алма-Ата: Наука, 1983. 238 с.

Симакова А. В., Бабкина И. Б., Ходкевич Н. Е., Бабкин А. М., Интересова Е. А. Зараженность трематодами *Opisthorchis felineus* Rivolta, 1884 чужеродных карповых рыб в бассейне Средней Оби // Российский журнал биологических инвазий. 2019. № 1. С. 90 – 94.

Скрябин К. И. Метод полных гельминтологических вскрытий позвоночных, включая человека. М.: Издательство 1 Московского государственного университета, 1928. 45 с.

Сон И. М., Скачкова Е. И., Леонов С. А., Сельцовский П. П., Рыбка Л. Н., Стерликов С. А., Гордина А. В., Кучерявая Д. А., Пономаренко Е. Н., Кочкарев Д. Е., Зайченко Н. М., Сазыкина И. Г. Оценка эпидемической ситуации по туберкулезу и анализ деятельности противотуберкулезных учреждений. М.: ЦНИИОИЗ, 2009. 56 с.

Федоров К. П., Ласкин Б. Ф. Автоматизированные методы обработки гельминтологических материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 75 с.

Федоров К. П., Наумов В. А., Кузнецова В. Г. О некоторых актуальных вопросах проблемы описторхозов человека и животных // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 2002. № 3. С. 7 – 9.

Domatskiy V. N., Sivkova E. I. Opisthorchiasis – is an urgent medical and social problem in Russia // Journal of Biochemical Technology. 2022. Vol. 13, iss. 4. P. 20 – 29. <https://doi.org/10.51847/Ixm5zetax6>

Polyakov A. V., Katokhin A. V., Bocharova T. A., Romanov K. V., L'vova M. N., Bonina O. M., Yurlova N. I., Mordvinov V. A. Comparative analysis of karyotypes of *Opisthorchis felineus* from West Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2010. Vol. 3, iss. 1. P. 1 – 3. <https://doi.org/10.1134/S1995425510010017>

Opisthorchids in the Novosibirsk urboecosystem

O. M. Bonina ^{1✉}, E. A. Efremova ¹, E. A. Udaltsov ², I. M. Zubareva ³, M. S. Bortsova ³¹ Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies, Russian Academy of Sciences
2b Central St., Krasnoobsk, Novosibirsk oblast 630501, Russia² Novosibirsk State Technical University

20 Marx Avenue, Novosibirsk 630073, Russia

³ Novosibirsk State Agrarian University

160 Dobrolyubova St., Novosibirsk 630039, Russia

Received: June 6, 2023 / revised: June 30, 2023 / accepted: July 11, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. Opisthorchiasis in Novosibirsk and the Novosibirsk region is registered annually. Significant differences in the indicators of the epidemic process in Novosibirsk were noted in comparison with those in the Russian Federation, where the maximum and minimum average long-term incidence rate is 6–10 times lower than in Novosibirsk. The urban population share accounts for more than 75% of cases in the structure of the incidence of opisthorchiasis in the Novosibirsk region. The incidence rate of people with opisthorchiasis in different districts of the city varies from 85.0 per 100 thousand people to 170.3 in 2005–2015, an increase in the incidence rate is observed in most administrative districts and in the whole city. The opisthorchids infection rate of domestic carnivores is 15%. Cats are infested more often than dogs – 18.1 and 10.7%, respectively. In two districts of the city, Kirovsky and Sovetsky ones, the level of infection of domestic carnivores and the incidence of people significantly exceed those in other areas. In 6 fish species of the Cyprinidae family (*Leuciscus idus*, *L. leuciscus*, *Rutilus rutilus*, *Abramis brama*, *Leucaspis delineatus*, *Carassius carassius*), caught in urban and suburban water bodies, 3 opisthorchid species were found, namely: *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884), *Metorchis bilis* (Braun, 1890), and *M. xanthosomus* (Creplin, 1846). The first two ones are of epidemic importance, while the last one is of epizootic significance. The total invasion prevalence of commercial fish by opisthorchid larvae in the Ob River was 71.8%, of which *O. felineus* metacercariae accounted for 69.1%. The overall infection level in small aboriginal fish in the small rivers Nizhnyaya Yeltsovka, Inya and Tula is 45.8, 55.3, and 22.2%, respectively. Thus, favorable environmental conditions have developed in Novosibirsk for transformation of the natural focus of opisthorchiasis into an anthropic one.

Keywords: opisthorchids, opisthorchiasis, urban ecosystem, megalopolis, invasion extensiveness, incidence, epidemic situation, Novosibirsk

For citation: Bonina O. M., Efremova E. A., Udaltsov E. A., Zubareva I. M., Bortsova M. S. Opisthorchids in the Novosibirsk urboecosystem. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 274–289 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-274-289>

✉ Corresponding author. Laboratory for Optimization of Anti-epizootic Systems, Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Olga M. Bonina: <https://orcid.org/0000-0001-9480-1797>, olga-bonina@mail.ru; Elena A. Efremova: <https://orcid.org/0000-0002-4062-3822>, alfa_parazit@maik.ru; Evgeny A. Udaltsov: <https://orcid.org/0000-0002-2005-6285>, ugodnic@gmail.com; Irina M. Zubareva: <https://orcid.org/0009-0008-4624-6248>, zim-mail@bk.ru; Marina S. Bortsova: <https://orcid.org/0009-0001-7438-9122>, dorien@mail.ru.

REFERENCES

- Beer S. A. *Biology of the Agent of Opisthorchiasis*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2005. 336 p. (in Russian).
- Bonina O. M., Troshkina E. I. Fish invasion by opisthorchid flukes in the waterpots of the city of Novosibirsk. *Theory and Practice of Combating Parasitic Diseases*, 2019, iss. 20, pp. 146–150 (in Russian). <https://doi.org/10.31016/978-5-9902340-8-6.2019.20.146-150>
- Ilyinskikh E. N., Novitsky V. V., Ilyinskikh N. N., Lepyokhin A. V. *Opisthorchis felineus* (Rivolta, 1884) и *Metorchis bilis* (Braun, 1890) infections in population of some regions of the Ob river basin. *Parazitologiya*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 55–64 (in Russian).
- Kotelnikov G. A. *Gel'mintologicheskie issledovaniia zhivotnykh i okruzhaiushchei sredy: spravochnik* [Helminthological Studies of Animals and the Environment: Reference book]. Moscow, Kolos, 1983. 208 p. (in Russian).
- Lebedev V. D., Spanovskaya V. D., Savvaitova K. A., Sokolov L. I., Tsepkov E. A. *Ryby SSSR* [Fishes of the USSR]. Moscow, Mysl, 1969. 447 p. (in Russian).
- Maiurova A. S., Kustikova M. A. Features of the first intermediary host distribution of *Opisthorchis felineus* near the major cities of KhMAO–Ugra (Western Siberia). *Environment and Human: Ecological Studies*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 481–501 (in Russian).
- Opredelitel' parazitov presnovodnykh ryb fauny SSSR. T. 3. Paraziticheskie mnogokletochnye. Pod red. O. N. Bauera* [Bauer O. N., ed. Determinator of Parasites of Freshwater Fishes of the Fauna of the USSR. Vol. 3. Parasitic Multicellular Parasites]. Leningrad, Nauka, 1987. 584 p. (in Russian).
- Serbina E. A. The number of mollusks of the family Bithyniidae in water bodies and watercourses of the Novosibirsk region (south of Western Siberia). *Chtenia pamiati V. I. Zhadina: k 125-letiiu so dnia rozhdeniia: teziy dokladov I Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Readings in Memory of V. I. Zhadin: To the 125th Anniversary of his Birth: Abstracts of the I All-Russian Scientific Conference (With International Participation)]. Saint Petersburg, St. Petersburg Branch of the S. I. Vavilov Institute of the History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences Publ., 2022, pp. 70–71 (in Russian).
- Serbina E. A., Bonina O. M. Revealing of the local centers of opisthorchidosis in flood-lands of river Ob and in Novosibirsk man-made lake. The message 2. Prosobranchia molluscs' number and its infection by paratenites of trematoda. *Russian Journal of Parasitology*, 2011, no. 4, pp. 55–59 (in Russian).
- Serbina E. A., Kozminsky E. V. Twenty-five years dynamics of bithyniid (Gastropoda, Bithyniidae) infection by opisthorchids in the Ob river (of South West Siberia). *Conceptual and Applied Aspects of Scientific Research and Education in the Field of Invertebrate Zoology: Collection of Articles V International Conference*. Tomsk, Tomsk State University Press, 2020, pp. 300–304 (in Russian). <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2018-2-6>
- Sidorov E. G. *Prirodnaia ochagovost' opistorkhoza* [Natural Focalization of Opisthorchiasis]. Alma-Ata, Nauka, 1983. 238 p. (in Russian).
- Simakova A. V., Babkina I. B., Khodkevich N. E., Babkin A. M., Interesova E. A. The infection of the trematodes *Opisthorchis felineus* Rivolta, 1884 in alien species of fish family Cyprinidae in the Middle Ob River basin. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2019, no. 1, pp. 90 – 94 (in Russian).
- Skryabin K. I. *Metod polnykh gel'mintologicheskikh vskrytii pozvonochnykh, vkluchaia cheloveka* [Method of Complete Helminthologic Autopsies of Vertebrates, Including Humans]. Moscow, 1 Moscow State University Publ., 1928. 45 p. (in Russian).
- Son I. M., Skachkova E. I., Leonov S. A., Seltsovsky P. P., Rybka L. N., Sterlikov S. A., Gordina A. V., Kucheryavaya D. A., Ponomarenko E. N., Kochkarev D. E., Zaichenko N. M., Sazykina I. G. *Otsenka epidemicheskoi situatsii po tuberkulezu i analiz deiatel'nosti protivotu-*

berkuleznykh uchrezhdenii [Assessment of the Epidemic Situation of Tuberculosis and Analysis of the Activities of Tuberculosis Facilities]. Moscow, Central Research Institute Organization and Informatization of Health Care Publ., 2009. 56 p. (in Russian).

Fedorov K. P., Laskin B. F. *Avtomatizirovannye metody obrabotki gel'mintologicheskikh materialov* [Automated Methods of Processing Helminthological Materials]. Novosibirsk, Nauka, 1980. 75 p. (in Russian).

Fedorov K. P., Naumov V. A., Kuznetsova V. G. On some topical issues of the problem of opisthorchiasis in humans and animals. *Medical Parasitology and Parasitic Diseases*, 2002, no. 3, pp. 7–9 (in Russian).

Domatskiy V. N., Sivkova E. I. Opisthorchiasis – is an urgent medical and social problem in Russia. *Journal of Biochemical Technology*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 20–29. <https://doi.org/10.51847/IXm5zetax6>

Polyakov A. V., Katokhin A. V., Bocharova T. A., Romanov K. V., L'vova M. N., Bonina O. M., Yurlova N. I., Mordvinov V. A. Comparative analysis of karyotypes of *Opisthorchis felinus* from West Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2010, vol. 3, iss. 1, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1134/S1995425510010017>

Оригинальная статья

УДК 598.241.2:591.5

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-290-300>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СЕРОГО ЖУРАВЛЯ (*GRUS GRUS*) И КРАСАВКИ (*ANTHROPOIDES VIRGO*) (GRUIDAE, AVES) В ПРЕДМИГРАЦИОННЫЙ ПЕРИОД

К. Д. Кондракова

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

Поступила в редакцию 19.05.2023 г., после доработки 22.06.2023 г., принята 24.06.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. Изучение поведения животных важно для понимания эволюции и экологии видов, а также для разработки стратегий и мер по сохранению редких видов. Исследование бюджета времени близкородственных видов позволяет выявить видоспецифические модели поведения. Проведен сравнительный анализ бюджета времени серого журавля (*Grus grus*) и красавки (*Anthropoides virgo*) на предмиграционных местах скопления, которые в этот период, как правило, кормятся на сельскохозяйственных полях. Выявлены видовые различия в стратегии кормодобывания. Красавки собирают корм, перемещаясь по полю, в то время как серые журавли кормятся, стоя на месте. Таким образом, серые журавли, традиционно использующие для кормежки поля, добывают корм менее энергозатратно, в сравнении с красавками, степным видом, который начал использовать агроландшафты после освоения целины с середины прошлого века. Серые журавли тратят на уход за оперением больше времени, чем красавки, а птенцы обоих видов тратят на эту активность меньше времени, чем взрослые особи. В целом птенцы меньше тратили времени на бдительность, чем взрослые особи. Однако статистически значимых различий не обнаружено. Оба вида тратили на отдых и другие активности наименьшее время.

Ключевые слова: бюджет времени, красавка, серый журавль, стратегия кормодобывания, суточная активность

Для цитирования. Кондракова К. Д. Сравнительный анализ поведения серого журавля (*Grus grus*) и красавки (*Anthropoides virgo*) (Gruidae, Aves) в предмиграционный период // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 290 – 300. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-290-300>

✉ Для корреспонденции. Лаборатория сохранения биоразнообразия и использования биоресурсов Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН.

ORCID и e-mail адрес: Кондракова Кристина Дмитриевна: <https://orcid.org/0000-0002-1569-0708>, kondrakova92@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Сравнительный анализ поведения близкородственных видов в схожих биотопах позволяет выявить поведенческие модели, характерные для каждого вида (Krebs, Davies, 2009). Бюджет времени используют для изучения поведенческих аспектов животных (Alonso et al., 1984, 2004; Yang et al., 2006; Wan et al., 2016).

Места обитания, рацион питания и поведение большинства видов журавлей различаются в гнездовой и внегнездовой периоды (Johnsgard, 1983). Бюджет времени разных видов журавлей изучали, главным образом, на местах зимовок (Alonso, Alonso, 1993; Aviles, 2003; Li Z. et al., 2013; Li C. et al., 2015), в то время как предмиграционному периоду уделено недостаточно внимания, хотя он является важным этапом годового цикла, от которого зависит успех миграции (Lindström, Piersma 1993; Schaub et al., 2008; Wellicome et al., 2014). Немногочисленные исследования, проведенные в этот период, не содержат сравнительного анализа между видами (Кондракова, 2021; Zhang et al., 2020).

В данной работе приведено сравнение поведения в предмиграционный период двух видов с разной экологией гнездования – серого журавля (*Grus grus* Linnaeus, 1758) и красавки (*Anthropoides virgo* Linnaeus, 1778). В европейской части России серый журавль в основном гнездится в заболоченных лесных массивах (Маркин, 2013), в то время как красавка предпочитает открытые пространства – степь и полупустыни, а в последние десятилетия, в связи с трансформацией естественных местообитаний, и агроландшафты (Ильяшенко, 2019). В предмиграционный период оба вида ведут сходный образ жизни, образуя скопления и используя для кормежки сельскохозяйственные поля (Маркин, 2013; Johnsgard, 1983).

Цель исследования – выявить различия в поведении двух видов журавлей, использующих для кормежки сельскохозяйственные поля на традиционных местах скопления в предмиграционный период.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Наблюдения за серыми журавлями проводили в Рязанской области (54.6949° с.ш., 40.8659° в.д.) с 15 августа по 5 октября в 2020 и 2021 гг. (18 дней) и за красавками в долине Маныча (46.5010° с.ш., 43.3214° в.д.) с 6 по 15 августа 2021 г. (8 дней) на местах кормежки на убранных зерновых полях.

Бюджет времени определяли в светлое время суток. В каждой стае выбирали особь, за которой наблюдали в среднем около 10 мин в зрительную трубу SV28 20-60×80 (SVBONY, Китай) и регистрировали каждый тип активности на диктофон (андроид приложение для смартфона Росо F1) с точностью до секунды. Время, затраченное на каждую активность, переводили в долю от общего времени наблюдения.

Бюджет времени определяли для взрослых и неполовозрелых особей, которые в природе визуально практически не отличимы, и для птенцов (Johnsgard, 1983). Всего в анализ включены данные о 46 взрослых (413.2 мин) и 40 птенцах (396.3 мин) серых журавлей и 29 взрослых (307.1 мин) и 11 птенцах (114.4 мин) красавок.

Выделили следующие типы активностей: «кормежка без перемещения», «кормежка при ходьбе», «уход за оперением», «бдительность», «отдых» и «другие

активности». Во время «кормежки при ходьбе» журавли перемещались и собирали корм с земли или растительности, или ловили летающих насекомых. «Кормежки без перемещения» – действие, когда журавли собирали корм или ковыряли почву, стоя на месте. «Уход за оперением» включал очесывание перьев, обтирание головы о туловище, почесывание ногой головы и шеи, чистка клюва ногой. «Бдительность» определяли как продолжительное положение с вытянутой вверх шеей и поднятой головой или кратковременные оглядывания во время других активностей. «Отдых» включал сидение на цевках, лежание, спокойную позу птицы, стоящей на одной или двух ногах. Ходьба без кормежки, танцы, бег, короткие перелеты в пределах поля, потягивание, взаимодействия с другими особями включили в категорию «другие активности».

Построена обобщенная линейная модель (GLM) с отрицательным биномиальным распределением (family=negative.binomial) с помощью пакета lme4 (Bates et al., 2016) в программе R версии 3.6.3 (R Core Team, 2020). В качестве зависимой переменной выбрана доля времени, затраченная на определенную активность, независимые переменные – комбинация активности, возраста и вида особи. Проверку качества модели проводили с помощью функции dredge пакета “MuMIn” (Barton, 2016) по скорректированному критерию Акаике с поправкой на малые выборки (AICc) (Anderson et al., 1994), лучшими моделями считали те, в которых дельта Акаике (ΔAIC_c) меньше или равна двум. Для выявления возрастных и видовых различий каждой активности использовали Тьюки Пост-хок тест (PHT), построенный на основе исходной модели, с помощью пакета lsmeans в программе R (Lenth, Lenth, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кормежка. В результате анализа получены три лучшие модели ($\Delta AIC_c \leq 2$), которые содержали все три выбранные нами фактора. Сумма их веса составила 0.9 (табл. 1).

Таблица 1. Результаты оценки лучших моделей

Table 1. Results of the best models estimate

Номер модели / Model number	Интерсепт / Intercept	Тип активности / Activity type	Возраст / Age	Вид (красавка, серый журавль) / Species (Demoiselle crane, Common crane)	AIC _c	ΔAIC_c	Вес / Weight
2	-1.4	+	–	–	667.5	0.0	0.5
4	-1.4	+	+	–	669.5	2.0	0.2
6	-1.4	+	–	+	660.5	2.0	0.2

Доля времени, которую красавки тратили на «кормежку при ходьбе», была наибольшей, но незначительно отличалась от времени, которое они тратили на «кормежку без перемещения» (взрослые: PHT = 0.20, $p = 0.99$; птенцы: PHT = 0.18, $p = 0.99$) (табл. 2). Серые журавли тратили больше времени на «кормежку без пе-

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СЕРОГО ЖУРАВЛЯ

ремещения», чем на «кормежку при ходьбе» (взрослые: $RHT = -0.82, p < 0.05$; птенцы: $RHT = -0.85, p < 0.05$) (см. табл. 2).

Таблица 2. Средние значения (медиана $\pm 25 - 75\%$) доли времени, затрачиваемой на разные активности красавками и серыми журавлями разного возраста

Table 2. Mean values (median $\pm 25-75\%$) of the proportion of time spent on various activities by Demoiselle and Common cranes of different ages

Тип активности / Activity type	Красавка / Demoiselle crane		Серый журавль / Common crane	
	Взрослые / Adult	Птенцы / Juvenile	Взрослые / Adult	Птенцы / Juvenile
Кормежка без перемещения / Feeding without moving	0.24 $\pm$ 0.12–0.37	0.27 $\pm$ 0.17–0.38	0.35 $\pm$ 0–0.65	0.53 $\pm$ 0.24–0.77
Кормежка при ходьбе / Feeding with moving	0.30 $\pm$ 0.13–0.54	0.40 $\pm$ 0.21–0.50	0.07 $\pm$ 0–0.25	0.12 $\pm$ 0.05–0.36
Уход за оперением / Preening	0.03 $\pm$ 0–0.11	0.01 $\pm$ 0.01–0.04	0.07 $\pm$ 0.02–0.43	0.03 $\pm$ 0.01–0.13
Бдительность / Vigilance	0.19 $\pm$ 0.13–0.30	0.16 $\pm$ 0.14–0.23	0.11 $\pm$ 0.06–0.28	0.07 $\pm$ 0.04–0.13
Отдых / Rest	0 $\pm$ 0–0.01	0 $\pm$ 0–0.02	0 $\pm$ 0–0	0 $\pm$ 0–0.01
Другие активности / Other activities	0 $\pm$ 0–0.01	0.03 $\pm$ 0.01–0.03	0.02 $\pm$ 0–0.04	0.01 $\pm$ 0–0.03

Доля времени, затрачиваемая на «кормежку при ходьбе», птенцами красавки больше, чем взрослыми ($RHT = -0.92, p < 0.05$) и птенцами ($RHT = -0.68, p < 0.05$) серых журавлей (рис. 1). Взрослые красавки тратили на эту активность больше времени, чем взрослые серые журавли ($RHT = -0.68, p < 0.05$) (см. рис. 1).

Доля времени, которую взрослые красавки тратили на «кормежку без перемещения», меньше, чем доля времени, которую птенцы серых журавлей затрачивали на эту активность ($RHT = -0.62, p < 0.05$) (рис. 2).

Уход за оперением. Доля времени, затрачиваемая на «уход за оперением» взрослыми красавками, больше, чем их птенцами ($RHT = 0.77, p < 0.05$). Птенцы красавок тратят на эту активность меньше времени, чем птенцы серых журавлей ($RHT = 0.65, p < 0.05$) (рис. 3). Взрослые красавки ($RHT = 0.65, p < 0.05$), их птенцы ($RHT = 1.42, p < 0.05$) и птенцы серых журавлей ($RHT = 0.77, p < 0.05$) тратят меньше времени на «уход за оперением», чем взрослые серые журавли (см. рис. 3).

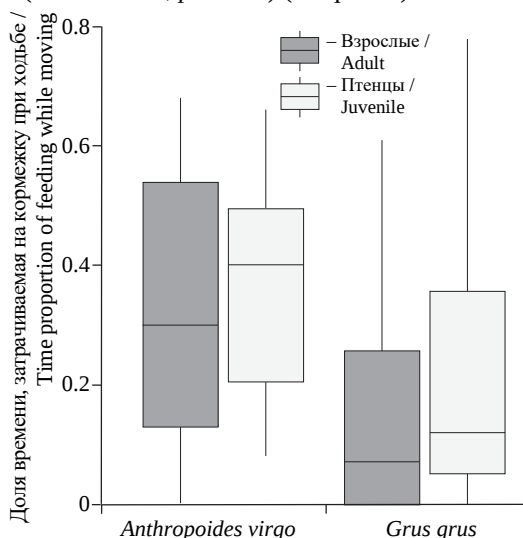


Рис. 1. Доля времени, затрачиваемая красавками и серыми журавлями на «кормежку при ходьбе»

Fig. 1. Proportion of time spent by Demoiselle and Common cranes on “feeding with moving”

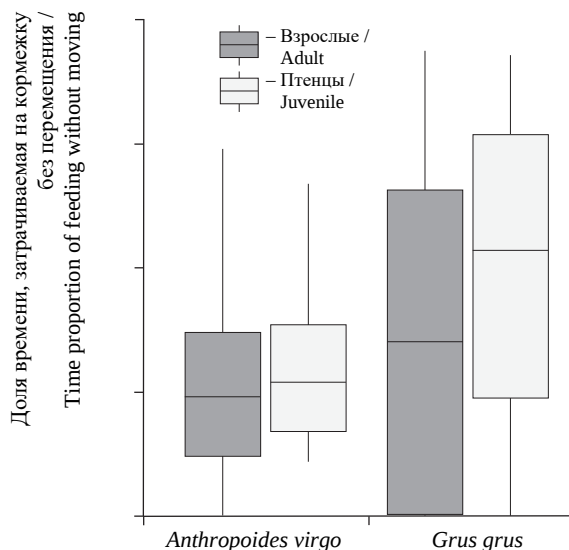


Рис. 2. Доля времени, затрачиваемая красавками и серыми журавлями на «кормежку без перемещения»

Fig. 2. Proportion of time spent by Demoiselle and Common cranes on “feeding without moving”

Бдительность. Доля времени, затрачиваемая красавками на «бдительность», больше, чем серыми журавлями (см. табл. 2), однако статистически значимых различий не обнаружено. Среднее значение доли времени, затрачиваемой на «бдительность» птенцами обоих видов, меньше, чем взрослыми (см. табл. 2), хотя статистически не подтверждено.

«Отдых» и «другие активности». Оба вида журавлей тратили на «отдых» и «другие активности» наименьшее время (см. табл. 2). Однако птенцы тратили на эти активности незначительно больше времени, чем взрослые (см. табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты сравнительного анализа показали, что в предмиграционный период наибольшие видовые и возрастные различия у серых журавлей и красавок существуют во времени, затрачиваемом на обе кормовые активности в сходных местообитаниях. Взрослые серые журавли тратили меньше времени на «кормежку при ходьбе», чем взрослые и птенцы красавки. Кроме этого, доля времени, затрачиваемая на эту активность птенцами серых журавлей, меньше, чем птенцами красавок. Таким образом, серые журавли в основном собирают зерно, стоя на месте, и мало перемещаются по полю во время кормежки, тогда как красавки кормятся во время ходьбы. Вероятно, такие различия связаны с тем, что красавка изначально обитатель степных и полупустынных биотопов (Ильяшенко, 2019; Johnsgard, 1983), где они предпочитают добывать преимущественно насекомых, в том числе летающих, во время ходьбы. Кроме этого, доля времени, затрачиваемая на активность «кормежка при ходьбе» птенцами серых журавлей, сходна с взрослыми красавками. Это может быть связано с тем, что птенцы серых журавлей в этот период начинают использовать незнакомые им местообитания и корм, отличающиеся от таковых в местах их рождения (Маркин, 2013; Johnsgard, 1983), в то время как красавки с самого рождения обитают в открытых пространствах (Johnsgard, 1983).

Выявлены видовые и возрастные различия в доле времени, затрачиваемой на «уход за оперением». Птенцы обоих видов тратили на эту активность меньше вре-

мени, чем взрослые. Сходные результаты получены на местах зимовки серых журавлей в Испании (Alonso, Alonso, 1993). Наибольшая доля времени, затрачиваемая на «уход за оперением», выявлена у взрослых серых журавлей, наименьшая – у птенцов красавок. Птенцы серых журавлей больше времени тратят на «уход за оперением», чем птенцы красавок. Обилие пуха и пуховых перьев у взрослых красавок почти в два раза меньше, чем у взрослых серых журавлей (личное сообщение В. Ю. Ильяшенко), что указывает на то, что серым журавлям нужно больше времени на уход за оперением.

Не обнаружены видовые различия во времени, затрачиваемом на «бдительность», «отдых» и «другие активности». Однако доля времени, затрачиваемая на «бдительность» птенцами, была статистически незначимо меньше, чем у взрослых, что связано с недостаточно большой выборкой. В предыдущих работах достоверные возрастные различия во времени, затраченном на эту активность, обнаружены у разных видов журавлей на зимовках (Tacha, 1988; Aviles, 2003; Wang et al., 2009), а у серого журавля и на предмиграционных скоплениях (Кондракова, 2021).

Не выявлены статистически значимые различия доли времени, затрачиваемой на «отдых» и «другие активности», как и в исследовании на местах зимовок (Li et al., 2015).

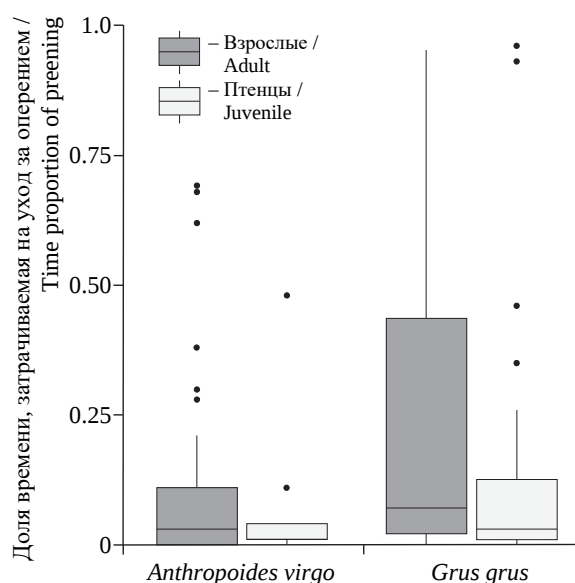


Рис. 3. Доля времени, затрачиваемая красавками и серыми журавлями на «уход за оперением»

Fig. 3. Proportion of time spent by Demoiselle and Common cranes on “preening”

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серый журавль, традиционно использующий для кормежки сельскохозяйственные поля, более эффективно и менее энергозатратно добывает корм на таких территориях, чем степной вид красавка, который начал использовать агроландшафты бывшей целины только с середины прошлого века (Ильяшенко, 2019).

Птенцам серых журавлей, живущим первые месяцы жизни в лесах с болотистой местностью, требуется время, чтобы развить поведенческие навыки, необходимые для эффективного использования сельскохозяйственных полей в предмиграционный период.

Выражаю благодарность сотрудникам Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН В. Ю. Ильяшенко и Е. И. Ильяшенко за помощь в выполнении полевых работ и редактировании рукописи. Благодарна доценту кафедры зоологии и экологии Московского педагогического государственного университета А. В. Шарикову за помощь в статистической обработке данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ильяшенко Е. И. Влияние изменений в агроландшафтах на распределение и численность красавки (*Anthropoides virgo* Linnaeus, 1758) (Gruidae, Aves) в гнездовой части ареала с середины XX века // Поволжский экологический журнал. 2019. № 2. С. 222 – 236. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-2-222-236>

Кондракова К. Д. Материалы по бюджету времени серых журавлей в летне-осенний период, Рязанская область, Россия // Журавли Евразии (распространение, биология). 2021. № 6. С. 439 – 454.

Маркин Ю. М. Серый журавль в европейской части России. Рязань: Голос губернии, 2013. 118 с.

Anderson D. R., Burnham K. P., White G. C. AIC model selection in overdispersed capture-recapture data // Ecology. 1994. Vol. 75, iss. 6. P. 1780 – 1793.

Alonso J. A., Alonso J. C. Age-related differences in time budgets and parental care in wintering common cranes // The Auk. 1993. Vol. 110, iss. 1. P. 78 – 88.

Alonso J. C., Veiga J. P., Alonso J. A. Familienauflösung und Abzug aus dem Winterquartier beim Kranich *Grus grus* // Journal für Ornithologie. 1984. Bd. 125, № 1. S. 69 – 74.

Alonso J. C., Bautista L. M., Alonso J. A. Family-based territoriality vs flocking in wintering common cranes *Grus grus* // Journal of Avian Biology. 2004. Vol. 35, iss. 5. P. 434 – 444. <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2004.03290.x>

Avilés J. M. Time budget and habitat use of the Common crane wintering in dehesas of southwestern Spain // Canadian Journal of Zoology. 2003. Vol. 81, iss. 7. P. 1233 – 1238. <https://doi.org/10.1139/z03-105>

Barton K. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.15.6 // The Comprehensive R Archive Network. 2016. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn> (accessed May 10, 2023).

Bates D., Maechler M., Bolker B., Walker S., Haubo Bojesen Christensen R., Singmann H., Dai B., Grothendieck G., Green P. lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1–12edn // The Comprehensive R Archive Network. 2016. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/index.html> (accessed May 10, 2023).

Johnsgard P. A. Cranes of the World. Bloomington: Indiana University Press, 1983. 278 p.

Krebs J. R., Davies N. B. The Evolution of Behavioural Ecology // Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach. Boston: Blackwell Scientific Publications, 2009. P. 3 – 12.

Lenth R., Lenth M. R. Package “lsmeans” // The American Statistician. 2018. Vol. 34, iss. 4. P. 216 – 221.

Lindström A., Piersma T. Mass changes in migrating birds: The evidence for fat and protein storage re-examined // Ibis. 1993. Vol. 135, iss. 1. P. 70 – 78.

Li Z., Wang Z., Ge C. Time budgets of wintering Red-Crowned cranes: Effects of habitat, age and family size // Wetlands. 2013. Vol. 33, iss. 2. P. 227 – 232. <https://doi.org/10.1007/s13157-012-0371-z>

Li C., Zhou L., Xu L., Zhao N., Beauchamp G. Vigilance and activity time-budget adjustments of wintering hooded cranes, *Grus monacha*, in human-dominated foraging habitats // PLoS One. 2015. Vol. 10, iss. 3. Article number e0118928.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СЕРОГО ЖУРАВЛЯ

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing // The Comprehensive R Archive Network. 2020. Available at: <http://www.cran.r-project.org/> (accessed May 10, 2023).

Schaub M., Jenni L., Bairlein F. Fuel stores, fuel accumulation, and the decision to depart from a migration stopover site // Behavioral Ecology. 2008. Vol. 19, iss. 3. P. 657 – 666. <https://doi.org/10.1093/beheco/arn023>

Tacha T. C. Social organization of sandhill cranes from midcontinental North America // Wildlife Monographs. 1988. № 99. P. 3 – 37. <https://www.jstor.org/stable/3830635>

Wang K., Yang X., Zhao J., Yu H., Min L. Relations of daily activity patterns to age and flock of wintering Black-necked crane (*Grus nigricollis*) at Napa Lake, Shangri-La in Yunnan // Zoological Research. 2009. Vol. 30, iss. 1. P. 74 – 82. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1141.2009.01074>

Wan W., Zhou L., Song Y. Shifts in foraging behavior of wintering Hooded cranes (*Grus monacha*) in three different habitats at Shengjin Lake, China // Avian Research. 2016. Vol. 7, iss. 1. Article number 13. <https://doi.org/10.1186/s40657-016-0047-0>

Wellcome T. I., Fisher R. J., Poulin R. G., Todd L. D., Bayne E. M., Flockhart D. T., Schmutz J. K., Smet K. D., James P. C. Apparent survival of adult Burrowing Owls that breed in Canada is influenced by weather during migration and on their wintering grounds // The Condor. 2014. Vol. 116, iss. 3. P. 446 – 458. <https://doi.org/10.1650/CONDOR-13-161.1>

Yang Y. A. N. G., Wen-Hua C. H. E. N., Wang-Gao J. I. A. N. G., Shi-Jian Y. A. N. G. Effects of group size on vigilance behavior of wintering common cranes *Grus grus* // Zoological Research. 2006. Vol. 27, iss. 4. P. 357 – 362.

Zhang T., Xu F., Ma M., Ding P. Autumn time budget and diurnal rhythm of Black-necked crane // Pakistan Journal of Zoology. 2020. Vol. 52, iss. 6. P. 2405 – 2408. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/20180201160218>

Comparative analysis of the behavior of the Common crane (*Grus grus*) and Demoiselle crane (*Anthropoides virgo*) (Gruidae, Aves) during their pre-migration period

K. D. Kondrakova

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

Received: May 19, 2023 / revised: June 22, 2023 / accepted: June 24, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. Studying of animal behavior is important to understand the evolution and ecology of species, as well as to develop strategies and measures to conserve rare species. Investigating the time budget of closely related species allows detecting species-specific patterns of behavior. A comparative analysis of the time budget of the Common crane (*Grus grus*) and Demoiselle crane (*Anthropoides virgo*) in their pre-migration period, during which they as a rule feed in agricultural fields, was carried out. Species differences in the foraging strategies were revealed. Demoiselle cranes forage while moving across the field while Common cranes forage while standing still. Thus, Common cranes, which traditionally use fields to feed, forage less energy-intensely than Demoiselle cranes that are a steppe species and began to use agricultural landscapes after virgin lands since the middle of the last century. Common cranes spent more time preening than Demoiselle cranes, and juveniles of both species spend less time to this activity than adults but no statistically significant differences were found. Both species spent the least time to rest and other activities.

Keywords: time budget, Demoiselle crane, Common crane, foraging strategy, daily activity

For citation: Kondrakova K. D. Comparative analysis of the behavior of the Common crane (*Grus grus*) and Demoiselle crane (*Anthropoides virgo*) (Gruidae, Aves) during their pre-migration period. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 290–300 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-290-300>

REFERENCES

- Ilyashenko E. I. Influence of changes in agricultural landscapes on the distribution and number of the Demoiselle crane (*Anthropoides virgo* Linnaeus, 1758) (Gruidae, Aves) in its breeding area since the middle of the 20th century. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2019, no. 2, pp. 222–236 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-2-222-236>
- Kondrakova K. D. Materials on the Eurasian crane time budget during the summer-autumn period in the Ryazan region, Russia. *Cranes of Eurasia (Distribution, Biology)*, 2021, no. 6, pp. 439–454 (in Russian).
- Markin Yu. M. *Seryi zhuravl' v evropeiskoi chasti Rossii* [The Eurasian Crane in the European part of Russia]. Ryazan, Golos gubernii Publ., 2013. 118 p. (in Russian).

✉ *Corresponding author.* Laboratory of Biodiversity Conservation and Use of Bioresources, A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail address: Kristina D. Kondrakova: <https://orcid.org/0000-0002-1569-0708>, kondrakova92@gmail.com.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СЕРОГО ЖУРАВЛЯ

- Anderson D. R., Burnham K. P., White G. C. AIC model selection in overdispersed capture-recapture data. *Ecology*, 1994, vol. 75, iss. 6, pp. 1780–1793.
- Alonso J. A., Alonso J. C. Age-related differences in time budgets and parental care in wintering common cranes. *The Auk*, 1993, vol. 110, iss. 1, pp. 78–88.
- Alonso J. C., Veiga J. P., Alonso J. A. Familienauflösung und Abzug aus dem Winterquartier beim Kranich *Grus grus*. *Journal für Ornithologie*, 1984, Bd. 125, no. 1, S. 69–74.
- Alonso J. C., Bautista L. M., Alonso J. A. Family-based territoriality vs flocking in wintering common cranes *Grus grus*. *Journal of Avian Biology*, 2004, vol. 35, iss. 5, pp. 434–444. <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2004.03290.x>
- Avilés J. M. Time budget and habitat use of the Common crane wintering in dehesas of southwestern Spain. *Canadian Journal of Zoology*, 2003, vol. 81, iss. 7, pp. 1233–1238. <https://doi.org/10.1139/z03-105>
- Barton K. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.15.6. *The Comprehensive R Archive Network*, 2016. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn> (accessed May 10, 2023).
- Bates D., Maechler M., Bolker B., Walker S., Haubo Bojesen Christensen R., Singmann H., Dai B., Grothendieck G., Green P. lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1–12edn. *The Comprehensive R Archive Network*, 2016. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/index.html> (accessed May 10, 2023).
- Johnsgard P. A. *Cranes of the World*. Bloomington, Indiana University Press, 1983. 278 p.
- Krebs J. R., Davies N. B. The Evolution of Behavioural Ecology. In: *Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach*. Boston, Blackwell Scientific Publications, 2009, pp. 3–12.
- Lenth R., Lenth M. R. Package “lsmeans”. *The American Statistician*, 2018, vol. 34, iss. 4, pp. 216–221.
- Lindström A., Piersma T. Mass changes in migrating birds: The evidence for fat and protein storage re-examined. *Ibis*, 1993, vol. 135, iss. 1, pp. 70–78.
- Li Z., Wang Z., Ge C. Time budgets of wintering Red-Crowned cranes: Effects of habitat, age and family size. *Wetlands*, 2013, vol. 33, iss. 2, pp. 227–232. <https://doi.org/10.1007/s13157-012-0371-z>
- Li C., Zhou L., Xu L., Zhao N., Beauchamp G. Vigilance and activity time-budget adjustments of wintering hooded cranes, *Grus monacha*, in human-dominated foraging habitats. *PLoS One*, 2015, vol. 10, iss. 3, article number e0118928. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118928>
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. *The Comprehensive R Archive Network*. 2020. Available at: <http://www.cran.r-project.org/> (accessed May 10, 2023).
- Schaub M., Jenni L., Bairlein F. Fuel stores, fuel accumulation, and the decision to depart from a migration stopover site. *Behavioral Ecology*, 2008, vol. 19, iss. 3, pp. 657–666. <https://doi.org/10.1093/beheco/arn023>
- Tacha T. C. Social organization of sandhill cranes from midcontinental North America. *Wildlife Monographs*, 1988, no. 99, pp. 3–37. <https://www.jstor.org/stable/3830635>
- Wang K., Yang X., Zhao J., Yu H., Min L. Relations of daily activity patterns to age and flock of wintering Black-necked crane (*Grus nigricollis*) at Napa Lake, Shangri-La in Yunnan. *Zoological Research*, 2009, vol. 30, iss. 1, pp. 74–82. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1141.2009.01074>
- Wan W., Zhou L., Song Y. Shifts in foraging behavior of wintering Hooded cranes (*Grus monacha*) in three different habitats at Shengjin Lake, China. *Avian Research*, 2016, vol. 7, iss. 1, article number 13. <https://doi.org/10.1186/s40657-016-0047-0>
- Wellcome T. I., Fisher R. J., Poulin R. G., Todd L. D., Bayne E. M., Flockhart D. T., Schmutz J. K., Smet K. D., James P. C. Apparent survival of adult Burrowing Owls that breed in

Canada is influenced by weather during migration and on their wintering grounds. *The Condor*, 2014, vol. 116, iss. 3, pp. 446–458. <https://doi.org/10.1650/CONDOR-13-161.1>

Yang Y. A. N. G., Wen-Hua C. H. E. N., Wang-Gao J. I. A. N. G., Shi-Jian Y. A. N. G. Effects of group size on vigilance behavior of wintering common cranes *Grus grus*. *Zoological Research*, 2006, vol. 27, iss. 4, pp. 357–362.

Zhang T., Xu F., Ma M., Ding P. Autumn time budget and diurnal rhythm of Black-necked crane. *Pakistan Journal of Zoology*, 2020, vol. 52, iss. 6, pp. 2405–2408. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/20180201160218>

Оригинальная статья

УДК 57.017.4+004.932

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-301-313>

ОБРАБОТКА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ *DAPHNIA MAGNA* STRAUS (CLADOCERA, CRUSTACEA) КАК ОСНОВА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

А. С. Олькова , Е. В. Медведева

Вятский государственный университет
Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36

Поступила в редакцию 30.03.2023 г., после доработки 10.05.2023 г., принята 25.05.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. Компьютерная обработка видеоряда с тест-организмами является перспективным направлением развития биотестирования, так как значительно увеличивается пропускная способность методов в единицу времени и одновременно учитывается несколько тест-реакций. Цель работы – разработка и апробация автоматизированного способа учёта комплекса тест-функций *D. magna* для дальнейшей оценки токсичности водных сред. Видео с *D. magna* обрабатывали средствами языка программирования Python с применением библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Разработанный программный алгоритм позволяет обнаруживать особей *D. magna* разного возраста, определять их линейные размеры, скорости и ускорения. Такой функционал, применённый к модельным группам *D. magna*, позволяет оценивать острую токсичность (по летальным и сублетальным эффектам) и хроническую токсичность проб (по количеству родившейся молоди и её физиологическим реакциям).

Ключевые слова: биотестирование, *Daphnia magna*, двигательная активность, алгоритмы обнаружения движущихся объектов

Для цитирования. Олькова А. С., Медведева Е. В. Обработка видеоизображений *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) как основа автоматизированных методов биотестирования // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 301 – 313. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-301-313>

ВВЕДЕНИЕ

Биотестирование использовалось для оценки качества окружающей среды задолго до появления компьютеров и цифровой техники. Первые методы биотестирования – визуальные оценки реакций тест-организмов – используются до сих пор, являются классическими и рекомендованы протоколами международных и национальных стандартов (ФР.1.39.2007.03222, 2007; ISO 6341:2012, 2012; OECD. Test No. 202, 2004). Вслед за ними появлялись приборы для экотоксикологического ана-

 Для корреспонденции. Кафедра экологии и природопользования Вятского государственного университета.

ORCID и e-mail адреса: Олькова Анна Сергеевна: <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>, usr08617@vyatsu.ru; Медведева Елена Викторовна: <https://orcid.org/0000-0002-0677-1418>, medvedeva@vyatsu.ru.

лиза, в России получили распространение Биотокс-10М, Биотестер, Измеритель плотности суспензии, Флюорат. В аналитической работе (Kokkali, van Delft, 2014) обобщены данные по 60 видам приборов, позволяющих автоматизировать некоторые операции при биоанализах, большинство из них оценивают численность, флуоресценцию и биолюминесценцию одноклеточных тест-организмов, иммобилизацию многоклеточных организмов и только 5 приборов имеют возможность оценивать двигательную активность рыб и ракообразных.

Согласно этике по обращению с лабораторными животными, среди многоклеточных тест-организмов предпочтение отдается низшим ракообразным (Häder, 2018a, b). *Daphnia magna* – зоопланктонный организм, встречающийся в пресноводных экосистемах, космополит. В то же время дафнии – удобный модельный организм, который хорошо изучен и не менее успешно используется в экотоксикологических исследованиях, чем млекопитающие (Guilhermino et al., 2000). Физиологические реакции низших ракообразных являются ценными экспрессными тест-функциями для сравнения острой токсичности различных веществ (Pawlik-Skowrońska, Bownik, 2021).

В литературе имеется множество экотоксикологических сведений, полученных с помощью оценки тест-функции двигательной активности дафний и её производных (скорость, частота скачков и т.д.), но степень автоматизации обработки видеоданных не совершенна. Так, в работе (Pawlik-Skowrońska, Bownik, 2021), опирающейся на метод, описанный (Shimizu et al., 2002), положение дафнии определялось щелчком мыши по её изображению на одном видеокadre, затем программное обеспечение автоматически перемещало видеоклип к следующему кадру, то есть работа по отслеживанию организма проводилась вручную «покадровым методом». Этот же ручной покадровый метод, дополненный обработкой результатов с помощью программного обеспечения Tracker® 5.1.0 используется в исследовании (Szabelak, Bownik, 2021). В работе (Moison et al., 2012) длительность видеонаблюдения была 60 мин, что, вероятно, усложняло обработку данных.

Результаты использования технологии компьютерного зрения легли в основу программно-аппаратного комплекса «Анализатор токсичности TrackTox», который позволяет распознавать тест-организмы, оценивать скорость, пройденное расстояние за единицу времени, высоту плавания относительно дна кюветы, ориентацию организмов в пространстве, сложность траектории (фрактальная размерность) (Никитин и др., 2022; Nikitin et al., 2015). Предлагаемое время обработки видеоизображений, полученных на данном комплексе, составляет 30 мин. Характеристика метода может быть улучшена. Альтернативное развитие способов учёта тест-функций гидробионтов будет способствовать становлению автоматизированного этапа биотестирования и накоплению новых научных данных.

Цель данной работы – разработать автоматизированный способ учёта комплекса тест-функций *D. magna*, включающих сублетальные реакции (изменения двигательной активности), смертность и хронические эффекты (плодовитость особей) для дальнейшей оценки токсичности водных сред.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Тест-организмы и получение видеоряда с ними. Для получения видеоизображений и их обработки использовали лабораторную культуру *D. magna*. В воду питьевого качества, долговременно используемую для культивирования *D. magna*, помещали тест-организмы – по одному и группами. При первичной апробации алгоритма обнаружения живого движущегося объекта работали с одной особью. Далее программу испытывали на модельных группах.

Дафнии помещались в стеклянный химический стакан с диаметром дна 3 см, уровень воды составлял 1.5 см. Стакан, в свою очередь, помещался в цилиндрическую камеру, по периметру которой была проложена светодиодная лента, создававшая одинаковый уровень освещения со всех сторон. Съемку начинали через 10 мин после манипуляций для нивелирования тактильного стресса организмов.

Видео были получены с помощью веб-камеры, закрепленной на штативе на высоте 20 см от поверхности воды. Время видеосъемки – 5 мин. Разрешение видео – 720×1080 пк, частота кадров – 25 кадр./с.

Методы обработки видеоданных. Для реализации алгоритма обнаружения живых движущихся организмов и оценки их параметров использовался язык программирования Python с применением библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

Последовательно решались 3 основные задачи: обнаружение движущихся живых объектов на основе метода оценки фона, отслеживание объектов в последующих кадрах и определение их параметров.

Для улучшения визуального качества изображения и повышения точности обнаружения объектов сначала выполнялась предобработка изображения. Она включала методы гамма-коррекции и нерезкого маскирования, позволяющие выровнять яркость фоновых пикселей и повысить контраст небольших объектов (Гонсалес, Вудс, 2012).

Дальнейший алгоритм обнаружения живых организмов был реализован на основе метода вычитания фона. В качестве математической модели фона использовалась смесь гауссовых распределений (GMM), описанная в (Bouwman et al., 2008; Mathias et al., 2021). Данная модель адаптирована к изображениям с фиксированным или медленно меняющимся фоном и хорошо зарекомендовала себя для обнаружения движущихся объектов, в том числе находящихся под водой (Mathias et al., 2021).

В соответствии с моделью (Mathias et al., 2021), вероятность наблюдения текущего (k -го) значения яркости каждого пикселя определялась формулой:

$$P(X_k) = \sum_{j=1}^S w_j^k N(X_k | \mu_j^k, \sigma_j^k),$$

где X_k – это смоделированная функция распределения Гаусса, $w_j^k, \mu_j^k, \sigma_j^k$ – вес, математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение j -го распределения k -го наблюдения соответственно; $N(X_k | \mu_j^k, \sigma_j^k)$ – функция плотности нормального распределения; S – количество распределений в смеси.

Для каждого пикселя последующего кадра на основе расстояния Махаланобиса (Bouwman et al., 2008) определялось, какому распределению соответствует новое значение. Затем по отношению w_j^k / σ_j^k принималось решение о принадлежности пикселей фону или объекту. Очевидно, что пиксели с малым весом и большим среднеквадратичным отклонением будут принадлежать движущимся объектам, а пиксели с большим средним и малым среднеквадратичным отклонением – фону.

Для последующих кадров выполняется обновление параметров распределений яркостей пикселей. Если предварительно полученная по k -кадрам нормализованная гистограмма существенно отличается от текущей, то эта гистограмма заменяется новой и смешанная модель фона перестраивается. Таким образом, алгоритм позволяет обнаружить подвижные объекты на изображениях, в том числе объекты, которые некоторое время были не подвижны, а потом продолжили движение.

Изображение после вычитания фона содержало небольшие фрагменты другой яркости (от одного до нескольких пикселей) как на фоновом поле, так и на объектах интереса. Для их устранения применяли морфологические операции размыкания (Opening) и замыкания (Closing) (Гонсалес, Вудс, 2012).

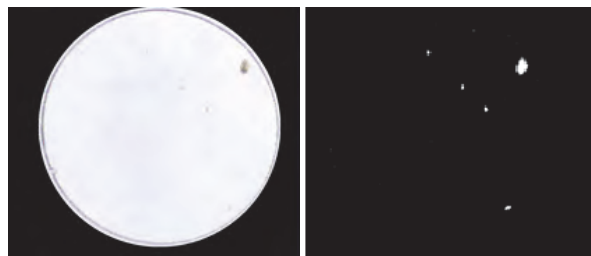
Предполагаемые объекты интереса выделяли прямоугольной рамкой, и им присваивали нумерованные метки. Для каждого объекта вычисляли координаты центров как среднеарифметическое значение координат составляющих его точек.

Для повышения точности и скорости работы алгоритма на последующих кадрах использовали алгоритм отслеживания объектов, основанный на дискриминационно-корреляционном фильтре с канальной и пространственной надежностью (DCF-CSRT Tracker) (Lukežič et al., 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Программа обнаружения живых движущихся объектов. Результат работы алгоритма вычитания фона с использованием смеси гауссовых распределений показан на рис. 1.

Программная обработка видеопоследовательностей позволяет выполнить: об-



a / a

б / б

Рис. 1. Внешний вид первоначального кадра видеоряда с *D. magna* (а) и после «вычитания фона» (б)

Fig. 1. Appearance of the raw frame from the video with *D. magna* (a) and that of the image after background subtraction (b)

наружение и подсчёт количества движущихся особей *D. magna*; вычисление площади движущегося объекта в различных проекциях с дальнейшим автоматическим выбором проекции с максимальным количеством пикселей, что характеризует результирующий размер дафнии. Оценка количества пикселей, принадлежащих живому организму, по множеству кадров позволит в дальнейшем определять морфо-

логические параметры объекта – длину и ширину, что также имеет диагностическое значение. Метод вычитания фона позволяет производить как ярко окрашенных дафний, так и частично лишенных пигментирования вследствие токсического воздействия:

- оценку координат центров тест-организмов для дальнейшего расчета скорости и ускорения гидробионтов;
- оценку скорости движения организмов по измеренным координатам центров объектов в соседних кадрах с учетом кадровой частоты;
- оценку ускорения организмов – по быстрой изменению скорости организмов;
- визуализацию траектории движения – временной ряд координат центров живых объектов.

Скорость и ускорение движения организмов вычисляются в каждом втором кадре. На рис. 2 представлены варианты отражения обработки видеоданных с одной взрослой особью и четырьмя новорожденными особями *D. magna*.

Основные параметры тест-организмов выводятся на экран и могут быть использованы для дополнительной обработки массивов данных. Время обработки одного кадра – 110 мс, 5-минутной записи – 30 с.

Характеристики живых движущихся объектов. В таблице обобщены параметры *D. magna*, вычисленные с помощью разработанной программы.

Программа безошибочно определяла количество дафний, помещённых в экспериментальную ёмкость. Для небольшого количества особей эта операция легко выполняется визуально. Однако автоматизация процесса крайне необходима при большом потоке анализов, а также при подсчете молоди, родившейся в эксперименте по определению хронической токсичности пробы. Успешное обнаружение и оценка параметров как взрослых особей *D. magna*, так и суточной молоди, подтверждает возможность использования программы как для кратких экспериментов по определению острой токсичности, так и для продолжительных токсикологических испытаний на хроническую токсичность. Препятствий для отслеживания большего количества *D. magna* нет. В литературе имеются сведения об одновременном видеонаблюдении *D. magna* в количестве 50 штук (Nasyrova, Nikitin, 2020).

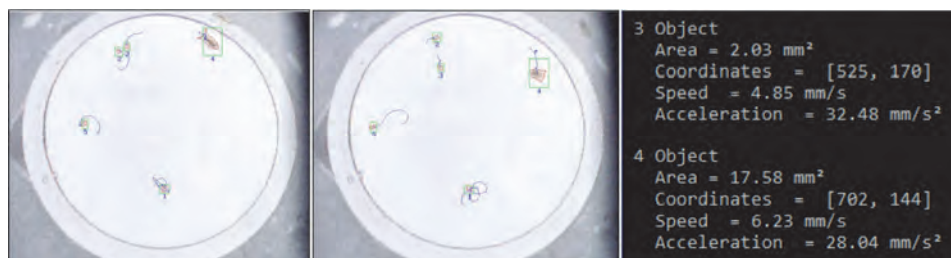


Рис. 2. Обнаружение живых объектов, их траектории и основные параметры
Fig. 2. Detection of living objects, their trajectories and basic parameters

Соответствие параметров *D. magna*, оцениваемых автоматически, тест-реакциям и уровням наблюдаемых эффектов

Table. Compliance of *D. magna* parameters estimated automatically with test reactions and observed effect levels

Параметр, оцениваемый программой / Parameter evaluated by the program	Тест-реакции / Test reactions	Уровень эффектов / Effect level	
Количество движущихся взрослых особей, шт. / Number of moving adults, pcs.	Выживаемость и смертность* / Survival and mortality	Летальные / Lethal	
Площадь, мм ² / Area, mm ²	Линейные размеры / Linear dimensions	Сублетальные (для первого импактного поколения) / Sublethal (for the first impact generation)	Хронические (для последующих поколений) / Chronic (for later generations)
Скорость, мм/с / Speed, mm/s	Двигательная активность / Motor activity		
Ускорение, мм ² /с / Acceleration, mm ² /s			
Количество движущейся молоди / Number of moving juveniles	Плодовитость / Fertility	Хронические / Chronic	

Примечание. * – вычисляется с учетом разницы количества опытных особей, помещенных в тест-среду, и количества особей, обнаруженных после необходимой экспозиции.

Note. * – the parameter is calculated taking into account the difference between the number of experimental individuals placed in the test environment and the number of individuals found after the required exposure.

Площадь движущихся дафний определялась по количеству выделенных пикселей. Для определения реальной площади изображение в пикселях соотносилось с размерами в пространстве. Зная, что реальный диаметр емкости для наблюдений равен 3 см, и то, что длина особи больше ширины в 1.5 раза, можно вычислить линейный размер (длину) каждой дафнии по формуле $L = 2\sqrt{(3S/2\pi)}$, где L – длина особи, S – площадь, мм². Так, для взрослой особи (см. рис. 2) $L = 2\sqrt{(3S/2\pi)} = 2\sqrt{(3 \cdot 16.6/2\pi)} = 5.6$ мм. Для молодой особи $L = 1.9 \pm 0.5$ мм.

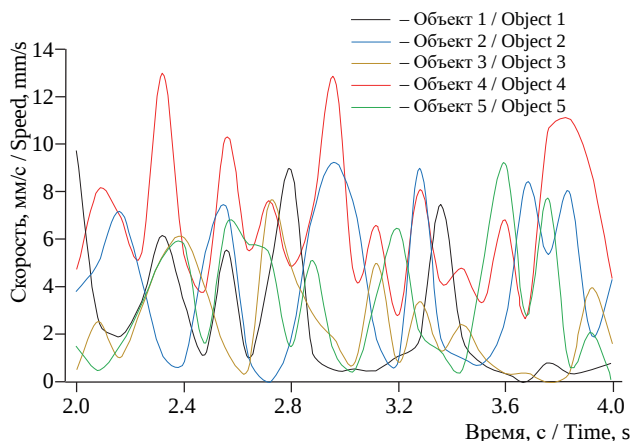


Рис. 3. Скорость движения пяти *D. magna* в одной емкости
Fig. 3. Movement speed of five *D. magna* in one container

Скорость и ускорение дафний могут быть самостоятельными тест-функциями, но, пользуясь классической терминологией, их можно отнести к двигательной активности особей. Скорость тест-организмов варьировала в широких пределах. Это объясняется скачкообразным характером движения дафний, что видно на рис. 3.

Вероятно, каждый максимальный пик на графиках связан со скач-

кообразным периодическим перемещением дафнии в воде, а промежуточные пики объясняются вращениями и поворотами рачков в пространстве.

На кадрах, показанных на рис. 3, ювенильные дафнии двигались со скоростью от 2.40 до 5.6 мм/с. Их средняя скорость составила 3.2 ± 0.8 (M $\pm$ δ). Взрослая особь двигалась быстрее – 6.68 мм/с, что вполне закономерно. Ускорения у молодых особей также были ниже, чем у взрослой особи: 32.8 ± 6.3 по сравнению с 45.7 мм/с². Безусловно, дисперсия значений и ошибка среднего уменьшится при возрастании количества наблюдаемых объектов.

Первичное тестирование программы в экспериментах с модельными токсикантами и реальными пробами показало, что предложенный метод чувствителен и экспрессен. Так, после суточной экспозиции *D. magna* в пробе подземной воды, в которой превышен норматив по содержанию бора в 20 раз, средняя скорость организмов составила 5.0 ± 0.9 мм/с, а ускорение 29.1 ± 5.1 мм/с², что было меньше контрольных показателей в 1.5 и 1.4 раза соответственно ($p < 0.05$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Смертность и плодовитость низших ракообразных являются основными тест-функциями, используемыми для определения токсичности, однако обнаружение тонких изменений, вызванных некоторыми химическими веществами в низких концентрациях или другими стресс-факторами, может потребовать более чувствительных биомаркеров (Bownik, 2017). Тесты на основе двигательной активности *D. magna* в настоящее время включают в токсикологические испытания новых пестицидов наряду с оценкой генотоксичности, уровня окислительного стресса и подавлением размножения (Zhang et al., 2023). С помощью тестов на изменение частоты сердечных сокращений и двигательной активности трех гидробионтов, включая *D. magna*, показано, что инсектициды карбарил и фенитроцион оказывают экологически значимое воздействие при концентрациях, ниже их допустимого уровня (Bedrossiantz et al., 2023). Имеются примеры низкой чувствительности *D. magna* в части изменения активности плавания: полистирольные нанопластики (0.05 и 0.5 мкг/мл) не изменяли двигательную активность рачков в течение 21 дня (De Felice, 2022). При этом ученые соглашаются в необходимости автоматизированного учёта физиологических реакций тест-организмов и важности накопления научных данных о сублетальных реакциях на различные воздействия.

Алгоритмы, разработанные на основе программы Python и описанные в данной работе, позволяют оценивать несколько тест-функций, производных от физиологической активности дафний. Подходы, которые применялись для обработки видеопоследовательностей, соответствуют современным междисциплинарным методам, рекомендуемым для подобных операций (Häder, 2018a, b).

Оценка количества не иммобилизованных особей может осуществляться без видеозаписи, но не будет непрерывной. Перспектива оценки количества подвижных особей показана в работах, где токсиканты не действовали летально, но снижали время активного плавания рачков (Untersteiner et al., 2003; Ferrão-Filho et al., 2014).

Показанная в данной работе возможность отслеживания морфологических параметров *D. magna* также имеет важное диагностическое значение. Например, в работе (Shahmohammadloo et al., 2020) показано, что природные токсиканты микроцистины влияют на скорость соматического роста дафний. Такие параметры удобнее измерять не прямым микроскопированием, а бесконтактным и непрерывным видеонаблюдением за параметрами объектов.

Впоследствии анализ траекторий движения дафний и их сравнение с контрольными данными будет способствовать выделению аномальных моделей плавания. Нарушение координации *D. magna* в пространстве, дезориентация по отношению к источнику света свидетельствуют о нейротоксичности веществ (He et al, 2023). Использование высокосортной камеры позволит доработать программу в части учета дополнительных тест-функций: частоты сердечных сокращений дафний, взмахов конечностей. Камера с частотой кадров 200 в секунду позволяет фиксировать эти реакции *D. magna* и определять кардиотоксичность водных сред и веществ (Kwon et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы биотестирования до сих пор уступают по производительности химическим методам анализа. С помощью технологий автоматизированного учёта реакций лабораторных тест-организмов возможно добиться не только увеличения пропускной способности методов биотестирования, но и значительного увеличения числа оцениваемых тест-функций, что в итоге будет способствовать формированию и внедрению в практику методологии системного биотестирования.

В проведенном исследовании показаны возможности разработанного алгоритма и программы: обнаружение движущихся особей *D. magna* разного возраста, определение их линейных размеров, скорости и ускорения. Преимущества обнаружения подвижных взрослых и новорожденных особей заключаются в том, что может проводиться автоматическая оценка как острой токсичности проб – по количеству оставшихся в живых импактных особей, так и оценка хронической токсичности проб по плодовитости *D. magna* – благодаря обнаружению молоди в функционале программы. Кроме того, показатели двигательной активности молоди, рожденной в пробе, будут дополнительными тест-функциями при оценке хронического воздействия пробы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
- Никитин О. В., Насырова Э. И., Перевозчикова Е. В., Андреев П. А., Гизатуллин Д. Ю., Латыпова В. З. Оценка двигательной активности гидробионтов при помощи компьютерного зрения // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 127 – 131.
- ФР 1.39.2007.03222. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний. М.: АКВАРОС, 2007. 52 с.

- Bedrossiantz J., Faria M., Prats E., Barata C., Cachot J., Raldúa D. Heart rate and behavioral responses in three phylogenetically distant aquatic model organisms exposed to environmental concentrations of carbaryl and fenitrothion // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 865. Article number 161268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161268>
- Bouwman T., El Baf F., Vachon B. background modeling using mixture of gaussians for foreground detection – a survey // *Recent Patents on Computer Science*. 2008. Vol. 1, iss. 3. P. 219 – 237. <https://doi.org/10.2174/1874479610801030219>
- Bownik A. Daphnia swimming behaviour as a biomarker in toxicity assessment: A review // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 601 – 602. P. 194 – 205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.199>
- De Felice B., Sugni M., Casati L., Parolini M. Molecular, biochemical and behavioral responses of *Daphnia magna* under long-term exposure to polystyrene nanoplastics // *Environment International*. 2022. Vol. 164. Article number 107264. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107264>
- Ferrão-Filho A. S., Soares M. C., Lima R. S., Magalhães V. F. Effects of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) on the swimming behavior of *Daphnia* (Cladocera) // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2014. Vol. 33. P. 223 – 229. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.2420>
- Guilhermino L., Diamantino T., Silva M. C., Soares A. M. V. M. Acute toxicity test with *Daphnia magna*: An alternative to mammals in the prescreening of chemical toxicity? // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2000. Vol. 46, iss. 3. P. 357 – 362. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.1916>
- Häder D.-P. Historical development of bioassays // *Bioassays: Advanced Methods and Applications* / eds. D.-P. Häder, G. S. Erzinger. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018a. P. 41 – 49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811861-0.00003-6>
- Häder D.-P. Image analysis for bioassays – the basics // *Bioassays: Advanced Methods and Applications* / eds. D.-P. Häder, G. S. Erzinger. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018b. P. 69 – 98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811861-0.00005-X>
- He Zh., Chen Y., Huo D., Gao J., Xu Y., Yang R., Yang Y., Yu G. Combined methods elucidate the multi-organ toxicity of cylindrospermopsin (CYN) on *Daphnia magna* // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 324. Article number 121250. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121250>
- ISO 6341:2012. Water quality – Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) – Acute toxicity test. Geneva: International Organization for Standardization, 2012. 22 p.
- Kokkali V., van Delft W. Overview of commercially available bioassays for assessing chemical toxicity in aqueous samples // *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*. 2014. Vol. 61. P. 133 – 155. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.08.001>
- Kwon I. H., Kim I. Y., Heo M. B., Park J.-W., Lee S.-W., Lee T. G. Real-time heart rate monitoring system for cardiotoxicity assessment of *Daphnia magna* using high-speed digital holographic microscopy // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 780. Article number 146405. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146405>
- Lukežič A., Vojtř T., Čehovin L., Matas J., Kristan M. Discriminative correlation filter tracker with channel and spatial reliability // *International Journal of Computer Vision*. 2018. Vol. 126, iss. 8. <https://doi.org/10.1007/s11263-017-1061-3>
- Mathias A., Dhanalakshmi S., Kumar R., Narayanamoorthi R. Underwater object detection based on bidimensional empirical mode decomposition and gaussian mixture model approach // *Ecological Informatics*. 2021. Vol. 66. Article number 101469. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101469>
- Moison M., François G. S., Souissi S. Effect of temperature on *Temora longicornis* swimming behaviour: Illustration of seasonal effects in a temperate ecosystem // *Aquatic Biology*. 2012. Vol. 16, iss. 2. P. 149 – 162. <https://doi.org/10.3354/ab00438>

Nasyrova E. I., Nikitin O. V. The swimming behavior of *Daphnia magna* ensemble in two-dimensional space from the diffusion motion point of view // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. Article number 042027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042027>

Nikitin O. V., Petrova V. M., Latypova V. Z. Bioassay of pyrethroid insecticide esfenvalerate using fractal analysis of *Daphnia magna* motion // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2015. Vol. 6, № 6. P. 1729 – 1736.

OECD. 2004. Test No. 202: *Daphnia* sp. acute immobilisation test // OECD Guide-lines for the Testing of Chemicals, Section 2. Paris: OECD Publishing, 2004. 12 p.

Pawlik-Skowrońska B., Bownik A. Cyanobacterial anabaenopeptin-B, microcystins and their mixture cause toxic effects on the behavior of the freshwater crustacean *Daphnia magna* (Cladocera) // Toxicon. 2021. Vol. 198. P. 1 – 11. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2021.04.023>

Shahmohammadloo R. S., Simmons D. B. D., Sibley P. K. Shotgun proteomics analysis reveals sub-lethal effects in *Daphnia magna* exposed to cell-bound microcystins produced by *Microcystis aeruginosa* // Comparative Biochemistry and Physiology. Part D: Genomics and Proteomics. 2020. Vol. 33. Article number 100656. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2020.100656>

Shimizu N., Ogino C., Kawanishi T., Hayashi Y. Fractal analysis of *Daphnia motion* for acute toxicity bioassay // Environmental Toxicology. 2002. Vol. 17, iss. 5. P. 441 – 448.

Szabelak A., Bownik A. Behavioral and physiological responses of *Daphnia magna* to salicylic acid // Chemosphere. 2021. Vol. 270. Article number 128660. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128660>

Untersteiner H., Kahapka J., Kaiser H. Behavioural response of the cladoceran *Daphnia magna* Straus to sublethal copper stress – validation by image analysis // Aquatic Toxicology. 2003. Vol. 65, iss. 4. P. 435 – 442. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(03\)00157-7](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(03)00157-7)

Zhang H., Ren X., Liu T., Zhao Y., Gan Y., Zheng L. The stereoselective toxicity of di-nitofuran to *Daphnia magna*: A systematic assessment from reproduction, behavior, oxidative stress and digestive function // Chemosphere. 2023. Vol. 327. Article number 138489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138489>

Video image processing of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) as a basis for automated biotesting methods

A. S. Olkova ✉, E. V. Medvedeva

Vyatka State University
36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia

Received: March 30, 2023 / revised: May 10, 2023 / accepted: May 25, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. Computer processing of a video sequence with test organisms is a promising direction in the development of biotesting, as the throughput of methods per unit time increases significantly and several test reactions are taken into account simultaneously. The aim of the work is to develop and test an automated method for considering a complex of *D. magna* test functions for further assessment of the toxicity of aquatic environments. Videos with *D. magna* were processed using the Python programming language and the OpenCV computer vision library. The developed algorithm makes it possible to detect *D. magna* individuals of different ages, to determine their linear dimensions, velocities and accelerations. This functionality, applied to model groups of *D. magna*, makes it possible to assess the acute toxicity (by lethal and sublethal effects) and chronic toxicity of samples (by the number of juveniles born and their physiological reactions).

Keywords: biotesting, *Daphnia magna*, locomotor activity, algorithms for detecting moving objects

For citation: Olkova A. S., Medvedeva E. V. Video image processing of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) as a basis for automated biotesting methods. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 301–313 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-301-313>

REFERENCES

- Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 1104 p. (in Russian).
- Nikitin O. V., Nasyrova E.I., Perevozchikova E. V., Andreev P. A., Gizatullin D. Yu., Latypova V. Z. Evaluation of the motor activity of hydrobionts using computer vision. *Biodiagnostika sostoianiia prirodnkh i prirodno-tekhnogennykh sistem: materialy XX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Biodiagnostics of the State of Natural and Natural-Technogenic Systems: Proceedings of the XX All-Russian Scientific-Practical Conference With International Participation]. Kirov, Vyatka State University Publ., 2022, pp. 127–131 (in Russian).
- FR.1.39.2007.03222. *Biological Control Methods. Methods of Determining the Toxicity of Water and Water Extracts from Soils, Sewage Sludge, Waste Mortality and Fertility Change in Daphnia*. Moscow, Akvaros, 2007. 52 p. (in Russian).
- Bedrossiantz J., Faria M., Prats E., Barata C., Cachot J., Raldúa D. Heart rate and behavioral responses in three phylogenetically distant aquatic model organisms exposed to environmental

✉ Corresponding author. Department of Ecology and Nature Management of the Vyatka State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Anna S. Olkova: <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>, usr08617@vyatsu.ru; Elena V. Medvedeva: <https://orcid.org/0000-0002-0677-1418>, medvedeva@vyatsu.ru.

concentrations of carbaryl and fenitrothion. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 865, article number 161268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161268>

Bouwman T., El Baf F., Vachon B. background modeling using mixture of gaussians for foreground detection – a survey. *Recent Patents on Computer Science*, 2008, vol. 1, iss. 3, pp. 219–237. <https://doi.org/10.2174/1874479610801030219>

Bownik A. *Daphnia* swimming behaviour as a biomarker in toxicity assessment: A review. *Science of The Total Environment*, 2017, vol. 601–602, pp. 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.199>

De Felice B., Sugni M., Casati L., Parolini M. Molecular, biochemical and behavioral responses of *Daphnia magna* under long-term exposure to polystyrene nanoplastics. *Environment International*, 2022, vol. 164, article number 107264. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107264>

Ferrão-Filho A. S., Soares M. C., Lima R. S., Magalhães V. F. Effects of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) on the swimming behavior of *Daphnia* (Cladocera). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, vol. 33, pp. 223–229. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.2420>

Guilhermino L., Diamantino T., Silva M. C., Soares A. M. V. M. Acute toxicity test with *Daphnia magna*: An alternative to mammals in the prescreening of chemical toxicity? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2000, vol. 46, iss. 3, pp. 357–362. <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.1916>

Häder D.-P. Historical development of bioassays. In: D.-P. Häder, G. S. Erzinger, eds. *Bioassays: Advanced Methods and Applications*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 2018a, pp. 41–49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811861-0.00003-6>

Häder D.-P. Image analysis for bioassays – the basics. In: D.-P. Häder, G. S. Erzinger, eds. *Bioassays: Advanced Methods and Applications*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 2018b, pp. 69–98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811861-0.00005-X>

He Zh., Chen Y., Huo D., Gao J., Xu Y., Yang R., Yang Y., Yu G. Combined methods elucidate the multi-organ toxicity of cylindrospermopsin (CYN) on *Daphnia magna*. *Environmental Pollution*, 2023, vol. 324, article number 121250. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121250>

ISO 6341:2012. *Water quality – Determination of the inhibition of the mobility of Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea) – Acute toxicity test*. Geneva, International Organization for Standardization, 2012. 22 p.

Kokkali V., van Delft W. Overview of commercially available bioassays for assessing chemical toxicity in aqueous samples. *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*, 2014, vol. 61, pp. 133–155. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.08.001>

Kwon I. H., Kim I. Y., Heo M. B., Park J.-W., Lee S.-W., Lee T. G. Real-time heart rate monitoring system for cardiotoxicity assessment of *Daphnia magna* using high-speed digital holographic microscopy. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 780, article number 146405. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146405>

Lukežić A., Vojří T., Čehovin L., Matas J., Kristan M. Discriminative correlation filter tracker with channel and spatial reliability. *International Journal of Computer Vision*, 2018, vol. 126, iss. 8. <https://doi.org/10.1007/s11263-017-1061-3>

Mathias A., Dhanalakshmi S., Kumar R., Narayanamoorthi R. Underwater object detection based on bidimensional empirical mode decomposition and gaussian mixture model approach. *Ecological Informatics*, 2021, vol. 66, article number 101469. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101469>

Moison M., François G. S., Souissi S. Effect of temperature on *Temora longicornis* swimming behaviour: Illustration of seasonal effects in a temperate ecosystem. *Aquatic Biology*, 2012, vol. 16, iss. 2, pp. 149–162. <https://doi.org/10.3354/ab00438>

Nasyrova E. I., Nikitin O. V. The swimming behavior of *Daphnia magna* ensemble in two-dimensional space from the diffusion motion point of view. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 459, article number 042027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042027>

Nikitin O. V., Petrova V. M., Latypova V. Z. Bioassay of pyrethroid insecticide esfenvalerate using fractal analysis of *Daphnia magna* motion. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2015, vol. 6, no. 6, pp. 1729–1736.

OECD. 2004. Test No. 202: *Daphnia* sp. acute immobilisation test. *OECD Guide-lines for the Testing of Chemicals, Section 2*. Paris, OECD Publishing, 2004. 12 p.

Pawlik-Skowrońska B., Bownik A. Cyanobacterial anabaenopeptin-B, microcystins and their mixture cause toxic effects on the behavior of the freshwater crustacean *Daphnia magna* (Cladocera). *Toxicon*, 2021, vol. 198, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2021.04.023>

Shahmohamadloo R. S., Simmons D. B. D., Sibley P. K. Shotgun proteomics analysis reveals sub-lethal effects in *Daphnia magna* exposed to cell-bound microcystins produced by *Microcystis aeruginosa*. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part D: Genomics and Proteomics*, 2020, vol. 33, article number 100656. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2020.100656>

Shimizu N., Ogino C., Kawanishi T., Hayashi Y. Fractal analysis of *Daphnia magna* motion for acute toxicity bioassay. *Environmental Toxicology*, 2002, vol. 17, iss. 5, pp. 441–448.

Szabelak A., Bownik A. Behavioral and physiological responses of *Daphnia magna* to salicylic acid. *Chemosphere*, 2021, vol. 270, article number 128660. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128660>

Untersteiner H., Kahapka J., Kaiser H. Behavioural response of the cladoceran *Daphnia magna* Straus to sublethal copper stress – validation by image analysis. *Aquatic Toxicology*, 2003, vol. 65, iss. 4, pp. 435–442. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(03\)00157-7](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(03)00157-7)

Zhang H., Ren X., Liu T., Zhao Y., Gan Y., Zheng L. The stereoselective toxicity of dinotefuran to *Daphnia magna*: A systematic assessment from reproduction, behavior, oxidative stress and digestive function. *Chemosphere*, 2023, vol. 327, article number 138489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138489>

Обзорная статья

УДК 620.95(470.44)

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-314-330>

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕХОДА НА ЗЕЛЕНУЮ ЭНЕРГЕТИКУ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

А. М. Опарина [✉], Н. А. Политаева, И. В. Ильин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29*

Поступила в редакцию 19.05.2023 г., после доработки 22.06.2023 г., принята 24.06.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. Рассматриваются глобальные перспективы перехода на зеленую энергетику в Саратовской области. Изучены и систематизированы литературные данные о существующей ситуации в секторе альтернативной энергетики (ветряная энергетика, солнечная энергетика, биоэнергетика) в Саратовской области. Данные были изысканы из наиболее актуальных и цитируемых публикаций в мировых базах данных Scopus, Google Scholar, РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) и среди статей средств массовой информации, опубликованных в сети ИНТЕРНЕТ. Описаны плюсы и минусы, а также общее влияние, оказываемое на окружающую природную среду каждого типа возобновляемой энергетики, существующего на территории Саратовской области. Большое внимание уделено влиянию ветроэнергетических установок и солнечных электростанций на окружающую природную среду. Установлено, что на данной территории наиболее развито использование солнечной энергии. Это связано с климатическими условиями и количеством солнечных дней в регионе. Ввиду большого образования органических отходов в Саратовской области рационально использовать биомассу для получения биоэнергии. Правительство Саратовской области намерено и дальше стабильно увеличивать долю возобновляемых источников энергии в энергобалансе региона. К 2035 г. доля возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе Саратовской области достигнет 6%, а в 2050 г. составит около 13%. По мнению авторов, глобальные перспективы зеленых энергетических переходов в России, как и в трансляции на Саратовскую область, заключаются в частичном переходе на альтернативную энергетику (солнце и ветер), с использованием биоэнергетики и высокoeffективных технологий очистки выбросов CO₂ при использовании традиционного топлива.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, биоэнергетика, ветряная энергетика, солнечная энергетика, энергетический переход, влияние ветряных электростанций, влияние солнечных электростанций, Саратовская область

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Технологические вызовы и социально-экономические преобразования в контексте зеленых переходов» (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022).

[✉] Для корреспонденции. Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ORCID и e-mail адреса: Опарина Анна Михайловна: <https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>, annaoparina93@gmail.com; Политаева Наталья Анатольевна: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>, politaevana1971@gmail.com; Ильин Игорь Васильевич: <https://orcid.org/0000-0002-1834-4894>, igor.ilin@spbstu.ru.

Для цитирования. Опарина А. М., Политаева Н. А., Ильин И. В. Глобальные перспективы перехода на зеленую энергетику в Саратовской области // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 314 – 330. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-314-330>

ВВЕДЕНИЕ

Производство энергии в глобальной экономике основано в большей степени на ископаемых ресурсах. Весь объём поставок первичной энергии состоит на 81% из ископаемого топлива, на 5% из ядерной энергии, а доля возобновляемых источников энергии составляет всего лишь 14%, из которой энергия биомассы составляет примерно 70% (REN21, 2022). Доклад IEA «Нулевые выбросы к 2050 году» содержит в себе предупреждение о необходимости сокращения использования ископаемого топлива и предложены пути перехода к системе производства энергии с нулевыми выбросами к 2050 г. (IEA, 2021).

В 2013 г. Программа Правительства Российской Федерации по стимулированию Развития ВИЭ (возобновляемых источников энергии) поставила задачу ввести в действие и подключить к энергосистеме 3.6 ГВт ветроэнергетических установок (ВЭУ) и 1.52 ГВт фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) (Постановление Правительства РФ, 2013). По данным ассоциации развития возобновляемой энергетики, в 2021 г. объем новых эксплуатируемых объектов ВИЭ-генерации по программе ДПМ ВИЭ (программа договоров предоставления мощности в области возобновляемых источников энергии) превысил 1 ГВт, составив 1212 МВт. В июле 2022 г. совокупная установленная мощность возобновляемой генерации в России достигла 5.47 ГВт, т.е. 2.2% всей мощности электростанций страны (Интерес инвесторов..., 2022).

Государственная политика Российской Федерации продолжает способствовать развитию ВИЭ, однако для многих регионов России оно остается пока только на уровне исследований. При этом направленное развитие альтернативной энергетики в регионах России, в том числе и в Саратовской области, представляет собой колоссальное значение для подъема экономики региона.

За годы существования СССР Саратовская область вошла в число крупнейших энергетических доноров страны, которым остается и сегодня. Территория Саратовской области велика (101240 км²) и сопоставима с Южной Кореей. На территории области расположены огромные электростанции – генераторы электроэнергии, такие как Саратовская ГЭС и Балаковская АЭС, которые вырабатывают более 42 млрд кВт·ч. Сама область потребляет всего 13 млрд кВт·ч, то есть, втрое меньше, чем вырабатывает. Несмотря на достаточное для области количество вырабатываемой энергии, ежегодно предлагается множество идей для развития в регионе альтернативной энергетики. В основном это использование ветряной и солнечной энергии.

В Российской Федерации альтернативная энергетика может получить наибольшее развитие в регионах, расположенных в зоне степей, где среднегодовая температура выше, чем в регионах средней полосы России. Во многих районах степной зоны в энергетическом секторе присутствуют 1 – 3 и более видов альтернативных источников энергии. Это уже достаточно напитанные ветряными стан-

циями Ставропольский и Краснодарский края, Ростовская и Волгоградская области. В степных регионах присутствуют солнечные электростанции, биоэнергетика на отходах от сельского хозяйства, а также широко используется энергия малых рек. Одним из таких регионов является Саратовская область (Соколов, Руднева, 2020).

Цель данного исследования проанализировать и систематизировать литературные данные по глобальным перспективам перехода на зеленую энергетику в Саратовской области.

При поиске и изучении литературных данных по вопросу, поставленному в исследовании, выяснилось, что на данный момент отсутствуют публикации, дающие полную и всеобъемлющую актуальную на 2023 г. информацию о состоянии возобновляемой энергетики в Саратовской области. Поэтому было решено собрать и систематизировать все данные, касающиеся данного запроса в одной научной обзорной статье.

Материал для научного обзора изыскивался в научных статьях, опубликованных в различных базах данных, таких как Scopus, Google Scholar и РИНЦ (Российский индекс научного цитирования). Поиск актуальных данных по теме исследования проводился также среди статей средств массовой информации, опубликованных в сети ИНТЕРНЕТ, которые удовлетворяли критериям поиска и обладали достоверностью информации. Во время поиска мы рассматривали весь материал, удовлетворяющий нашему запросу, начиная с публикаций двадцатилетней давности, среди них встречались широко цитируемые, глобальные и интересные работы Cooper, Sheate, 2002, Pearce-Higgins et al., 2009. Однако особое внимание мы уделяли современным публикациям 2020 – 2023 гг.

Поиск по ключевым словам осуществлялся с использованием различных словосочетаний: «альтернативная энергетика + Саратовская область», «зеленая энергетика + Саратовская область», «биоэнергетика + Саратовская область», «ветряная энергетика + Саратовская область», «солнечная энергетика + Саратовская область», «энергетический переход + Саратовская область», «влияние + ветряных электростанций», «влияние + солнечных электростанций». В поисковых системах Scopus и Google Scholar поиск также осуществлялся по ключевым словам на английском языке: «alternative energy + Saratov region», «green energy + Saratov region», «bioenergy + Saratov region», «wind energy + Saratov region», «solar energy + Saratov region», «energy transition + Saratov region», «impact + wind power plants», «impact + solar power plants».

Это извлечение дало наиболее полную картину о требуемом запросе, поскольку разные авторы использовали самые разные комбинации слов в названиях своих работ. Поиск ключевых слов производился по названию, аннотации и ключевым словам каждой публикации. В результате было проанализировано более 100 источников, из которых 25 включено в список литературы. Стоит отметить, что некоторые публикации по искомому вопросу могли быть упущены нами при поиске. Эти публикации могли не включать в своем названии и ключевых словах ни одного словосочетания из нашего поискового запроса. Однако, по нашему мнению, эта вероятность мала и даже если она присутствует, то вряд ли существенно

повлияет на описываемую картину в целом. Первоначально в каждой публикации просматривалось ее название и, при соответствии запросу, вычитывалась аннотация. После установления того, что в аннотации указывается искомая нами проблема, статья была отобрана к дальнейшему изучению. Следующим шагом избранные публикации вычитывались полностью и анализировались.

Аналогичные методики поиска материалов для аналитического обзора используются повсеместно, различными научными группами (Богомолов и др., 2021; Nevzorova, Kutcherov, 2019; Douglas et al., 2023).

Развитие ветроэнергетики в Саратовской области

В России активно наращивается мощность и производительность ветроэлектростанций (ВЭС). На январь 2022 г. суммарная мощность ВЭС в стране составляла уже 1937.69 МВт. Их работа позволяет избежать выбросов CO_2 в атмосферу за счет неиспользования топлива — более 2.2 млн т в год (Берёзкин и др., 2023).

По утвержденной схеме территориального планирования страны в области энергетики до 2030 г. (Схема территориального планирования Российской Федерации..., 2016) в России должны появиться новые ВЭС. Одна из них ВЭС-13, Красноармейская ВЭС, заявленной мощностью 182 МВт, планируется к строительству в Саратовской области. Её ввод увеличит энергетический потенциал Саратовской области в части развития нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Известно, что строительством Красноармейской ВЭС в Высоковском сельском поселении займется «Десятый ветропарк ФРВ», по планам работы закончатся в 2025 г. (Инвесторы вложили..., 2023).

Плюсы и минусы ветроэнергетики. Ветровая энергетика по праву относится к производству «чистой энергии», к её плюсам можно отнести следующие:

- ветроэнергетика неисчерпаема;
- ветроэнергетика экологична (при работе ВЭС практически отсутствуют выбросы углекислого газа в атмосферу);
- площади под ВЭС пригодны для сельскохозяйственных угодий.

Среди минусов ветроэнергетики можно выделить проблемы и трудности с утилизацией выработавших свои сроки ветряных лопастей (Габитов, Егоров, 2021; Khalid et al., 2023). На сегодняшний день их предлагают перерабатывать, перепрофилировать и ремонтировать. Переработка может включать в себя прессование лезвий в доски для использования в строительстве и измельчение стекловолокна на ингредиенты для цемента, однако это трудно транслировать в промышленный масштаб из-за высокой стоимости и энергозатратности таких технологий (Кадырмятов, Филиппова, 2022). Не только утилизация отработавших лопастей вызывает опасение. Отрицательное влияние на окружающую среду оказывает утилизация аккумуляторов, используемых для накопления и хранения электроэнергии. Из них пытаются выделять различные металлы, однако и этому процессу сопутствует выделение большого количества отходов (Кадырмятов, Филиппова, 2022; Liu et al., 2022). Кроме того, для производства аккумуляторов необходимы редкоземельные металлы (Alves et al., 2020; Gielen, Lyons, 2022), добыча которых трудна и несет в себе последствия для окружающей среды. Для установки ВЭС необходимы боль-

шие территории, что изменяет ландшафт в целом, влияя тем или иным образом на флору, фауну и почву, и даже приводит к отчуждению земель.

Шумовое и визуальное воздействие ВЭС, вызываемые ими электро-, радио- и телевизионные помехи описаны в работах (Говорушко, 2011; Saidur et al., 2011).

Вращающиеся лопасти ветроустановок представляют опасность для орнитофауны (Хулка и др., 2013; Перес-Гарсиа и др., 2018; Miller et al., 2014; Morinha et al., 2014). Негативное влияние могут оказывать физические воздействия, исходящие от уже существующих ветроустановок (столкновения птиц с турбинами, лопастями и башнями), также отрицательное воздействие оказывается на местобитания и пути миграции птиц при строительстве ветряных электростанций. Птицы могут сталкиваться с высоковольтными линиями, мачтами, антеннами и окнами зданий, получать повреждения и даже умирать от столкновений с лопастями ВЭУ (Викторович, Седлиска, 2014). В исследовании (Pearce-Higgins et al., 2009) найдены значительные доказательства локального снижения плотности гнездящихся птиц на ветряных электростанциях на возвышенностях. Целостное влияние крупных ветряных электростанций может нарушить экологические связи в местах обитания птиц, что повлияет на их кормовую базу, сократит потенциальные места для выращивания птенцов, укрытия и ночлега (Cooper, Sheate, 2002). Кроме того, ветряные электростанции всегда требуют прокладки линий электропередач, что представляет собой серьезный риск для орнитофауны. Необходимо отметить, что в рассматриваемом нами регионе – Саратовской области, обитает значительное количество редких и исчезающих видов птиц. Среди них в первую очередь следует назвать представителей семейства Дрофиных: большую дрофу (*Otis tarda* Linnaeus, 1758) и стрепета (*Tetrax tetrax* Linnaeus, 1758). Именно в этом регионе сохранилась крупнейшая в России гнездовая популяция дрофы (Опарина и др., 2022). В саратовском Заволжье в гнездовой период также обитают редкие виды жаворонков, таких как белокрылый жаворонок (*Melanocorypha leucoptera* Pallas, 1811), черный жаворонок (*Melanocorypha yeltoniensis* Forster, 1768) (Опарин и др., 2021; Мамаев и др., 2022). На территории области гнездятся также редкие хищные птицы: степной орел (*Aquila rapax* Temminck, 1828), курганник (*Buteo rufinus* Cretzschmar, 1827), могильник (*Aquila heliaca* Savigny, 1809), орлан-белохвост (*Haliaeetus albicilla* Linnaeus, 1758), занесенные в Красную книгу РФ (Красная книга Российской Федерации, 2021).

Все описанные выше минусы можно свести к минимуму при правильном выборе территорий под строительство ВЭС. Необходимо проведение тщательной экологической экспертизы, обоснованной учеными-экспертами в данной области. При этом для минимизации широко обсуждаемого воздействия на птиц, необходимо:

- исключение наличия заповедников и других природоохранных зон на территории воздействия будущей ВЭС;
- выявление и описание всех видов уязвимых птиц, обитающих в районе строительства и воздействия ВЭС, установка их охранного статуса;
- описание миграционных путей птиц на территории воздействия планируемой ВЭС;

- указание возможных мест размножения птиц;
- изучение уровней лётной активности и поведения птиц в полёте для оценки рисков столкновения с ветроустановками.

Интересно, что по данным М. А. Королькова и О. В. Бородина (2019), которые одними из первых в России провели эколого-орнитологический мониторинг на территории ВЭС мегаваттного класса вблизи г. Ульяновска, данная ВЭС не представляет серьёзной опасности для птиц.

Развитие солнечной энергетики в Саратовской области

Среднегодовая продолжительность инсоляции для Саратовской области составляет 2100 – 2400 ч. Средняя продолжительность светового дня от 8 ч в декабре (34%) до 16 ч в июне (67%), с продолжительностью светлого времени суток от 252 до 489 ч/месяц (Тимофеев, Тимофеев, 2018). Солнечное излучение в южных районах области достигает в среднем $742 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, в центральных районах эти значения составляют около $560 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, а в северных районах среднее значение солнечной инсоляции составляет $430 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (Бакиров и др., 2020). Таким образом, территория Саратовской области имеет высокий потенциал для использования солнечной энергии в своем энергетическом комплексе.

В Саратовском регионе имеются примеры практического применения солнечной энергии. Санаторно-гостиничный комплекс «Изумруд» в Балакове Саратовской области стал первым экспериментальным объектом нового проекта по использованию возобновляемых источников энергии компании «ФосАгро». На крыше лечебного комплекса существует собственная солнечная электростанция (СЭС). Установленные панели могут дать комплексу порядка $25 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ электроэнергии, что почти полностью удовлетворяет потребности заведения в электроэнергии (ФосАгро запустила проект..., 2020).

В 2017 г. в Саратовской области были построены 2 солнечные электростанции: Пугачевская СЭС (15 МВт) (первая, введенная в эксплуатацию СЭС в области) и СЭС в с. Орлов-Гай, Ершовский район (первая очередь Орловгайской СЭС (5 МВт)). В 2018 г. в Новоузенском районе введена СЭС (15 МВт) на гетероструктурных модулях. Эта технология до 15% увеличивает выработку электроэнергии, снижает затраты на строительство СЭС, благодаря более высокому КПД монтируется меньше количество модулей. КПД такой солнечной ячейки превышает 23%, это один из высочайших мировых показателей серийного производства таких модулей. Введение в эксплуатацию этой СЭС позволило сократить выбросы углекислого газа более чем на 18 тыс. т. В 2018 г. построена вторая очередь Орловгайской СЭС (10 МВт) (Новоузенская солнечная электростанция..., 2020). В 2020 г. введена четвертая солнечная электростанция в Саратовской области – первая очередь Дергачевской СЭС, мощностью 25 МВт. В июне 2022 г. группы компаний «Хевел» достроила её вторую и третью очереди, общая мощность которых составила 35 МВт (Дергачевская СЭС – завершено, 2022). Сейчас в Саратовской области действуют четыре СЭС под управлением группы компаний «Хевел», а общая мощность солнечной генерации в регионе составляет около 100 МВт.

Потенциальным районом для размещения СЭС в Саратовской области является Алтайский район, где зимой значения суммарной солнечной радиации обычно не ниже 30 Вт/м², а летом достигают 320 Вт/м², среднегодовые значения на этой территории достигают 170 Вт/м² (Нейштадт, Червяков, 2022).

Плюсы и минусы солнечной энергетики. Воздействие на окружающую природную среду от солнечных электростанций наиболее полно рассмотрено в работе Turney, Fthenakis (2011). В этом исследовании говорится том, что основное воздействие СЭС связано с тем, что солнечные электростанции обычно занимают огромные площади и имеют ограждение заборами, в результате чего может быть сильно ограничено передвижение животных. В целом среда обитания на территориях постройки СЭС сильно изменяется. Почвы перед установкой фотоэлектрических элементов обрабатывают большим количеством гербицидов, а если растительность и оставляют, то постоянно скашивают ее до необходимых размеров, в результате этих действий существенное влияние будет оказано на насекомых и других животных и птиц, связанных с этим местообитанием. От воздействия солнечной радиации, по данным, приведенным в статье (Turney, Fthenakis, 2011), погибнуть могут и птицы, и летучие мыши, и насекомые. Мониторинговых исследований, посвященных вопросу влияния СЭС на окружающую природную среду, все еще недостаточно для полноценного понимания долгосрочного воздействия СЭС на экосистемы.

Из основных плюсов использования солнечной энергии можно выделить ее экологическую чистоту и неиссякаемость как источника электроэнергии.

Однако и недостатками все же нельзя пренебречь:

- фотоэлементы для преобразования солнечной радиации в электроэнергию постоянного тока все еще имеют высокую стоимость;
- требуется применение специальных инверторов, преобразующих электроэнергию постоянного тока в электроэнергию переменного тока;
- аккумуляторы, которые используются для накопления энергии, также имеют высокую стоимость производства, и что еще хуже, после выработки своего потенциала они должны быть экологично утилизированы, что повышает стоимость СЭС;
- во время производства солнечных элементов и фотоэлектрических установок потребляется значительное количество энергии и ценных ресурсов, образуются выбросы CO₂ и других загрязняющих веществ.

Таким образом, на данный момент стоимость солнечной электроэнергии все еще намного выше электроэнергии, вырабатываемой от традиционных источников электроэнергии (Елоева, Есенов, 2014).

Развитие биоэнергетики в Саратовской области

Дефицит энергоносителей и проблемы охраны окружающей среды обусловили формирование нового научно-технического направления – биоэнергетики – это получение энергии из биомассы. Как наука, она изучает процессы превращения органических веществ в энергию живыми организмами.

В рамках положений федеральной «Комплексной программы развития биотехнологий в России на период до 2020 года» на территории Саратовской области будет введен в эксплуатацию комплекс глубокой переработки зерна для производства аминокислот. Возводится он на площади в 50 га в Балашовском районе, на территории Хоперского округа. Реализует проект ООО «Саратовские Биотехнологии». Саратовская область выбрана под этот проект, так как является крупным производителем пшеницы в Российской Федерации. Производство будет включать 4 завода: крахмальный завод, завод по производству глюкозы, завод по производству хлорида лизина и завод по производству биоэтанола (Отраслевой обзор, 2020).

В Саратовском государственном аграрном университете (СГАУ) разработали и исследовали инновационную технологию возделывания семян сафлора для производства биотоплива. По мнению авторов (Shyurova et al., 2020), в засушливых условиях Саратовской области только сафлор (*Carthamus tinctorius* Linneaus, 1753) может стабильно поставлять высококачественное маслосодержащее сырье для производства биодизеля, а биотопливо, полученное при смешении дизельного топлива с сафлоровым маслом, экономически целесообразно.

Сельское хозяйство Саратовской области вырабатывает большое количество органических отходов, например, лузга подсолнечника, остающаяся после производства растительного масла. Леса Саратовской области являются источником старой древесины, на остальной территории образуется много соломы, тростника, рогоза и камыша, а также другой растительной биомассы для производства биотоплива – топливных гранул (пеллет) (Шкодина, 2019; Доклад о состоянии..., 2022). Органические отходы складываются на полигонах и являются дополнительным источником эмиссий парниковых газов. К сожалению, получение энергии из биомассы слабо развито в Саратовской области, хотя это направление бурно развивается в РФ и мире.

Для минимизации антропогенного воздействия на атмосферный воздух и получения биоэнергии в Саратовской области нами предлагается:

- применять дегазацию уже существующих полигонов и использовать полученный биогаз для выработки энергии;
- органические промышленные и сельскохозяйственные отходы подвергать переработке в анаэробных условиях в метантенках с получением гумуса и биогаза;
- внедрить селективный сбор ТКО, и органические отходы подвергать переработке в анаэробных условиях в метантенках с получением гумуса и биогаза.

Плюсы и минусы биоэнергетики. Современная биоэнергетика является крупнейшим источником возобновляемой энергии в мире, на ее долю приходится 55% возобновляемой энергии и более 6% мирового энергоснабжения. Ее использование увеличивалось в среднем на 7% в год в период с 2010 по 2021 г. и имеет тенденцию к росту. Согласно сценарию нулевого выброса CO₂ биомасса в сельской местности будет использоваться биогазовыми реакторами для получения биоэнергии. В 2030 г. 60% поставок биоэнергии будет поступать из отходов, не требующих землепользования (IEA, 2022).

Преимущества биоэнергии:

- биоэнергия относится к возобновляемым источникам энергии;
- получение энергии из биомассы меньше загрязняет окружающую среду, чем сжигание ископаемого топлива, поэтому её использование снижает выбросы углекислого газа и оказывает меньшее воздействие на озоновый слой;
- биомасса дешевле и множество ее видов существует повсеместно;
- энергия биомассы открывает новые возможности для сельскохозяйственного сектора, поскольку энергетические культуры заменяют те, которые были заброшены или больше не используются для их первоначальной деятельности, тем самым предотвращая эрозию и деградацию почвы;
- практически не производит выбросов твердых частиц или загрязняющих веществ, таких как азот или сера;
- использование этой энергии снижает зависимость от ископаемого топлива;
- использование органических отходов от других видов деятельности способствует их переработке и сокращению.

Минусы бионергетики:

- биомасса может содержать много влаги, которую необходимо высушить перед сжиганием, что означает более высокое энергопотребление;
- для производства такого же количества энергии требуется больше биотоплива, чем ископаемого топлива, поэтому для его хранения требуется больше места;
- мы имеем дело с недавно появившимся ресурсом, который передовые технологии не могут эффективно использовать, как в случае с жидким и твердым топливом;
- если при сжигании биомассы образуются токсичные вещества, сжигание должно быть замещено пиролизом и происходить при температуре выше 900°C.

Одним из минусов биоэнергетики является её потребность в постоянном обеспечении биоотходами, поэтому биотопливные производства должны иметь грамотное расположение по отношению к источникам биоотходов, которые смогут обеспечить достаточные объемы сырья, а транспортные пути для их транспортировки будут минимизированы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав большое количество научных исследований, других литературных источников и источников СМИ, авторы собрали и представили наиболее актуальные данные о развитии зеленой энергетики в Саратовской области, внося тем самым новый вклад в литературу по изучаемому вопросу.

На основе анализа использования альтернативной энергии в Саратовской области нами было показано, что на данной территории наиболее развито использование солнечной энергии. Это связано с климатическими условиями и количеством солнечных дней в регионе. Ввиду большого образования органических отходов в Саратовской области рационально использовать биомассу для получения биоэнергии. К сожалению, получение энергии из биомассы (биоэнергия) пока еще недостаточно развито в Саратовской области, хотя данное направление бурно развивается в РФ и мире.

Было выявлено, что правительство Саратовской области намерено и дальше увеличивать долю возобновляемых источников энергии в энергобалансе. По данным ассоциации развития возобновляемой энергетики, Саратовская область в результате увеличения доли ВИЭ в энергобалансе (после ввода 300 МВт мощности ВИЭ-генерации) способна снизить по 300 тыс. т выбросов углекислого газа в год (Саратовская область выбрала зеленый курс, 2022), что является большим шагом в переходе на зеленую энергетику. К 2035 г. доля ВИЭ в энергетическом балансе Саратовской области достигнет 6%, а в 2050 г. составит около 13%.

В России, с огромным количеством запасов традиционного энергетического сырья (газ и нефть), а также наличием огромных территорий в северной части континента, где очень низкие среднегодовые температуры, полный переход на альтернативную энергетику затруднен. По мнению авторов, глобальные перспективы зеленых энергетических переходов в России, как и в трансляции на Саратовскую область, заключаются в частичном переходе на альтернативную энергетику (солнце и ветер), с использованием биоэнергетики и высокоэффективных технологий очистки выбросов CO₂ при использовании традиционного топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бакиров С. М., Елисеев С. С., Гуринов И. А. Анализ факторов, влияющих на преобразование солнечной энергии в электрическую на территории Саратовской области // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы XI национальной научно-практической конференции с международным участием / под ред. В. А. Трушкина. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет, 2020. С. 8 – 11.

Берёзкин М. Ю., Борзенко В. И., Дегтярев К. С., Залиханов А. М., Замолотчиков Д. Г., Ларин Н. В., Лукашов А. А., Нефедова Л. В., Низматулин Р. И., Синюгин О. А., Соловьев Д. А., Стребков Д. С., Сывороткин В. Л., Фёдоров В. М. Источники энергии, климат и энергетический переход. М.: Энергия, 2023. 144 с. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7919418>

Богомоллов П. Л., Феоктистова. Н. Ю., Кропоткина М. В., Суров А. В. Использование интернет-ресурсов для оценки численности видов, контактирующих с человеком (на примере обыкновенного хомяка (*Cricetus cricetus*) (Cricetidae, Rodentia)) // Поволжский экологический журнал. 2021. № 4. С. 458 – 467. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-4-458-467>

Викторович Н. В., Седлиска К. Препятствия на пути развития ветроэнергетики. Мифы и реальная угроза // Вестник Брестского государственного технического университета. 2014. №. 2. С. 96 – 99.

Габитов И. А., Егоров В. В. Экологическая безопасность при использовании возобляемых источников энергии // Современные проблемы энергетики и пути их решения: материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2021. С. 93 – 97.

Говорушко С. М. Воздействие ветровых электростанций на окружающую среду // Альтернативная энергетика и экология. 2011. Вып. 4. С. 38 – 42.

Дергачевская СЭС – завершено. 2022. URL: <https://dzen.ru/a/Yu2awJdL3FtLv8UY> (дата обращения: 23.04.2023).

Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Саратовской области в 2021 году / Министерство природных ресурсов и экологии Саратовской области. Саратов, 2022. 250 с.

Елоева Р. К., Есенов И. Х. Перспективы использования альтернативных источников энергии в сельском хозяйстве // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51, № 3. С. 193 – 196.

Инвесторы вложили более 8 млрд рублей в проекты «зеленой» энергетики в Саратовской области // Информационное агентство ТАСС. 2023. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18001129> (дата обращения: 23.04.2023).

Интерес инвесторов к теме ВИЭ в России сохраняется // Ассоциация развития возобновляемой энергетики. М., 2022. URL: <https://ireda.ru/information-bulletin-july2022> (дата обращения: 03.03.2023).

Кадырмятов Ю. Р., Филиппова Ф. М. Воздействие ветряных электрических станций на экологию // Экологическая безопасность в техносферном пространстве: сборник материалов Пятой международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов. Екатеринбург: РГППУ, 2022. С. 187 – 189.

Корольков М. А., Бородин О. В. Первый российский опыт орнитологического мониторинга на территории современной ветроэнергетической станции мегаваттного класса // Бутурлинский сборник: материалы VI международных Бутурлинских чтений. Ижевск: ООО «Принт», 2019. С. 167 – 179.

Красная книга Российской Федерации. Животные. 2-е издание. М.: ВНИИ Экология, 2021. 1128 с.

Мамаев А. Б., Опарин М. Л., Опарина О. С. Особенности динамики численности жаворонков (*Alaudidae*, Aves) в полупустынной зоне саратовского Заволжья // Поволжский экологический журнал. 2022. № 3. С. 307 – 321. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-307-321>

Нейштадт Я. А., Червяков М. Ю. Спутниковый мониторинг потоков солнечной энергии для целей развития гелиоэнергетики в Саратовской области // Фундаментальные и прикладные космические исследования: материалы XIX конференции молодых учёных. М.: Институт космических исследований РАН, 2022. С. 84 – 91. <https://doi.org/10.21046/KMU-2022-84-91>

Новоузенская солнечная электростанция. Первая СЭС на гетероструктурных модулях в Саратовской области // XEBEJL. СПб., 2020. URL: <https://spb.hevelsolar.com/projects/povouzenskaya-solnechnaya-elektrostantsiya/> (дата обращения: 11.05.2023).

Опарин М. Л., Мамаев А. Б., Опарина О. С., Трофимова Л. С. Анализ многолетней динамики численности жаворонков (*Alaudidae*, Aves) в полупустыне на северо-западе Прикаспийской низменности // Поволжский экологический журнал. 2021. № 2. С. 230 – 245. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-230-245>

Опарина О. С., Опарин М. Л., Кудрявцев А. Ю., Опарина А. М. Характеристика местобитаний дрофы (*Otis tarda*) (*Otididae*, Aves) в Заволжье по доступности кормовой базы в период выкармливания птенцов // поволжский экологический журнал. 2022. № 1. С. 34 – 54. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-1-34-54>

Отраслевой обзор. 370 крупнейших инвестиционных проектов строительства агрокомплексов и пищевых производств РФ. Проекты 2020 – 2023 годов. СПб.: INFOnline, 2020. 26 с. URL: <https://infonline.spb.ru/upload/iblock/0e0/0e0b98b2f7b140edaf60f1636df390a9.pdf> (дата обращения: 03.05.2023).

Перес-Гарсиа Д. М., Каррет М., Аррондо Е., Кортес-Ависанда А., Де Ла Рива М., Санчес-Саната Д. Л., Донасар Д. Л. Использование инновационных методов телеметрии для оценки влияния ветро-электростанций на природу // Пернатые хищники и их охрана. 2018. Спец. вып. 1. С. 192 – 194.

Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. N 449. «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». URL: <https://base.garant.ru/70388616/> (дата обращения 23.04.2023).

Саратовская область выбрала зеленый курс // Ассоциация развития возобновляемой энергетики. М., 2022. URL: <https://ireda.ru/novosti/tpost/goiobrmpy1-saratovskaya-oblast-vibrala-zelenii-kurs> (дата обращения: 03.05.2023).

Соколов А. А., Руднева О. С. Перспективы развития альтернативной энергетики в регионах степной зоны России // Вестник Челябинского государственного университета. 2020. № 6. С. 49 – 55. <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2020-10606>

Схема территориального планирования Российской Федерации в области энергетики (утв. распоряжением Правительства РФ от 1 августа 2016 г. N 1634-р). 2016. URL: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения 05.05.2023).

Тимофеев М. Н., Тимофеев А. Н. Использование системного подхода для выбора структуры гибридной электростанции на примере Саратовской области // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2018. Т. 7, №. 4. С. 61 – 66.

ФосАгро запустила проект по использованию возобновляемых источников энергии на производственных и социальных объектах // ФосАгро. М., 2020. URL: <https://www.phosagro.ru/press/industry/fosagro-zapustila-proekt-po-ispolzovaniyu-vozobnovlyaemykh-istochnikov-energii-na-proizvodstvennykh-/> (дата обращения: 03.03.2023).

Хулка С., МакЛауд Д., Ларсен Дж. К. Метод оценки риска столкновения орлана-белохвоста с использованием лазерного дальномера // Пернатые хищники и их охрана. 2013. № 27. С. 248 – 252.

Шкодина О. Н. Экологическое состояние Саратовской области // Актуальные проблемы природопользования и природообустройства: сборник статей II международной научно-практической конференции. Пенза: ПГАУ, 2019. С. 283 – 286.

Alves D. P., Bobba S., Carrara S., Plazzotta B. The Role of Rare Earth Elements in Wind Energy and Electric Mobility. Luxembourg: European Union, 2020. 43 p. <https://doi.org/10.2760/303258>

Cooper L. M., Sheate W. R. Cumulative effects assessment: A review of UK environmental impact statements // Environmental Impact Assessment Review. 2002. Vol. 22, iss. 4. P. 415 – 439. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(02)00010-0)

Douglas D. J. T., Waldinger J., Buckmire Z., Gibb K., Medina J. P., Sutcliffe L., Beckmann C., Collar N. J., Jansen R., Kamp J., Little I., Sheldon R., Yanosky A., Koper N. A global review identifies agriculture as the main threat to declining grassland birds // Ibis. 2023. Vol. 163. <https://doi.org/10.1111/ibi.13223>

Gielen D., Lyons M. Critical Materials for the Energy Transition: Rare Earth Elements. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022. 46 p.

IEA. (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector IEA. Paris, 2021. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (accessed March 3, 2023).

IEA. (2022). Bioenergy. Paris, 2022. Available at: <https://www.iea.org/reports/bioenergy> (accessed March 3, 2023).

Khalid M. Y., Arif Z. U., Hossain M., Umer R. Recycling of wind turbine blade through modern recycling technologies: Road to zero waste // Renewable Energy Focus. 2023. Vol. 44. P. 373 – 389. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.02.001>

Liu P., Meng F., Barlow C. Y. Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison // Resources, Conservation and Recycling. 2022. Vol. 180. Article number 106202. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106202>

Miller T. A., Brooks R. P., Lanzone M., Brandes D., Cooper J., O'Malley K., Maisonneuve C., Tremblay J., Duerr A., Katzner T. Assessing risk to birds from industrial wind energy development via paired resource selection models // Conservation Biology. 2014. Vol. 28, iss. 3. P. 745 – 755. <https://doi.org/10.1111/cobi.12227>

Morinha F., Travassos P., Seixas F., Martins A., Bastos R., Carvalho D., Magalhaes P., Santos M., Bastos E., Cabral J. Differential mortality of birds killed at wind farms in Northern Portugal // Bird Study. 2014. Vol. 61, iss. 2. P. 255 – 259. <https://doi.org/10.1080/00063657.2014.883357>

Nevzorova T., Kutcherov V. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review // *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 26. Article number 100414. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>

Pearce-Higgins J. W., Stephen L., Langston R. H. W., Bainbridge I. P., Bullman. R. The distribution of breeding birds around upland wind farms // *Journal of Applied Ecology*. 2009. Vol. 46, iss. 6. P. 1323 – 1331. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01715.x>

REN21. Renewables 2022 global status report. 2022. Available at: <https://www.ren21.net/gsr-2022/> (accessed March 3, 2023).

Saidur R., Rahim N. A., Islam M. R., Solangi K. H. Environmental impact of wind energy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, iss. 5. P. 2423 – 2430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>

Shyurova N. A., Dubrovin V. V., Narushev V. B., Kozhevnikov A. A., Milovanov I. V. Biofuel as an alternative energy source for the automobile industry: The experience of the Lower Volga Region (Russia) // *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21, iss. 6. P. 29 – 35. <https://doi.org/10.12911/22998993/123164>

Turney D., Fthenakis V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, iss. 6. P. 3261 – 3270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>

Global perspectives of transition to green energy generation in the Saratov region

A. M. Oparina , N. A. Politaeva, I. V. Illin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg 195251, Russia

Received: May 19, 2023 / revised: June 22, 2023 / accepted: June 24, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. The article discusses global prospects for the transition to green energy generation in the Saratov region. The literature data on the current situation in the alternative energy sector (wind energy, solar energy, and bioenergy) in the Saratov region have been studied and systematized. The data were obtained from the most relevant and cited publications in the world databases Scopus, Google Scholar, RSCI and among Internet media articles. The pros and cons are described, as well as the overall impact on the environment of each type of renewable energy that exists in the Saratov region. Much attention is paid to the impact of wind turbines and solar power plants on the environment. It has been established that the use of solar energy is most developed in this area. This is due to climatic conditions and the number of sunny days in the region. In view of the large formation of organic waste in the Saratov region, it is rational to use biomass to obtain bioenergy. The Saratov region government intends to continue to steadily increase the share of renewable energy sources in the energy balance of the region. By 2035, the share of renewable energy sources in the regional energy balance will reach 6%, and in 2050 it will be about 13%. We believe that the global prospects for green energy transitions in the Russian Federation, as well as in the transmission to the Saratov region, consist in a partial transition to alternative energy (solar and wind), using bioenergy and highly efficient technologies for cleaning CO₂ emissions from traditional fuel.

Keywords: alternative energy generation, bioenergy, wind energy, solar energy, energy transition, impact of wind power plants, impact of solar power plants, Saratov region

Funding. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2022-1136 dated 01.07.2022).

For citation: Oparina A. M., Politaeva N. A., Illin I. V. Global perspectives of transition to green energy generation in the Saratov region. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 314–330 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-314-330>

REFERENCES

Bakirov S. M., Eliseev S. S., Gurinov I. A. Analysis of factors affecting the conversion of solar energy into electrical energy in the Saratov region. *Aktual'nye problemy energetiki APK: materialy XI natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Pod red. V. A. Trushkina [V. A. Trushkin, ed. Actual Problems of Energy of Agroindustrial Complex: Pro-

 *Corresponding author.* Higher School of Hydraulic and Power Engineering Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Anna M. Oparina: <https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>, annaoparina93@gmail.com; Natalia A. Politaeva: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>, politaevana1971@gmail.com; Igor V. Illin: <https://orcid.org/0000-0002-1834-4894>, igor.illin@spbstu.ru.

ceedings of the XI National Scientific-Practical Conference With International Participation]. Saratov, Saratov State Agrarian University Publ., 2020, pp. 8–11 (in Russian).

Berezkin M. Yu., Borzenko V. I., Degtyarev K. S., Zalikhanov A. M., Zamolodchikov D. G., Larin N. V., Lukashov A. A., Nefedova L. V., Nigmatulin R. I., Sinyugin O. A., Solovyev D. A., Strebkov D. S., Syvorotkin V. L., Fedorov V. M. *Energy Sources, Climate and Energy Transition*. Moscow, Publishing house “Energy”, 2023. 144 p. (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7919418>

Bogomolov P. L., Feoktistova N. Yu., Kropotkina M. V., Surov A. V. Use of Internet resources to estimate the abundance of species contacting with humans (with an example of the common hamster (*Cricetus cricetus* L., 1758) (Cricetidae, Rodentia)). *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 4, pp. 458–467 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-4-458-467>

Viktorovich N.V., Sedliska K. Barriers on the way of development of wind power. Myths and real threat. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2014, no. 2, pp. 96–99 (in Russian).

Gabitov I. A., Egorov V. V. Environmental safety in the use of renewable energy sources. *Sovremennye problemy energetiki i puti ikh resheniia: materialy VI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern Energy Problems and Ways of Their Solution: Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference]. Makhachkala, Dagestan State Technical University Publ., 2021, pp. 93–97 (in Russian).

Govorushko S. M. Wind power stations impact on the environment. *Alternative Energy and Ecology*, 2011, iss. 4, pp. 38–42 (in Russian).

Dergachev solar power plant – completed. 2022. Available at: <https://dzen.ru/a/Yu2awJdL3FtLv8UY> (accessed April 23, 2023) (in Russian).

Doklad o sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei sredy Saratovskoi oblasti v 2021 godu [Report on the State and Environmental Protection of the Saratov Region in 2021]. Saratov, Ministry of Natural Resources and Environment of the Saratov region Publ., 2022. 250 p. (in Russian).

Eloeva R. K., Essenov I. Kh. Perspectives of energy alternative sources use in agriculture. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*, 2014, vol. 51, no. 3, pp. 193–196 (in Russian).

Investors have invested more than 8 billion rubles in green energy projects in the Saratov Region. *TASS News Agency*, 2023. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/18001129> (accessed April 23, 2023).

Investor interest in RES in Russia remains. *Russia Renewable Energy Development Association*. Moscow, 2022. Available at: <https://rreda.ru/information-bulletin-july2022> (accessed March 3, 2023).

Kadymyatov Y. R., Philippova F. M. The impact of wind power plants on the environment. *Ecological Safety in Technosphere Space: Collection of Materials of the Fifth International Scientific and Practical Conference of teachers, young scientists and students*. Ekaterinburg, Russian State Professional and Pedagogical University Publ., 2022, pp. 187–189 (in Russian).

Korolkov M. A., Borodin O. V. The first Russian experience in ornithological monitoring on the territory of a modern megawattclass wind power station. *Buturlinskii sbornik: Materials of the VI International Buturlin Readings*. Izhevsk, Print LLC, 2019, pp. 167–179 (in Russian).

Red Data Book of the Russian Federation. Animals. 2nd edition. Moscow, VNI Ecology Publ., 2021. 1128 p. (in Russian).

Mamaev A. B., Oparin M. L., Oparina O. S. Features of the population dynamics of larks (Alaudidae, Aves) in the semi-desert zone of the Saratov Trans-Volga region. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 3, pp. 307–321 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-307-321>

Neyshtadt Y. A., Chervyakov M. Yu. Satellite monitoring of solar radiation flux for the development of solar energy in the Saratov region. *Fundamental and Applied Space Researches: Proceedings of the XIX Young Scientists Conference*. Moscow, Space Research Institute of the

Russian Academy of Sciences Publ., 2022, pp. 84–91 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/KMU-2022-84-91>

Novouzen solar power plant. The first SES on heterostructure modules in the Saratov region. *HEVEL*. Saint Petersburg, 2020. Available at: <https://spb.hevelsolar.com/projects/novouzenskaya-solnechnaya-elektrostantsiya/> (accessed May 11, 2023).

Oparin M. L., Mamaev A. B., Oparina O. S., Trofimova L. S. Analysis of the long-term lark population dynamics (Alaudidae, Aves) in the semi-desert in the Northwestern Caspian lowland. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 2, pp. 230–245 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-2-230-245>

Oparina O. S., Oparin M. L., Kudryavtsev A. Yu., Oparina A. M. Characteristics of the great bustard (*Otis tarda*) (Otididae, Aves) habitats in the Trans-Volga region according to food availability during the chick rearing period. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 1, pp. 34–54 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-1-34-54>

Otraslevoi obzor. 370 krupneishikh investitsionnykh projektov stroitel'stva agrokompleksov i pishchevykh proizvodstv RF. Proekty 2020 – 2023 godov [Industry Overview. 370 Largest Investment Projects for the Construction of Agro-complexes and Food Production Facilities in the Russian Federation. Projects of 2020–2023]. Saint Petersburg, INFOnline, 2020. 26 p. Available at: <https://infoline.spb.ru/upload/iblock/0e0/0e0b98b2f7b140edaf60f1636df390a9.pdf> (accessed May 3, 2023) (in Russian).

Pérez-García J. M., Carrete M., Arrondo E., Cortés-Avizanda A., de la Riva M., Sánchez-Zapata J. A., Donázar J. A. Use of innovative telemetry methods to assess interactions between wind farms and wildlife. *Raptors Conservation*, 2018, suppl. 1, pp. 192–194 (in Russian).

Resolution of the Government of the Russian Federation dated May 28, 2013, N 449. “On the Mechanism for Stimulating the Use of Renewable Energy Sources in the Wholesale Electricity and Capacity Market”. Available at: <https://base.garant.ru/70388616/> (accessed April 23, 2023) (in Russian).

Saratov region has chosen a green course. *Russia Renewable Energy Development Association*. Moscow, 2022. Available at: <https://rreda.ru/novosti/tpost/goiobrmyp1-saratovskaya-oblast-vibrala-zelenii-kurs> (accessed May 3, 2023).

Sokolov A. A., Rudneva O. S. Prospects of alternative energy development in the regions of the Russian steppe zone. *Bulletin of Chelyabinsk State University*, 2020, no. 6, pp. 49–55 (in Russian). <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2020-10606>

Scheme of Territorial Planning of the Russian Federation in the Field of Energy (Approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated August 1, 2016 N 1634-r). 2016. Available at: <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm> (accessed May 5, 2023) (in Russian).

Timofeev M. N., Timofeev A. N. Using a system approach to select a structure of a hybrid electric power station on the example of the Saratov region. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 61–66 (in Russian).

PhosAgro launches a project to use renewable energy sources at production and social facilities. *PhosAgro*. Moscow, 2020. Available at: <https://www.phosagro.ru/press/industry/fosagro-zapustila-proekt-po-ispolzovaniyu-vozobnovlyaemykh-istochnikov-energii-na-proizvodstvennykh/> (accessed March 3, 2023) (in Russian).

Hulka S., Mcleod D., Larsen J. K. Assessing collision risk in White-Tailed Eagles using laser range-finder technology. *Raptors Conservation*, 2013, no. 27, pp. 248–252 (in Russian).

Shkodina O. N. Environmental condition of the Saratov region. *Aktual'nye problemy prirodopol'zovaniia i prirodoobustroistva: sbornik statei II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual Problems of Nature Management and Environmental Management: Collection of Articles of the II International Scientific-Practical Conference]. Penza, Penza State Agrarian University Publ., 2019, pp. 283–286 (in Russian).

Alves D. P., Bobba S., Carrara S., Plazzotta B. *The Role of Rare Earth Elements in Wind Energy and Electric Mobility*. Luxembourg, European Union, 2020. 43 p. <https://doi.org/10.2760/303258>

Cooper L. M., Sheate W. R. Cumulative effects assessment: A review of UK environmental impact statements. *Environmental Impact Assessment Review*, 2002, vol. 22, iss. 4, pp. 415–439. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(02)00010-0)

Douglas D. J. T., Waldinger J., Buckmire Z., Gibb K., Medina J. P., Sutcliffe L., Beckmann C., Collar N. J., Jansen R., Kamp J., Little I., Sheldon R., Yanosky A., Koper N. A global review identifies agriculture as the main threat to declining grassland birds. *Ibis*, 2023, vol. 163. <https://doi.org/10.1111/ibi.13223>

Gielen D., Lyons M. *Critical Materials for the Energy Transition: Rare Earth Elements*. Abu Dhabi, International Renewable Energy Agency, 2022. 46 p.

IEA. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector* IEA. Paris, 2021. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (accessed March 3, 2023).

IEA. (2022). *Bioenergy*. Paris, 2022. Available at: <https://www.iea.org/reports/bioenergy> (accessed March 3, 2023).

Khalid M. Y., Arif Z. U., Hossain M., Umer R. Recycling of wind turbine blade through modern recycling technologies: Road to zero waste. *Renewable Energy Focus*, 2023, vol. 44, pp. 373–389. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.02.001>

Liu P., Meng F., Barlow C. Y. Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 180, article number 106202. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106202>

Miller T. A., Brooks R. P., Lanzone M., Brandes D., Cooper J., O'Malley K., Maisonneuve C., Tremblay J., Duerr A., Katzner T. Assessing risk to birds from industrial wind energy development via paired resource selection models. *Conservation Biology*, 2014, vol. 28, iss. 3, pp. 745–755. <https://doi.org/10.1111/cobi.12227>

Morinha F., Travassos P., Seixas F., Martins A., Bastos R., Carvalho D., Magalhaes P., Santos M., Bastos E., Cabral J. Differential mortality of birds killed at wind farms in Northern Portugal. *Bird Study*, 2014, vol. 61, iss. 2, pp. 255–259. <https://doi.org/10.1080/00063657.2014.883357>

Nevzorova T., Kutcherov V. Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, article number 100414. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>

Pearce-Higgins J. W., Stephen L., Langston R. H. W., Bainbridge I. P., Bullman. R. The distribution of breeding birds around upland wind farms. *Journal of Applied Ecology*, 2009, vol. 46, iss. 6, pp. 1323–1331. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01715.x>

REN21. *Renewables 2022 global status report*. 2022. Available at: <https://www.ren21.net/gsr-2022/> (accessed March 3, 2023).

Saidur R., Rahim N. A., Islam M. R., Solangi K. H. Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, iss. 5, pp. 2423–2430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>

Shyurova N. A., Dubrovin V. V., Narushev V. B., Kozhevnikov A. A., Milovanov I. V. Biofuel as an alternative energy source for the automobile industry: The experience of the Lower Volga Region (Russia). *Journal of Ecological Engineering*, 2020, vol. 21, iss. 6, pp. 29–35. <https://doi.org/10.12911/22998993/123164>

Turney D., Fthenakis V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, iss. 6, pp. 3261–3270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>

Оригинальная статья

УДК 574.34:574.91:57.018

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-331-351>

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В ПОПУЛЯЦИЯХ ТАКСОНОВ *CHONDRILLA* (ASTERACEAE, MAGNOLIOPHYTA) В ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

А. С. Пархоменко , А. О. Кондратьева, А. В. Богослов,
И. В. Шилова, А. С. Кашин

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского*

Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Поступила в редакцию 29.04.2023 г., после доработки 14.06.2023 г., принята 14.06.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. Морфологическая изменчивость в популяциях таксонов *Chondrilla* слабо изучена и особенности её распределения, как пространственная, так и между таксонами, не очевидны. Представлены результаты сравнительного анализа характера этой изменчивости на примере 28 популяций восьми таксонов рода юго-востока Европейской России и Северо-Западного Казахстана. Проанализирована изменчивость восьми морфологических признаков, большая часть из которых до настоящего времени используется для определения видовой принадлежности растений. Показано, что уровень изменчивости этих признаков, четыре из которых являются таксономически значимыми, в один год мониторинга оказывается столь широким, что полностью перекрывает границы их изменчивости всех восточноевропейских таксонов. При этом популяции разных таксонов, произрастающие рядом в близких условиях окружающей среды, демонстрировали весьма сходный (в ряде случаев фактически одинаковый) диапазон морфологической изменчивости. Сделано заключение о том, что причинами этой очень динамичной и своеобразной изменчивости признаков, скорее всего, являются локальные условия произрастания популяций в конкретный год мониторинга. Сравнительный анализ межгодовой (2015, 2016 и 2022 гг.) изменчивости по этим количественным признакам в 14 популяциях пяти таксонов *Chondrilla* показал её существенную динамику и по годам. Методом неметрического многомерного шкалирования количественных морфометрических параметров показано, что градиент их изменчивости имеет место в направлении от условий минимального увлажнения и максимальной температуры к условиям максимальной влажности и минимальной температуры. При этом сочетания этих климатических факторов в конкретных местообитаниях популяций в большей мере сказываются на значениях морфологических параметров, чем их географические градиенты или таксономическая принадлежность.

Ключевые слова: *Chondrilla*, популяция, нумерический анализ, неметрическое многомерное шкалирование

 Для корреспонденции. Ботанический сад Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

ORCID и e-mail адреса: Пархоменко Алёна Сергеевна: <https://0000-0002-9948-7298>, parkhomenko_as@mail.ru; Кондратьева Анна Олеговна: <https://0000-0001-5000-8914>, porova.ao@mail.ru; Богослов Артём Валерьевич: <https://orcid.org/0000-0002-2248-1285>, dandelioncave@mail.ru; Шилова Ирина Васильевна: <https://0000-0002-9828-4229>, schiva1952@yandex.ru; Кашин Александр Степанович: <https://orcid.org/0000-0002-2342-2172>, kashinas2@yandex.ru.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-24-00340).

Для цитирования. Пархоменко А. С., Кондратьева А. О., Богослов А. В., Шилова И. В., Кашин А. С. Морфологическая изменчивость в популяциях таксонов *Chondrilla* (Asteraceae, Magnoliophyta) в Европейской России и на прилегающих территориях // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 331 – 351. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-331-351>

ВВЕДЕНИЕ

Изучение полиморфизма в роде *Chondrilla* L. (Asteraceae) актуально по целому ряду причин. Во-первых, представители рода – каучконосы, потенциально способные составить альтернативу гевее бразильской *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg., как основному источнику натурального каучука. Интерес к этой проблеме в последнее время резко возрос в связи с тем, что натуральный каучук имеет ряд преимуществ перед синтетическим, а плантации гевеи бразильской находятся в катастрофическом положении из-за поражения фитопатогеном *Microcyclus ulei*. К тому же она может произрастать только в тропическом поясе, т.е. за пределами Российской Федерации. В 20 – 30-х гг. XX в. ряд видов *Chondrilla*, наряду с представителями *Taraxacum* и ряда других родов Asteraceae, рассматривались в качестве перспективных для промышленного производства каучуконов (Ильин, 1930, 1953; Лапин, 1935; Кулуев и др., 2015). Во-вторых, по крайней мере, один вид *Chondrilla juncea* L. показал себя крайне агрессивным адвентом. В последнее столетие он широко расселился в Австралии, Южной (Аргентина) и Северной (Канада и США) Америке, где в настоящее время наносит существенный урон урожаю на полях и пастбищах, демонстрируя чрезвычайно высокий инвазионный потенциал (Dijk van, 2003; Gaskin et al., 2013). К расширению ареала на центральную и юго-восточную части Европейской России в настоящее время тяготеет и *C. laticoronata* Leonova, относящийся по представлениям Т. Г. Леоновой (1964) к другой, чем *C. juncea*, секции рода. Он отмечен для Чувашии (Маевский, 2014). Имеются гербарные сборы (MW) в черте г. Волгограда и г. Астрахани (Сухоруков, личное сообщение). Нами многократно отмечался в различных районах Астраханской области и Ставропольского края. При этом ранее *C. laticoronata* для этих районов не был указан (Леонова, 1989). В этой связи актуально изучение инвазионного потенциала различных таксонов рода с целью предотвращения их расселения на новые территории. В-третьих, основная масса таксонов рода *Chondrilla* – факультативные апомикты, а это всегда усложняет таксономическую структуру рода, прежде всего, за счёт полиплоидии, отдалённой гибридизации и способности сохранять в ряду поколений гибридную комбинацию (Кашин и др., 1999, 2000a, б; Кашин, 2000). Остаётся весьма неопределённой и запутанной генетическая природа апомиксиса, механизмы его детерминации и генетическая структура популяций. При этом виды рода *Chondrilla* плохо изучены, как считается, прежде всего, потому, что они поздно зацветают и плохо представлены в гербариях. В этой связи неоднократно указывалось на необходимость специального анализа изменчивости видов данного рода (Маевский, 2014).

В роде *Chondrilla* L. насчитывается около 30 видов (Ильин, 1930; Леонова, 1989). Считается, что в европейской части России естественно встречаются, по крайней мере, семь видов. Шесть из них принадлежат к секции *Chondrilla* подрода *Chondrilla* (*C. acantholepis* Boiss., *C. brevirostris* Fisch. et Mey, *C. canescens* Kat. et Kir., *C. graminea* Bieb., *C. juncea*, *C. latifolia* Bieb. и *C. laticoronata*) и один (*C. ambigua* Fisch.) – к подроду *Brachyrinchus* (Леонова, 1964). Для Нижнего Поволжья указывался также *C. pauciflora* Ledeb. (Леонова, 1989). Однако нами он на этой территории не был обнаружен.

В настоящее время нет однозначного представления о таксономической структуре рода. В частности, *C. juncea* и *C. graminea* одни авторы рассматривают как самостоятельные виды (Леонова, 1964, 1989; Маевский, 2014), другие объединяют в один вид *C. juncea*, включая также *C. latifolia*, *C. canescens* и *C. brevirostris* (Ильин, 1930; Еленевский и др., 2008; Flora..., 1976; Tuzlacı, 2006; Türkçe, 2007; Nasseh, Joharchi, 2008; Flann, 2011; Nasseh, 2010).

Ранее по результатам морфологического (Кашин и др., 2018) и молекулярно-генетического (Кашин и др., 2017; Kashin et al., 2019) анализов показано, что из таксонов, указанных для европейской части ареала, лишь *C. ambigua* хорошо обособлен морфологически и заслуживает признания в ранге вида. Менее очевидна видовая самостоятельность *C. brevirostris* и *C. laticoronata*. *C. juncea*, *C. latifolia*, *C. graminea*, *C. acantholepis* и *C. canescens* по морфологическим признакам, по ISSR маркерам и при таргетном секвенировании не разделяются и их следует считать синонимами *C. juncea*. Однако выявленная по результатам морфологического и молекулярно-генетического анализа структура рода в пределах Европейской России требует дальнейшего уточнения, в частности в отношении таксономической состоятельности *C. brevirostris* и *C. laticoronata* и возможных причин своеобразной морфологической изменчивости.

Основная цель данного исследования – выявление особенностей распределения морфологической изменчивости на уровне популяций, таксонов и всей исследованной выборки образцов в целом в пределах Европейской России и Северо-Западного Казахстана.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор материала проводился в 2022 г. в 28 популяциях восьми таксонов рода *Chondrilla* из Астраханской, Волгоградской, Ростовской, Саратовской областей, Республики Калмыкия и Северо-Западного Казахстана (рис. 1, табл. 1). По части из этих популяций для сравнительного анализа методами классической морфометрии использован материал, собранный в 2015 и 2016 гг.

Для оценки морфологической изменчивости на уровне популяций и таксонов, а также исследованной выборки таксонов в целом, в каждой популяции у 30 растений были измерены восемь количественных морфометрических параметров (рис. 2). Половина из них традиционно используется при определении видовой принадлежности растений. Представленный анализ, прежде всего, касается изменчивости именно таких морфологических признаков. Морфологические характеристики, с целью поддержания единообразия в оценке морфологических данных,

учитывались только у растений зрелого генеративного состояния (Sharma, Pandit, 2011).

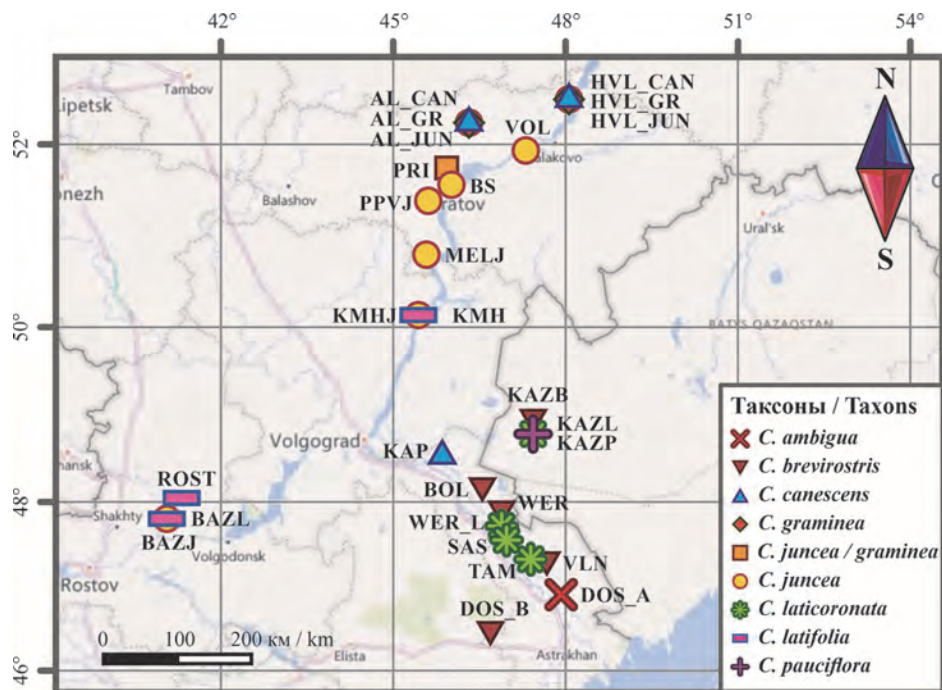


Рис. 1. Местоположение исследованных популяций таксонов *Chondrilla*. Условные сокращения см. табл. 1

Fig. 1. Location of the studied populations of *Chondrilla* taxa. Abbreviations are the same as in Table 1

Анализ изменчивости морфологических показателей, как внутри популяций и таксонов, так и между ними, проводили с использованием диаграмм размаха. Для проверки нормальности распределения значений признаков в популяционных выборках был проведен тест Шапиро – Уилка. С целью анализа многолетней динамики изменчивости морфометрических параметров исследуемых таксонов проведено сравнение выборок из 14 популяций пяти таксонов *Chondrilla* по наблюдениям в 2015, 2016 и 2022 гг. Анализ проводился по семи количественным показателям: длина ножек корзинок, число боковых побегов первого порядка, длина третьего снизу стеблевого листа, ширина третьего снизу стеблевого листа, густота щетинистого покрова стебля на вертикальном отрезке 6 мм, длина щетинок, диаметр нижнего бокового побега у основания. Для более детальной демонстрации закономерностей изменчивости каждая годовая выборка анализировалась отдельно. Для данных целей использовался анализ главных компонент (Principal component analysis, PCA), успешно использованный ранее авторами для разделения естественных и реинтродукционных популяций *Trapa natans* L. (Пархоменко и др., 2022).

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В ПОПУЛЯЦИЯХ

Таблица 1. Исследованные популяции таксонов рода *Chondrilla*

Table 1. Studied populations of taxa from the genus *Chondrilla*

Таксон / Taxon	Обозначение / Name	Координаты / Coordinates		Местонахождение / Location
		Широта, °/ Latitude, °	Долгота, °/ Longitude, °	
1	2	3	4	5
Россия / Russia				
<i>C. ambigua</i>	DOS_A	46.909118	47.922671	Астраханская область, Красноярский район, окрестности пос. Досанг / Astrakhanskaya province, Krasnoyarskiy district, near the town of Dosang
<i>C. brevirostris</i>	BOL	47.989694	46.55075	Астраханская область, Ахтубинский район, окрестности с. Болхуны / Astrakhanskaya province, Akhtubinskiy district, near the village of Bolkhuny
	WER	47.718769	46.886275	Астраханская область, Ахтубинский район, окрестности пос. Верблюжий / Astrakhanskaya province, Akhtubinskiy district, near the town of Verbyuzhiy
	VLN	47.137073	47.67247	Астраханская область, Харабалинский район, окрестности с. Вольное / Astrakhanskaya province, Kharabalinskiy district, near the village of Vol'noe
	DOS_B	46.2898	46.6926	Республика Калмыкия, Яшкульский район, окрестности пос. Хулхута / Republic of Kalmykia, Yashkul'skiy district, near the town of Khulkhuta
<i>C. canescens</i>	HVL_CAN	52.478944	48.059056	Саратовская область, окрестности г. Хвалынска / Saratovskaya province, near the city of Khvalynsk
	AL_CAN	52.230361	46.318306	Саратовская область, Базарно-Карабулакский район, окрестности с. Алексеевка / Saratovskaya province, Bazarno-Karabulakskiy district, near the village of Alekseevka
	KAP	48.53619	45.85194	Астраханская область, Ахтубинский район, окрестности г. Капустин Яр / Astrakhanskaya province, Akhtubinskiy district, near the city of Kapustin Yar
<i>C. graminea</i>	HVL_GR	52.478944	48.059056	Саратовская область, окрестности г. Хвалынска / Saratovskaya province, near the city of Khvalynsk
	AL_GR	52.230361	46.318306	Саратовская область, Базарно-Карабулакский район, окрестности с. Алексеевка / Saratovskaya province, Bazarno-Karabulakskiy distr., near the village of Alekseevka
<i>C. juncea / graminea</i>	PRI	51.746472	45.929139	Саратовская область, Аткарский район, окрестности с. Приречное / Saratovskaya province, Atkarskiy district, near the village of Prirechnoe
<i>C. juncea</i>	BS	51.565806	46.011667	Саратовская область, г. Саратов, Ботанический сад Саратовского университета / Saratovskaya province, city of Saratov, Botanical Garden of Saratov State University
	VOL	51.934278	47.307167	Саратовская область, Марковский район, окрестности с. Волково / Saratovskaya province, Marksovskiy district, near the village of Volkovo
	HVL_JUN	52.478944	48.059056	Саратовская область, окрестности г. Хвалынска / Saratovskaya province, near the city of Khvalynsk
	AL	52.230361	46.318306	Саратовская область, Базарно-Карабулакский район, окрестности с. Алексеевка / Saratovskaya province, Bazarno-Karabulakskiy district, near the village of Alekseevka
	BAZJ	47.803538	41.057441	Ростовская область, Константиновский район, окрестности хут. Базки / Rostovskaya province, Konstantinovskiy district, near the village of Bazki
	KMHJ	50.134747	45.437472	Волгоградская область, окрестности г. Камышин / Volgogradskaya province, near the city of Kamyslin
	MELJ	50.803167	45.575639	Саратовская область, Красноармейский район, окрестности с. Меловое / Saratovskaya province, Красноarmeyskiy district, near the village of Melovoye
	PPVJ	51.391737	45.608944	Саратовская область, Саратовский район, окрестности с. Поповка / Saratovskaya province, Saratovskiy district, near the village of Popovka

Окончание табл. 1
Table 1. Continuation

1	2	3	4	5
<i>C. laticoronata</i>	WER_L	47.718769	46.886275	Астраханская область, Ахтубинский район, окрестности пос. Верблюжий / Astrakhanskaya province, Akhtubinskiy district, near the town of Verbylyuzhiy
	SAS	47.555917	46.969972	Астраханская область, Харабалинский район, окрестности с. Сасыколи / Astrakhanskaya province, Kharabalinskiy district, near the village of Sasykoli
	TAM	47.328861	47.39269	Астраханская область, Харабалинский район, окрестности с. Тамбовка / Astrakhanskaya province, Kharabalinskiy district, near the village of Tambovka
<i>C. latifolia</i>	BAZL	47.803538	41.057441	Ростовская область, Константиновский район, окрестности хут. Базки / Rostovskaya province, Konstantinovskiy district, near the village of Bazki
	ROST	48.045333	41.3151	Ростовская область, Тащинский район, окрестности хут. Верхнекольников / Rostovskaya province, Tatsinskiy district, near the village of Verkhnekol'tsov
	KMH	50.134747	45.437472	Волгоградская область, окрестности г. Камышин / Volgogradskaya province, near the city of Kamyshevo
Казахстан / Kazakhstan				
<i>C. brevirostris</i>	KAZB	48.784571	47.434652	Западно-Казахстанская область, Бокейординский район, окрестности с. Урда / West Kazakhstan region, Bokeyordinskiy district, near the village of Urda
<i>C. laticoronata</i>	KAZL	48.784571	47.434652	Западно-Казахстанская область, Бокейординский район, окрестности с. Урда / West Kazakhstan region, Bokeyordinskiy district, near the village of Urda
<i>C. pauciflora</i>	KAZP	48.784571	47.434652	Западно-Казахстанская область, Бокейординский район, окрестности с. Урда / West Kazakhstan region, Bokeyordinskiy district, near the village of Urda

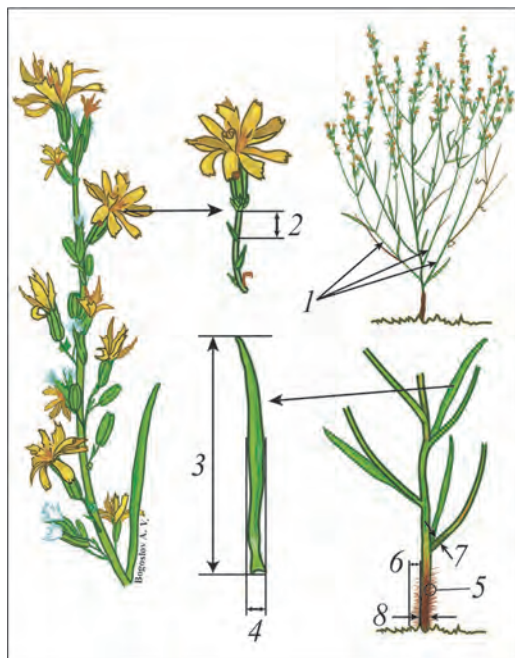


Рис. 2. Морфометрические признаки, измеряемые на растениях *Chondrilla*: 1 – количество боковых побегов первого порядка, шт.; 2 – длина ножек корзинок, мм; 3 – длина третьего снизу стеблевого листа, мм; 4 – ширина третьего снизу стеблевого листа, мм; 5 – густота щетинистого покрова стебля на вертикальном отрезке 6 мм, шт.; 6 – длина щетинок, мм.; 7 – диаметр нижнего бокового побега у основания, мм; 8 – диаметр основного стебля у его основания, мм

Fig. 2. Morphometric parameters measured on *Chondrilla* plants: 1 – number of lateral shoots of the first order, pcs.; 2 – length of the anthodium pedicel, mm; 3 – length of the third cauline leaf from the bottom, mm; 4 – width of the third cauline leaf from the bottom, mm; 5 – density of the bristly stem cover on the vertical segment of 6 mm, pcs.; 6 – length of bristles, mm; 7 – diameter of the lower lateral shoot at the base, mm; 8 – diameter of the main stem at its base, mm

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В ПОПУЛЯЦИЯХ

Дополнительно была визуализирована взаимосвязь наблюдаемого паттерна морфологической изменчивости с наиболее биологически значимыми климатическими и топографическими факторами окружающей среды. Для этого был применен метод неметрического многомерного шкалирования (NMDS), реализованный в пакете *vegan* (Oksanen et al., 2020). Данный анализ проводился на выборке данных за 2022 г., так как она содержала наибольшее количество исследованных таксонов. Для каждой популяции *Chondrilla* были получены данные с пространственным разрешением 0.5 минуты (1 км) из открытой базы WorldClim ver. 2.0 (Fick, Hijmans, 2017), содержащие значения 19 биоклиматических характеристик и высоты над уровнем моря (табл. 2). Кроме того, учитывались значения географической широты и долготы мест произрастания популяций. Полученные параметры использовались в качестве переменных окружающей среды.

Таблица 2. Переменные окружающей среды, используемые в дополнении к анализу морфологической изменчивости методом NMDS

Table 2. Environmental variables used in addition to the NMDS analysis of morphological variability

Переменная / Variable	Условное обозначение / Symbol	Единицы измерения / Units	Тип переменных, источник данных / Variable type, data source
1	2	3	4
Среднегодовая температура / Annual mean temperature	bio1	°C	Биоклиматические и топографические переменные / Bioclimatic and topographic variables, WorldClim (http://www.worldclim.org)
Суточная амплитуда температуры / Mean diurnal range	bio2	°C	
Изотермальность / Isothermality	bio3	–	
Сезонность температуры / Temperature seasonality	bio4	°C	
Максимальная температура наиболее теплого месяца / Max temperature of warmest month	bio5	°C	
Минимальная температура наиболее холодного месяца / Min temperature of coldest month	bio6	°C	
Среднегодовая амплитуда колебания температуры / Temperature annual range	bio7	°C	
Средняя температура наиболее влажного квартала / Mean temperature of wettest quarter	bio8	°C	
Средняя температура наиболее сухого квартала / Mean temperature of driest quarter	bio9	°C	
Средняя температура наиболее теплого квартала / Mean temperature of warmest quarter	bio10	°C	
Средняя температура наиболее холодного квартала / Mean temperature of coldest quarter	bio11	°C	
Среднегодовое количество осадков / Annual precipitation	bio12	мм / mm	
Количество осадков самого влажного месяца / Precipitation of wettest month	bio13	мм / mm	
Количество осадков самого сухого месяца / Precipitation of driest month	bio14	мм / mm	
Сезонность выпадения осадков (коэффициент вариации) / Precipitation seasonality (coefficient of variation)	bio15	–	

Окончание табл. 2
Table 2. Continuation

1	2	3	4
Количество осадков наиболее влажного квартала / Precipitation of wettest quarter	bio16	мм / mm	Биоклиматические и топографические переменные / Bioclimatic and topographic variables, WorldClim (http://www.worldclim.org)
Количество осадков наиболее сухого квартала / Precipitation of driest quarter	bio17	мм / mm	
Количество осадков наиболее теплого квартала / Precipitation of warmest quarter	bio18	мм / mm	
Количество осадков наиболее холодного квартала / Precipitation of coldest quarter	bio19	мм / mm	
Высота над уровнем моря / Altitude	alt	м н.у.м. / m.a.s.l.	Полевые исследования / Field studies
Широта / Latitude	lat	десятичные координаты / decimal coordinates	
Долгота / Longitude	long	десятичные координаты / decimal coordinates	Полевые исследования / Field studies

Статистический анализ выполнялся в среде R ver. 4.1.2 (R Core Team, 2021) и STATISTICA ver. 10.0 (STATISTICA, 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам анализа восьми линейных параметров у 794 образцов восьми таксонов *Chondrilla* в 2022 г. показано, что лимиты и доверительные интервалы среднего значения подавляющего большинства из рассматриваемых признаков у них перекрываются (рис. 3). Исключение составляет только ширина стеблевого листа у *C. latifolia* (см. рис. 3, з). Этот признак является одним из таксономически значимых. Для *C. brevirostris*, *C. juncea* и *C. graminea* ширина стеблевого листа в дихотомическом ключе для определения указана в диапазоне 0.5 – 3.0 (6.0) мм, а для *C. latifolia* и *C. canescens* – (5) 10.0 – 30 (40) мм (Леонова, 1989). Следовательно, в 2022 г. в совокупных выборках исследованных образцов значения признака у *C. canescens* перекрывались с совокупными выборками образцов таксонов *C. juncea* и *C. graminea*.

Из представленных на рис. 4 скрипичных диаграмм, очевидно, что картина изменчивости этого морфологического признака на межпопуляционном уровне в один год наблюдения ещё более размывает границы таксонов. Так, популяции *C. juncea* и *C. graminea*, с одной стороны, и *C. canescens* – с другой, располагающиеся вблизи друг от друга в окрестностях с. Алексеевка (Базарно-Карабулакский район, Саратовская область), по ширине стеблевого листа в значительной мере перекрываются, в то время как в популяции из окрестности г. Хвалынска (Саратовская область) это перекрывание имеет место в гораздо меньшей степени. При этом диапазон изменчивости параметра у самого *C. canescens* в популяции из Базарно-Карабулакского района значительно уступает таковому в популяциях из Хвалынского района и из окрестностей г. Капустин Яр (Астраханская область).

Характерно, что в последних двух популяциях он гораздо ближе, чем между популяциями из Базарно-Карабулакского и Хвалынского районов одной области, расстояние между которыми всего лишь около 100 км. При сравнении диапазонов межпопуляционной изменчивости по этому признаку также не разделяются совокупные выборки *C. latifolia*, с одной стороны, и совокупные выборки любого из остальных таксонов, включая *C. juncea* или *C. graminea* – с другой.

Таким образом, по результатам анализа изменчивости данного таксономически значимого параметра нет оснований считать его таковым. Уровень межпопуляционной изменчивости даже в один год мониторинга оказывается столь широким, что полностью перекрывает диапазоны изменчивости всех этих таксонов.

Сходный характер изменчивости популяций и таксонов рода имел место в 2022 г. и по другому таксономически значимому признаку – длине ножек корзинок. По Т. Г. Леоновой (1989) у *C. juncea* и *C. latifolia* корзинки сидячие, у *C. canescens* – на коротких ножках, а у *C. graminea* – на ножках длиной 8 – 30 мм. Однако, как следует из рис. 5, наблюдается ещё большее сходство в характере изменчивости этого параметра по всем исследованным популяциям всех четырёх таксонов, чем это имело место по признаку ширины стеблевого листа. Так, независимо от районов произрастания диапазон и характер изменчивости этого признака абсолютно сходен у *C. canescens* и *C. graminea*, в соответствии с ключом для определения должны быть по нему весьма различающимися. *C. latifolia* и, особенно, *C. juncea* на межпопуляционном уровне различались по этому признаку в большей степени, чем *C. canescens* и *C. graminea*. В ряде популяций они уступали последним, хотя частично и перекрываясь с ними (популяции *C. juncea* из Ростовской и Волгоградской областей, а также из окрестностей с. Меловое и Поповка из Саратовской области; обе популяции *C. latifolia* из Ростовской области). При этом в окрестностях хут. Базки расположенные рядом популяции *C. juncea* и *C. latifolia* имели фактически одинаковый диапазон изменчивости. В то же время популяция *C. juncea* из окрестностей г. Хвалынска Саратовской области значительно по размаху изменчивости превосходила ряд популяций этого таксона, приближаясь по параметру к популяциям *C. canescens* и *C. graminea*, произрастающим рядом с ней. Весьма сходный диапазон и характер изменчивости по этому признаку демонстрировали и популяции *C. juncea*, *C. canescens* и *C. graminea*, произрастающие рядом в окрестностях с. Алексеевка (Базарно-Карабулакский район, Саратовская область).

То есть, по признаку длины ножек корзинок, как и в целом ряде случаев с характером изменчивости популяций по ширине стеблевого листа, произрастающие рядом в близких условиях окружающей среды популяции разных таксонов демонстрировали сходный диапазон морфологической изменчивости. Интересно, что популяция *C. juncea*, расположенная на территории дендрария ботанического сада Саратовского университета имени Н. Г. Чернышевского, так же, как и в отношении параметра ширины стеблевого листа, была совершенно отличной по изменчивости длины ножек корзинок от всех остальных популяций этого таксона и от популяций *C. canescens*. Более того, она превосходила по диапазону изменчивости и максимальным значениям признака как *C. latifolia*, так и *C. graminea*, что уж совсем никак не согласуется с сутью тез, представленных в дихотомическом ключе для определения по данному признаку.

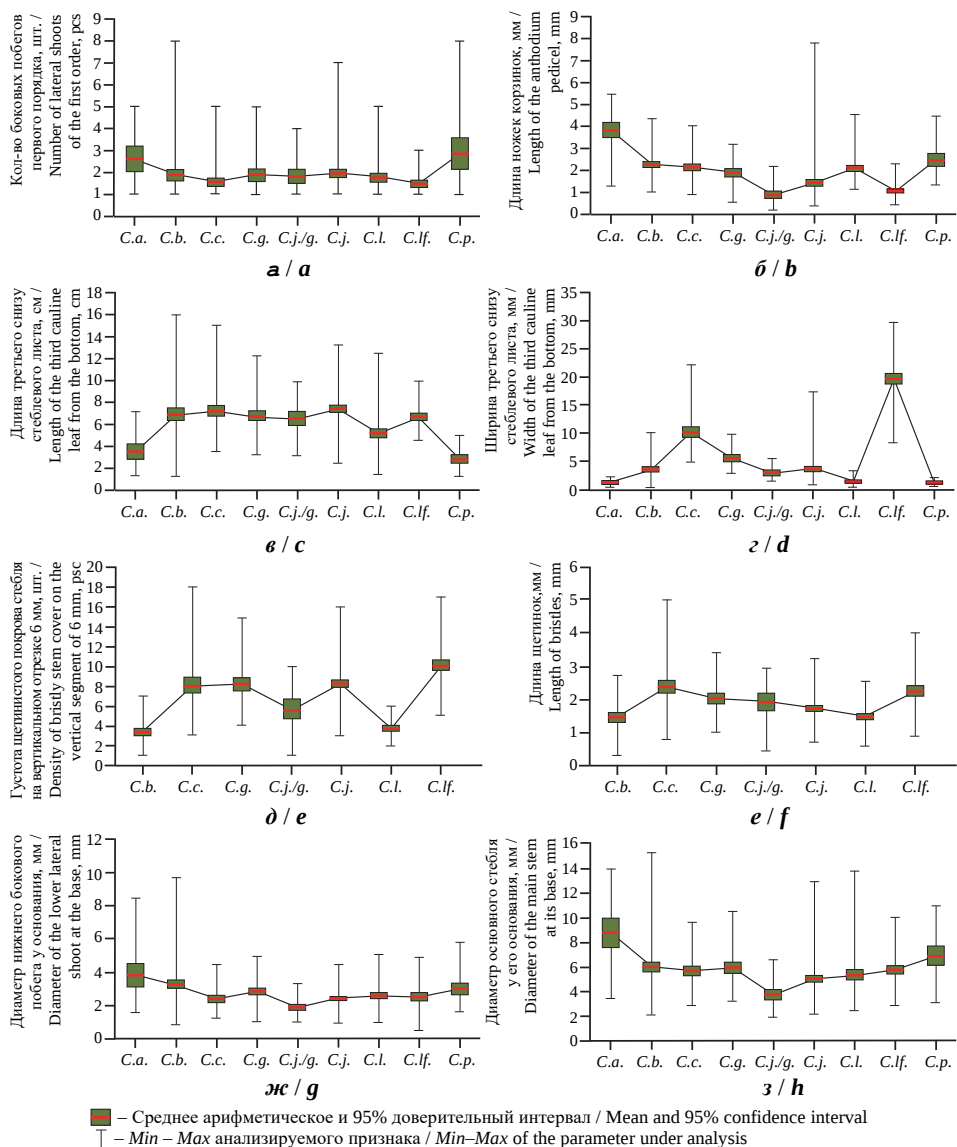


Рис. 3. Диаграммы размаха морфометрических признаков растений таксонов *Chondrilla* по результатам исследования 2022 г.: C.a. – *C. ambigua*, C.b. – *C. brevirostris*, C.c. – *C. canescens*, C.g. – *C. graminea*, C.j./g. – *C. juncea* / *graminea*, C.j. – *C. juncea*, C.l. – *C. laticoronata*, C.lf. – *C. latifolia*, C.p. – *C. pauciflora*

Fig. 3. Box plots of the morphometric parameters of plants of *Chondrilla* taxa based on the results of our 2022 study: C.a. – *C. ambigua*, C.b. – *C. brevirostris*, C.c. – *C. canescens*, C.g. – *C. graminea*, C.j./g. – *C. juncea* / *graminea*, C.j. – *C. juncea*, C.l. – *C. laticoronata*, C.lf. – *C. latifolia*, C.p. – *C. pauciflora*

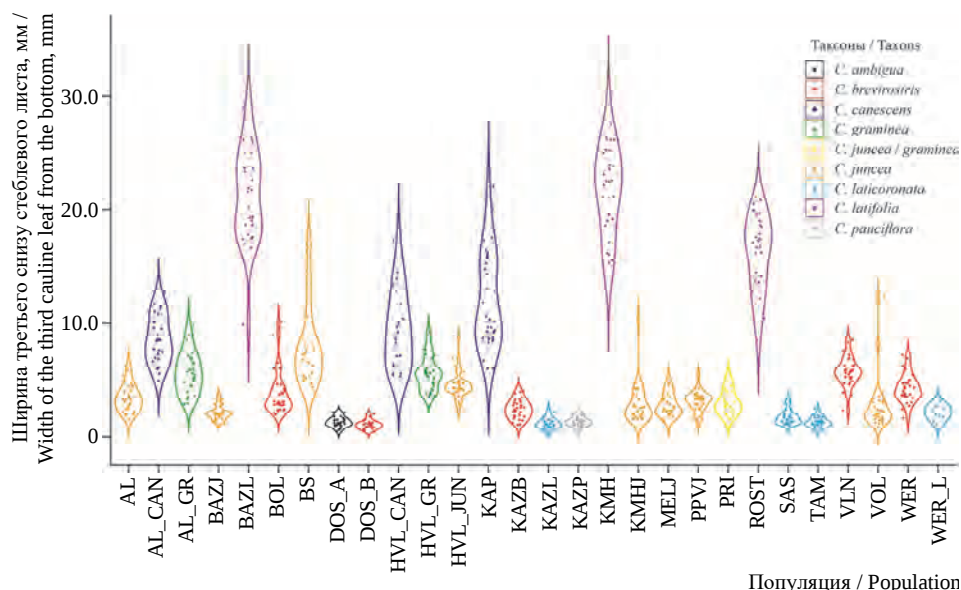


Рис. 4. Диаграммы изменчивости популяций исследованных таксонов *Chondrilla* по параметру ширины третьего снизу стеблевого листа. Условные обозначения популяций см. табл. 1. Каждой точке соответствует значение параметра одного образца

Fig. 4. Variability diagrams of the populations of the studied *Chondrilla* taxa by the parameter of the width of the third cauline leaf from the bottom. Shorthands are the same as in Table 1. Each point corresponds to the value of the parameter of one sample

По густоте щетинистого покрова стебля и длине щетинок – признакам, являющимся таксономически значимыми (Леонова, 1989), – наблюдалась та же картина изменчивости (не показано).

По результатам сравнительного анализа межгодовой (2015, 2016 и 2022 гг.) морфологической изменчивости по семи количественным признакам в 14 популяциях пяти таксонов *Chondrilla* показано, что первые две главные компоненты изменчивости морфометрических параметров выборки 2015 г. объясняют 43% дисперсии (рис. 6, а). Параметры боковых побегов оказались ведущими факторами изменчивости вдоль первой главной компоненты, объясняющей 24% вариации. При этом наибольшие значения по данным параметрам наблюдаются у части образцов *C. latifolia* и *C. graminea*, однако и диапазон значений внутри этих таксонов можно назвать довольно широким. Ширина стеблевого листа в данном анализе имеет более низкую корреляцию с первой главной компонентой (PC1), чем в выборках 2016 и 2022 гг., т.е. не является ведущим фактором изменчивости. Вдоль второй главной компоненты (PC2), объясняющей 19% вариации, наблюдается обособление образцов *C. graminea* в нижней части области ординации. Признаками, ответственными за это обособление, являются длина ножек корзинок и длина стеблевого листа. Для образцов последнего таксона характерны более длинные ножки корзинок и более короткие стеблевые листья, по сравнению с образцами

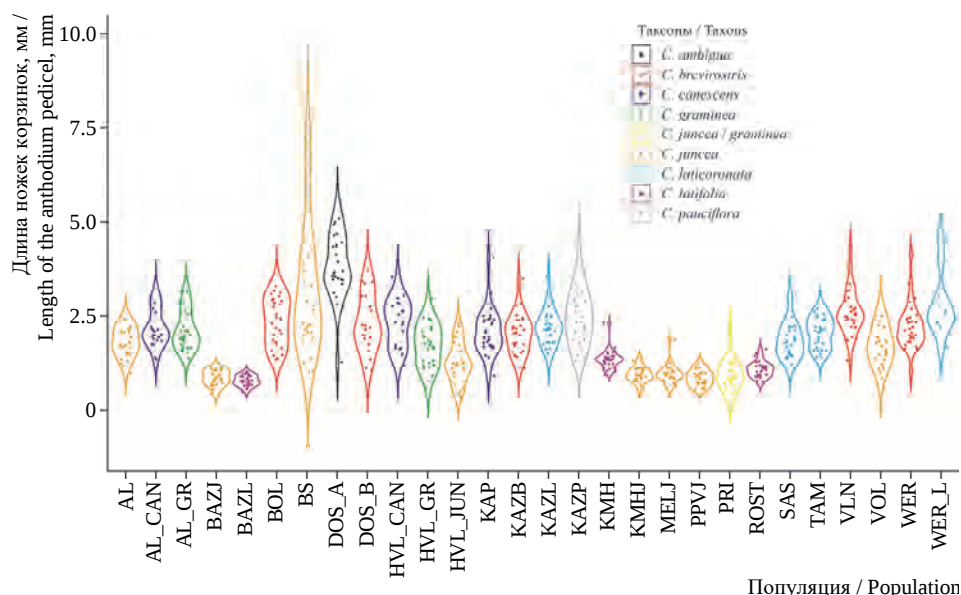


Рис. 5. Диаграммы изменчивости популяций исследованных таксонов *Chondrilla* по параметру длины ножки корзинки. Условные обозначения популяций см. табл. 1. Каждой точке соответствует значение параметра одного образца

Fig. 5. Variability diagrams of the populations of the studied *Chondrilla* taxa by the anthodium pedicle length. Shorthands are the same as in Table 1. Each point corresponds to the value of the parameter of one sample

других таксонов. По результатам анализа напрашивается вывод о том, что в данный год наблюдения различия между таксонами в большей степени связаны с признаками, не имеющими таксономического значения, – количеством боковых побегов первого порядка и диаметром нижнего бокового побега у основания. При этом различия по таксономически значимым признакам между таксонами в более яркой форме были выражены по признакам длины ножек корзинок, но в меньшей мере – по признаку ширины стеблевого листа.

В выборке 2022 г. первые две главные компоненты объясняют 38% вариации количественных морфометрических параметров (см. рис. 6, в). На долю первой главной компоненты (PC1) выпадает 21% объясненной дисперсии. Наиболее скоррелированными признаками с PC1 являются длина щетинок на стебле и ширина стеблевого листа. Вдоль данного направления изменчивости наиболее заметно обособляются популяции *C. latifolia* и *C. canescens*, образцы которых имеют более длинные щетинки на стебле и отличаются большей шириной стеблевого листа по сравнению с популяциями других таксонов. При этом образцы *C. latifolia* образуют довольно компактное облако рассеяния, что говорит о сравнительно большей однородности внутри таксона по исследованным морфометрическим показателям. Вторая главная компонента (PC2) объясняет 17% общей дисперсии и наиболее

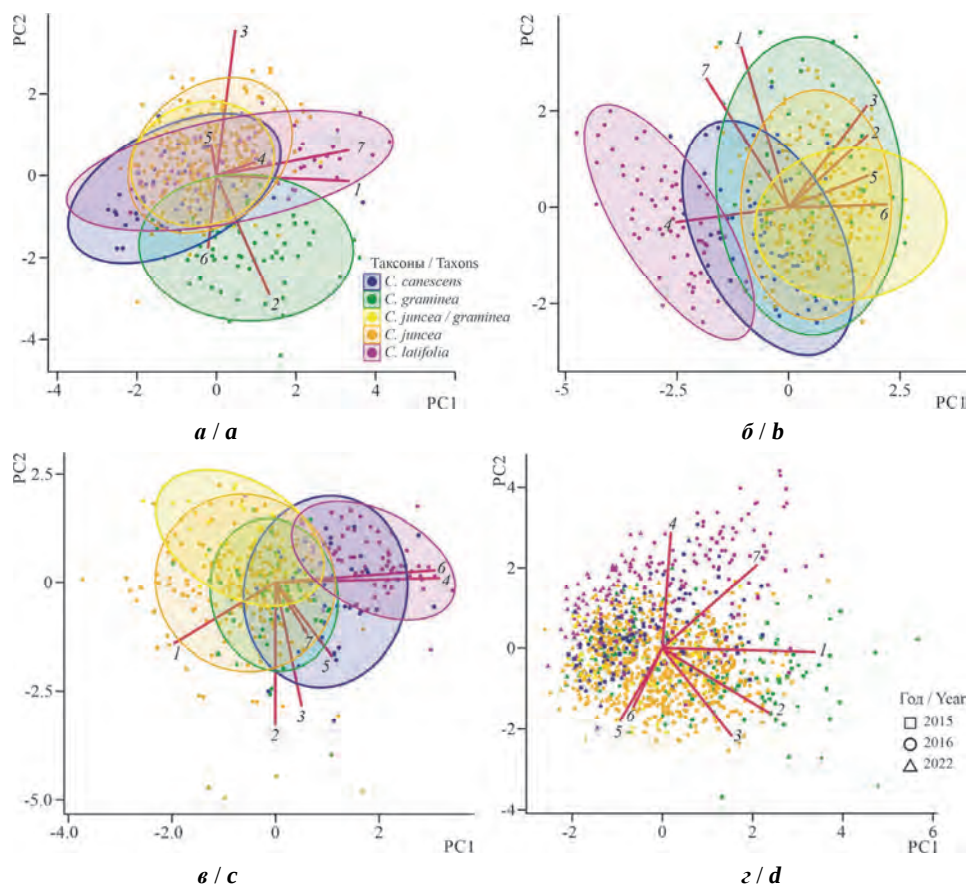


Рис. 6. Анализ главных компонент изменчивости семи линейных морфометрических признаков пяти таксонов *Chondrilla* по различным годам наблюдения: *a* – 2015 г., *b* – 2016 г., *в* – 2022 г., *г* – совокупно по трём годам наблюдения; 1 – количество боковых побегов первого порядка, шт.; 2 – длина ножек корзинок, мм; 3 – длина третьего снизу стеблевого листа, мм; 4 – ширина третьего снизу стеблевого листа, мм; 5 – густота щетинистого покрова стебля на вертикальном отрезке 6 мм, шт.; 6 – длина щетинок, мм; 7 – диаметр нижнего бокового побега у основания, мм

Fig. 6. Principal components analysis of the variability of seven linear morphometric parameters of five *Chondrilla* taxa in the years of observation: *a* – 2015, *b* – 2016, *c* – 2022, *d* – cumulatively over three years of observation; 1 – number of lateral shoots of the first order, pcs.; 2 – length of the anthodium pedicle, mm; 3 – length of the third cauline leaf from the bottom, mm; 4 – width of the third cauline leaf from the bottom, mm; 5 – density of the bristly stem cover on the vertical segment of 6 mm, pcs.; 6 – length of bristles, mm; 7 – diameter of the lower lateral shoot at the base, mm

связана с показателями длины ножек корзинок и длины стеблевого листа. По данному направлению изменчивости нет четкого обособления тех или иных таксонов.

Однако образцы *C. juncea*, *C. graminea* и *C. canescens* имеют довольно широкий разброс значений, в то время как большая часть образцов из популяций *C. latifolia* и *C. juncea* / *C. graminea* расположились относительно компактно в области положительных значений PC2, т.е. характеризуются меньшей длиной ножек корзинок и стеблевого листа, а также отличаются большей однородностью по данным параметрам.

При анализе выборки 2016 г. установлено, что первые две главные компоненты объясняют 50% вариации количественных морфометрических параметров (см. рис. 6, б). Наибольшую корреляцию с первой главной компонентой (PC1), объясняющей 30% вариации, имеют параметры ширины стеблевого листа и длины щетинок на стебле. По данному направлению наиболее заметно от других обособляются два таксона – *C. latifolia* и *C. canescens*. По ширине стеблевого листа закономерность изменения остается сходной с таковой в 2022 г. – особи этих таксонов превосходят особей *C. juncea* и *C. graminea*. Однако по длине щетинок наблюдается противоположная картина, в выборке 2016 г. образцы из популяций *C. latifolia* и *C. canescens* имеют наименьшие показатели среди всей выборки. Вторая главная компонента (PC2) объясняет 20% вариации морфометрических параметров и наиболее скоррелирована с показателями бокового побега. По данному направлению наблюдается широкий внутривидовой полиморфизм по этим параметрам у всех таксонов.

При анализе всей генеральной совокупности образцов за все три года мониторинга первые две главные компоненты объясняют 41% вариации морфометрических параметров (см. рис. 6, в). Первая главная компонента (PC1) объясняет 23% вариации и наиболее скоррелирована с числом боковых побегов, длиной ножек корзинок, длиной стеблевого листа и диаметром нижнего бокового побега у основания. Большая часть образцов *C. latifolia* и *C. canescens* расположилась в области отрицательных значений PC1 и характеризуется меньшими значениями этих параметров. Однако выборка *C. latifolia* 2022 г. отличается большей однородностью, а выборки 2015 и 2016 гг. имеют гораздо более широкий разброс вдоль оси. К данной группе образцов видов *C. latifolia* и *C. canescens* присоединяются также довольно большое количество образцов *C. graminea* и *C. juncea* из выборки 2022 г., обособившись от образцов выборок этих таксонов 2015 и 2016 гг., в которые они имели большие значения параметров, скоррелированных с PC1, в частности длины стеблевого листа и ножек корзинок. Вторая главная компонента (PC2) объясняет 16% вариации. Ведущими параметрами изменчивости вдоль данной оси является ширина стеблевого листа и в меньшей степени – длина щетинок и густота щетинистого покрова стебля. Наиболее отчетливо здесь выделяются только образцы *C. latifolia*, практически полностью сосредоточенные в верхней части пространства ординации, т.е. имеющие более широкие стеблевые листья и меньшую густоту и длину щетинок. Образцы других таксонов довольно хаотично рассредоточены вдоль второй оси, что не позволяет говорить о какой-либо закономерности в их размещении. В целом анализ, проведенный по всем трем годам наблюдения, дает более размытую картину изменчивости между таксонами, прежде всего, из-за высокой вариабельности параметров *C. graminea* и *C. juncea* по годам.

Таким образом, по структуре морфологической изменчивости выборка популяций пяти таксонов *Chondrilla* в 2015 г. существенно отличается от таковой 2016 и 2020 гг. В данный год мониторинга различия между таксонами в большей степени связаны с признаками, не имеющими таксономического значения, в то время как в 2016 и 2022 гг. они связаны с таксономически значимыми признаками. Однако и в этом случае, если в оба года наблюдения по признаку ширины стеблевого листа закономерность распределения полиморфизма остается сходной, то по длине щетинок наблюдается разнонаправленная картина изменчивости. В выборке 2016 г. образцы из популяций *C. latifolia* и *C. canescens* имеют наименьшие показатели среди всей выборки по признаку длины щетинок, в то время как в 2022 г. особи данных таксонов превосходят по этому показателю остальные таксоны.

Анализ методом неметрического многомерного шкалирования показал, что с основным направлением изменчивости вдоль первой оси наиболее скоррелированы факторы увлажнения (положительная корреляция) (bio16, bio18, bio12, bio13, bio19, bio14, bio17), а также два температурных показателя (отрицательная корреляция) (bio2 и bio5) (рис. 7). Именно по данному направлению происходит обособление большей части, но далеко не всех, образцов из популяций таксонов *C. latifolia* и *C. canescens* в правой части области ординации, соответствующей наибольшим показателям увлажнения мест обитания от таксонов, четко не разделяющихся между собой (*C. brevirostris*, *C. graminea*, *C. juncea*, *C. laticoronata*), а также от образцов *C. ambigua* и *C. pauciflora*, сосредоточенных в левой части области ординации, соответствующей минимальным значениям показателей увлажнения, более высокой суточной температурной амплитуде и максимальной температуре самого теплого месяца. Характерно, что географические переменные (географическая широта и географическая долгота) в гораздо меньшей мере определяют изменчивость анализируемых морфологических параметров, чем указанные биоклиматические факторы.

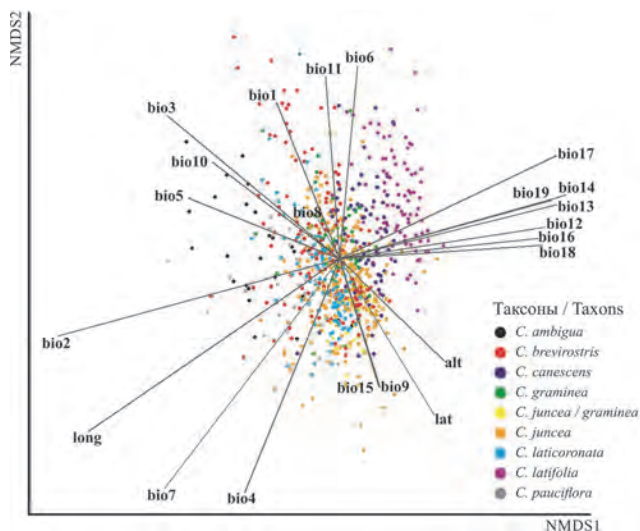


Рис. 7. Неметрическое многомерное шкалирование количественных морфометрических признаков образцов популяций восьми таксонов *Chondrilla*. Условные обозначения переменных окружающей среды см. табл. 2

Fig. 7. Non-metric multidimensional scaling of quantitative morphological parameters of specimens from populations of eight *Chondrilla* taxa. Environmental variable symbols are the same as in Table 2

Таким образом, градиент изменчивости по исследуемым параметрам, в том числе и по таксономически значимым, имеет место в направлении от условий минимального увлажнения и максимальных температур к условиям максимальной влажности и минимальной температуры. В этом направлении значения морфологических признаков, в особенности таких, как длина и ширина стеблевого листа, длина ножек корзинок, длина щетинок, в большинстве случаев возрастают.

Указанные биоклиматические факторы в пределах исследованной части ареала рода изменяются в направлении с северо-запада на юго-восток, – показатели увлажнения уменьшаются, а температуры – растут в этом направлении. Однако результаты анализа показывают, что локальные условия произрастания в конкретных местообитаниях популяций существенно сказываются на значениях морфологических параметров, чем географический градиент увлажнения и температуры. В пользу этого говорит относительно слабая зависимость их от географических координат мест произрастания. Их изменчивость в большей степени связана именно с показателями увлажнения и температуры в конкретных местах произрастания популяций и, возможно, с гибридизацией, однако в меньшей мере определяется таксономической принадлежностью. Структура генетической изменчивости в популяциях этих таксонов, выявленная нами ранее (Кашин и др., 2017; Kashin et al., 2019), говорит о том же.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что лимиты и доверительные интервалы среднего значения восьми исследованных в 2022 г. линейных параметров, четыре из которых являются таксономически значимыми, в выборке из 794 образцов восьми таксонов *Chondrilla* Европейской России и Северо-Западного Казахстана перекрываются. При сравнении популяционных выборок всех восьми таксонов по этим морфологическим признакам показано, что в один год мониторинга границы изменчивости таксонов ещё более размываются. При этом уровень её оказывается столь широким, что полностью перекрывает принятые границы анализируемых морфологических параметров всех исследованных таксонов. Популяции разных таксонов, произрастающие рядом в сходных условиях окружающей среды, демонстрировали весьма сходный (в ряде случаев фактически одинаковый) диапазон морфологической изменчивости. Причинами этой очень динамичной и своеобразной изменчивости признаков, скорее всего, являются локальные условия произрастания популяций в конкретный год мониторинга. Сравнительный анализ показал её существенную динамику и по годам.

Методом неметрического многомерного шкалирования количественных морфометрических параметров показано, что имеет место градиент их изменчивости в направлении от условий минимального увлажнения и максимальной температуры к условиям максимальной влажности и минимальной температуры. В этом направлении (преимущественно с северо-запада на юго-восток) значения морфологических признаков, в особенности таких, как ширина и длина стеблевого листа, длина ножек корзинок, длина щетинок, в большинстве случаев возрастают. Однако локальные условия произрастания в конкретных местообитаниях популяций

существенно сказываются на значениях морфологических параметров. В пользу этого говорит относительно слабая зависимость значений признаков от географических координат мест произрастания. Их изменчивость связана в большей степени именно с условиями произрастания и, возможно, с гибридизацией, но в меньшей мере определяется таксономической принадлежностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Еленевский А. Г., Буланый Ю. И., Радыгина В. И. Определитель сосудистых растений Саратовской области. Саратов: ИП Баженов, 2008. 248 с.
- Ильин М. М. Критический обзор рода *Chondrilla* L. М.: Гостехиздат, 1930. 61 с.
- Ильин М. М. Хондрилла (*Chondrilla* L.) // Каучук и каучуконосы. М.: Изд-во АН СССР, 1953. Т. II. С. 598 – 636.
- Кашин А. С. Геномная изменчивость, гибридизация и возможности хромосомного видообразования при гаметофитном апомиксисе // Успехи современной биологии. 2000. Т. 120, № 1. С. 502 – 512.
- Кашин А. С., Чернышова М. П., Сенников А. Н., Отъкало О. В., Титовец В. В. Потенциал формообразования агамного комплекса *Pilosella* (Asteraceae). 1. Базовые виды // Ботанический журнал. 1999. Т. 84, № 4. С. 25 – 38.
- Кашин А. С., Залесная С. В., Титовец В. В., Киреев Е. А. Потенциал формообразования агамного комплекса *Pilosella* (Asteraceae). 2. Естественная межвидовая гибридизация // Ботанический журнал. 2000а. Т. 85, № 3. С. 1 – 13.
- Кашин А. С., Залесная С. В., Титовец В. В. Потенциал формообразования агамного комплекса *Pilosella*. 3. Геномная изменчивость в популяциях и потомстве отдельных растений // Ботанический журнал. 2000б. Т. 85, № 12. С. 13 – 28.
- Кашин А. С., Крицкая Т. А., Попова А. О., Пархоменко А. С. Генетическая дифференциация видов *Chondrilla* (Asteraceae) европейской части России по данным ISSR-маркирования // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. 2017. Т. 122, № 1. С. 60 – 70.
- Кашин А. С., Петрова Н. А., Шанцер И. А., Кондратьева А. О., Шилова И. В., Пархоменко А. С. Изменчивость морфологических параметров некоторых таксонов *Chondrilla* (Asteraceae) Европейской России в связи с их систематикой // Ботанический журнал. 2018. Т. 103, № 11. С. 1407 – 1436. <https://doi.org/10.7868/S0006813618110030>
- Кулуев Б. Р., Гарафутдинов Р. Р., Максимов И. В., Сагитов А. М., Чемерис Д. А., Князев А. В., Вершинина З. Р., Баймиев Ан. Х., Мулдашев А. А., Баймиев Ал. Х., Чемерис А. В. Натуральный каучук, его источники и составные части // Биомика. 2015. Т. 7, № 4. С. 224 – 283.
- Лапин А. К. Культура каучуконосов // Сельское хозяйство СССР. Ежегодник. М.: Сельхозгиз, 1935. С. 65 – 73.
- Леонова Т. Г. Род Хондрилла – *Chondrilla* L. // Флора СССР. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1964. Т. 29. С. 560 – 586.
- Леонова Т. Г. Хондрилла – *Chondrilla* L. // Флора европейской части СССР. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1989. Т. 8. С. 57 – 61.
- Маевский П. Ф. Флора средней полосы европейской части России. 11-е изд. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 635 с.
- Пархоменко А. С., Кашин А. С., Шилова И. В., Гребенюк Л. В., Богослов А. В., Денисов А. А., Кондратьева А. О., Пархоменко В. М. Изменчивость морфологических параметров *Trapa natans* (Trapaceae, Magnoliópsida) при реинтродукции в водоемы Саратовской области из водоемов Воронежской области // Поволжский экологический журнал. 2022. № 1. С. 55 – 78. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-1-55-78>

Dijk van P. J. Ecological and evolutionary opportunities of apomixis: insights from *Taraxacum* and *Chondrilla* // Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences. 2003. Vol. 358, iss. 1434. P. 1113 – 1121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1302>

Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37, iss. 12. P. 4302 – 4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Flann C. Global Compositae Checklist. 2011. Available at: <https://demo.gbif.org> (accessed October 7, 2022).

Flora Europaea: Plantaginaceae to Compositae (and Rubiaceae). Cambridge: Cambridge University Press, 1976. Vol. 4. 534 p.

Gaskin J. F., Schwarzländer M., Kinter C. L., Smith J. F., Novak S. J. Propagule pressure, genetic structure, and geographic origins of *Chondrilla juncea* (Asteraceae): an apomictic invader on three continents // American Journal of Botany. 2013. Vol. 100, iss. 9. P. 1871 – 1882. <https://doi.org/10.3732/ajb.120062>

Kashin A. S., Kritskaya T. A., Parkhomenko A. S., Schanzer I. A. Genetic polymorphism in *Chondrilla* (Asteraceae) in southern European Russia and the nature of *Chondrilla juncea* L. // Nordic Journal of Botany. 2019. Vol. 37, iss. 11. P. 402 – 420. <https://doi.org/10.1111/njb.02420>

Nasseh Y. A revision on the genera *Chondrilla* and *Heteroderis* (Asteraceae) in Iran // Iranian Journal of Botany. 2010. Vol. 16, iss. 1. P. 92 – 95.

Nasseh Y., Joharchi M. A. Revision the genus *Chondrilla* (Asteraceae) in Iran // Proceedings of the 15th National & 3rd International Conference of Biology. Tehran: University of Tehran, 2008. P. 178 – 179.

Oksanen J., Blanchet F. G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P. R., O'Hara R. B., Simpson G. L., Solymos P., Stevens M. H. H., Szoecs E., Wagner H. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-7. 2020. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed October 15, 2022).

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2021. Available at: <http://www.R-project.org/> (accessed October 15, 2022).

Sharma S. K., Pandit M. K. A morphometric analysis and taxonomic study of *Panax bipinnatifidus* Seem. (Araliaceae) species complex from Sikkim Himalaya, India // Plant Systematics and Evolution. 2011. Vol. 297, iss. 1 – 2. P. 87 – 98. <https://doi.org/10.1007/s00606-011-0501-8>

STATISTICA (data analysis software system). 2022. Available at: <http://statsoft.ru> (accessed October 15, 2022).

Türkçe T. Bitki Adları Sözlüğü. Ankara: Türk Dil Kurumu, 2007. 512 p.

Tuzlacı E. Türkiye Bitkileri Sözlüğü. İstanbul: Alfa Yayınları, 2006. 354 p.

Morphological variability in *Chondrilla* taxon populations in European Russia and adjacent territories

A. S. Parkhomenko , A. O. Kondratieva, A. V. Bogoslov,
I. V. Shilova, A. S. Kashin

Saratov State University
83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Received: April 29, 2023 / revised: June 14, 2023 / accepted: June 14, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. The morphological variability in populations of *Chondrilla* taxa is poorly studied, and features of its distribution, both spatially and between taxa, are not obvious. The article presents the results of our comparative analysis of the nature of this variability on the example of 28 populations of eight taxa of the genus in the southeastern European Russia and northwestern Kazakhstan. The variability of eight morphological traits, most of which are still used to determine the species of plants, was analyzed. It is shown that the variability level of these characters, four of which are taxonomically significant, in one year of monitoring is so wide that it completely overlaps the boundaries of their variability of all Eastern European taxa. At the same time, populations of different taxa growing side by side in similar environmental conditions demonstrated a very similar (just identical in some cases) range of morphological variability. It was concluded that the causes of this very dynamic and peculiar variability of traits are most likely the local conditions of population growth in a particular year of monitoring. Our comparative analysis of the interannual (2015, 2016 and 2022) variability of these quantitative traits in 14 populations of five *Chondrilla* taxa showed its significant dynamics over years as well. Using the method of non-metric multidimensional scaling of quantitative morphometric parameters, it is shown that the gradient of their variability takes place in the direction from the conditions of minimum moisture and maximum temperature to that of increasing humidity and decreasing temperature. At the same time, the combinations of these climatic factors in specific habitats of populations affect the values of morphological parameters to a greater extent than their geographical gradients or taxonomic affiliation.

Keywords: *Chondrilla*, Asteraceae, numerical analysis, non-metric multidimensional scaling

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project number 22-24-00340).

For citation: Parkhomenko A. S., Kondratieva A. O., Bogoslov A. V., Shilova I. V., Kashin A. S. Morphological variability in *Chondrilla* taxon populations in European Russia and adjacent territories. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 331–351 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-331-351>

 Corresponding author. Botanical Garden, Saratov State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Alena S. Parkhomenko: <https://orcid.org/0000-0002-9948-7298>, parkhomenko_as@mail.ru; Anna O. Kondratieva: <https://orcid.org/0000-0001-5000-8914>, popova.ao@mail.ru; Artem V. Bogoslov: <https://orcid.org/0000-0002-2248-1285>, dandelioncave@mail.ru; Irina V. Shilova: <https://orcid.org/0000-0002-9828-4229>, schiva1952@yandex.ru; Alexandr S. Kashin: <https://orcid.org/0000-0002-2342-2172>, kashinas2@yandex.ru.

REFERENCES

- Elenevskiy A. G., Bulaniy Y. I., Radygina V. I. *Opredelitel' sosudistyykh rasteniy Saratovskoy oblasti* [Determination Key to Vascular Plants of the Saratov Region]. Saratov, IP Bazhenov, 2008. 248 p. (in Russian).
- Il'in M. M. *Kriticheskiy obzor roda Chondrilla L.* [Critical Review of the Genus *Chondrilla* L.]. Moscow, Gostekhizdat, 1930. 61 p. (in Russian).
- Il'in M. M. *Chondrilla* – *Chondrilla* L. In: *Kauchuk i kauchukonosy* [Rubber and Rubber Plants]. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR, 1953, vol. 2, pp. 598–636 (in Russian).
- Kashin A. S. Genome variability, hybridogenesis and potentialities of chromosome speciation in gametophytic apomixis. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 2000, vol. 120, no. 1, pp. 502–512 (in Russian).
- Kashin A. S., Chernishova M. P., Sennikov A. N., Otkalo O. V., Titovets V. V. Speciation potential of the *Pilosella* (Asteraceae) agamic complex. 1. Base species. *Botanicheskii zhurnal*, 1999, vol. 84, no. 4, pp. 25–38 (in Russian).
- Kashin A. S., Zalesnaja S. V., Titovets V. V., Kireev E. A. Speciation potential of the *Pilosella* (Asteraceae) agamic complex. 2. Natural interspecies hybridization. *Botanicheskii zhurnal*, 2000a, vol. 85, no. 3, pp. 1–13 (in Russian).
- Kashin A. S., Zalesnaya S. V., Titovets V. V. Speciation potential of the *Pilosella* agamic complex. 3. Genomic variability in populations and in separate plant progenies. *Botanicheskii zhurnal*, 2000b, vol. 85, no. 12, pp. 13–28 (in Russian).
- Kashin A. S., Kritskaya T. A., Popova A. O., Parkhomenko A. S. ISSR analysis of genetic diversity of *Chondrilla* species (Asteraceae) in European part of Russia. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Biological Series*, 2017, vol. 122, no. 1, pp. 60–70 (in Russian).
- Kashin A. S., Petrova N. A., Shanzer I. A., Kondratieva A. O., Shilova I. V., Parkhomenko A. S. Variability of morphological parameters of some *Chondrilla* (Asteraceae) taxa in European Russia in context of their taxonomy. *Botanicheskii zhurnal*, 2018, vol. 103, no. 11, pp. 1407–1436 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0006813618110030>
- Kuluev B. R., Garafutdinov R. R., Maksimov I. V., Sagitov A. M., Chemeris D. A., Knyazev A. V., Vershinina Z. R., Baymiev An. K., Muldashev A. A., Baymiev Al. K., Chemeris A. V. Natural rubber, its sources and components. *Biomics*, 2015, vol. 7, no 4, pp. 224–283 (in Russian).
- Lapin A. K. Rubber culture. In: *Sel'skoye khozyaystvo SSSR. Yezhegodnik* [Agriculture of the USSR. Yearbook]. Moscow, Sel'khozgiz, 1935, pp. 65–73 (in Russian).
- Leonova T. G. Genus *Chondrilla* – *Chondrilla* L. *Flora SSSR*. Leningrad, Nauka, 1964, vol. 29, pp. 560–586 (in Russian).
- Leonova T. G. *Chondrilla* – *Chondrilla* L. *Flora Partis Europaeae URSS*. Leningrad, Nauka, 1989, vol. 8, pp. 57–61 (in Russian).
- Maevskiy P. F. *Flora of the Middle Zone of the European Part of Russia*. 11 ed. Moscow, KMK Scientific Press, 2014. 635 p. (in Russian).
- Parkhomenko A. S., Kashin A. S., Shilova I. V., Grebenyuk L. V., Bogoslov A. V., Denisov A. A., Kondratyeva A. O., Parkhomenko V. M. Variability of morphological parameters of *Trapa natans* (Trapaceae, Magnoliopsida) during reintroduction into water bodies of the Saratov region from those of the Voronezh region. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 1, pp. 55–78 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-1-55-78>
- Dijk van P. J. Ecological and evolutionary opportunities of apomixis: insights from *Taraxacum* and *Chondrilla*. *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*, 2003, vol. 358, iss. 1434, pp. 1113–1121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1302>
- Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, iss. 12, pp. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Flann C. *Global Compositae Checklist*. 2011. Available at: <https://demo.gbif.org> (accessed October 7, 2022).

Flora Europaea: Plantaginaceae to Compositae (and Rubiaceae). Cambridge, Cambridge University Press, 1976. Vol. 4. 534 p.

Gaskin J. F., Schwarzländer M., Kinter C. L., Smith J. F., Novak S. J. Propagule pressure, genetic structure, and geographic origins of *Chondrilla juncea* (Asteraceae): an apomictic invader on three continents. *American Journal of Botany*, 2013, vol. 100, iss. 9, pp. 1871–1882. <https://doi.org/10.3732/ajb.120062>

Kashin A. S., Kritskaya T. A., Parkhomenko A. S., Schanzer I. A. Genetic polymorphism in *Chondrilla* (Asteraceae) in southern European Russia and the nature of *Chondrilla juncea* L. *Nordic Journal of Botany*, 2019, vol. 37, iss. 11, pp. 402–420. <https://doi.org/10.1111/njb.02420>

Nasseh Y. A revision on the genera *Chondrilla* and *Heteroderis* (Asteraceae) in Iran. *Iranian Journal of Botany*, 2010, vol. 16, iss. 1, pp. 92–95.

Nasseh Y., Joharchi M. A. Revision the genus *Chondrilla* (Asteraceae) in Iran. *Proceedings of the 15th National & 3rd International Conference of Biology*. Tehran, University of Tehran, 2008, pp. 178–179.

Oksanen J., Blanchet F. G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P. R., O'Hara R. B., Simpson G. L., Solymos P., Stevens M. H. H., Szoecs E., Wagner H. *Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-7*. 2020. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed October 15, 2022).

R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, 2021. Available at: <http://www.R-project.org/> (accessed October 15, 2022).

Sharma S. K., Pandit M. K. A morphometric analysis and taxonomic study of *Panax bipinnatifidus* Seem. (Araliaceae) species complex from Sikkim Himalaya, India. *Plant Systematics and Evolution*, 2011, vol. 297, iss. 1–2, pp. 87–98. <https://doi.org/10.1007/s00606-011-0501-8>

STATISTICA (data analysis software system). 2022. Available at: <http://statsoft.ru> (accessed October 15, 2022).

Türkçe T. *Bitki Adları Sözlüğü*. Ankara, Türk Dil Kurumu, 2007. 512 p.

Tuzlacı E. *Türkiye Bitkileri Sözlüğü*. İstanbul, Alfa Yayınları, 2006. 354 p.

Оригинальная статья

УДК 504.064.2:631.461

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-352-373>

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКИХ ПОЧВ НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ КОГАЛЫМА)

Е. В. Плешакова ^{1✉}, Е. В. Глинская ¹, А. С. Коробейникова ¹,
Д. М. Голубев ¹, А. Ш. Шеуджен ², М. В. Решетников ²

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского

Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»

Россия, 628486, г. Когалым, ул. Центральная, д. 19

Поступила в редакцию 10.04.2023 г., после доработки 17.05.2023 г., принята 17.05.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. В ходе работы оценили общую численность гетеротрофных микроорганизмов и количество бактерий-участников круговорота азота (аммонифицирующих, денитрифицирующих, нитрифицирующих и азотфиксирующих) в городских и естественных (фоновых) почвах г. Когалыма, выявили взаимосвязи полученных результатов с геохимическими показателями. Микробиологический анализ продемонстрировал преобладание в городских почвах азотфиксирующих микроорганизмов (5.0×10^4 – 2.0×10^6 КОЕ/г почвы), которых в естественных почвах было в среднем в 44 раза меньше. В естественных почвах среднее количество денитрифицирующих микроорганизмов составляло 7.0×10^4 КОЕ/г почвы, превышая в 1.3 раза их численность в городских почвах. На основе полученных данных был установлен ряд содержания микроорганизмов в почвах г. Когалыма: азотфиксаторы > аммонификаторы > гетеротрофы > денитрификаторы; в фоновых пробах: денитрификаторы > аммонификаторы > гетеротрофы > азотфиксаторы. Согласно данным эколого-геохимического анализа в Восточной промышленной зоне города обнаружено превышение ПДК подвижных форм тяжёлых металлов, таких как Cu, Ni и Zn. Выявлена достоверная обратная корреляция между количеством денитрифицирующих микроорганизмов в микробоценозах почв г. Когалыма и содержанием подвижных форм Ni и Cu, что указывает на возможное негативное действие этих металлов на развитие денитрификаторов. Обнаружена минимальная численность аммонифицирующих, денитрифицирующих и азотфиксирующих микроорганизмов в Восточной промышленной зоне, особенно в почвенных пробах, отобранных вблизи железной дороги. В целом, отсутствие заметных различий в содержании микроорганизмов изученных

✉ Для корреспонденции. Кафедра биохимии и биофизики Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

ORCID и e-mail адреса: Плешакова Екатерина Владимировна: <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>, plekat@yandex.ru; Глинская Елена Владимировна: <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>, elenavg-2007@yandex.ru; Коробейникова Анастасия Сергеевна: <https://orcid.org/0000-0002-3157-693X>, korobeinikovaanastasija@yandex.ru; Голубев Дмитрий Михайлович: <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>, dimagolubev2018@yandex.ru; Шеуджен Александр Шамирзович: <https://orcid.org/0000-0002-0000-2909>, Aleksandr.Sheudzhen@lukoil.com; Решетников Михаил Владимирович: <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>, rmv85@list.ru.

© Плешакова Е. В., Глинская Е. В., Коробейникова А. С., Голубев Д. М., Шеуджен А. Ш., Решетников М. В., 2023

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

групп в городских и естественных почвах свидетельствует о слабом уровне загрязнения почв в г. Когалыме. Полученные результаты являются основой для последующего экологического мониторинга почв г. Когалыма и прилегающих нефтедобывающих районов, прогнозирования экологических последствий антропогенной деятельности на данных территориях.

Ключевые слова: загрязнение почв, тяжёлые металлы, гетеротрофные, аммонифицирующие, денитрифицирующие, нитрифицирующие и азотфиксирующие микроорганизмы

Для цитирования. Плешакова Е. В., Глинская Е. В., Коробейникова А. С., Голубев Д. М., Шеуджен А. Ш., Решетников М. В. Микробиологическая оценка состояния городских почв нефтегазоносного региона (на примере территории Когалыма) // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 352 – 373. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-352-373>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений государственной политики современности является экологическая безопасность окружающей среды. Максимально возможное сохранение городских почв на фоне высокого уровня техногенного загрязнения с широким спектром экотоксикантов представляется чрезвычайно важным не только с экологической точки зрения, но и с экономической (Макаров, Макаров, 2016).

Город Когалым Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО), Тюменской области – основного нефтегазоносного района России – быстро развивающийся город, он основан в 1975 г., площадью 20,5 км², с численностью населения 68700 человек (по данным 2021 г.). Градообразующее предприятие: ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь». Как известно, нефтедобывающая отрасль оказывает мощное техногенное воздействие на почвенный покров, загрязняя его нефтяными углеводородами (УВ) и сопутствующими поллютантами разной степени токсичности, например, тяжёлыми металлами (ТМ) (Геннадиев, 2016). Загрязнение почвы в районах нефтедобычи может представлять собой значительную геохимическую угрозу для экосистем, так как в сырой нефти и буровых растворах присутствует ряд ТМ: свинец (Pb), никель (Ni), кадмий (Cd), хром (Cr), ванадий (V) и цинк (Zn) (Fu et al., 2014; Mustafa et al., 2015).

Почвы как стационарный элемент экосистемы выполняют функцию буфера, фильтра и не могут избежать влияния действующих на них факторов. Ведущая роль в выполнении экологических функций почвы отводится микроорганизмам, что определяет важность исследования микробных сообществ (Звягинцев, 1987; Напрасникова, Макарова, 2012; Wolińska et al., 2016). Оценка состояния и изменения почвенной микробиоты – одна из важнейших задач мониторинга почв, так как почвенные микроорганизмы являются наиболее чувствительными индикаторами изменения почвенно-экологических условий.

При воздействии любого загрязнителя на почву происходит изменение её микробиоты. Для микрофлоры почвы нефть выступает, с одной стороны, как источник углерода, а с другой – как загрязняющее вещество с токсическими свойствами. В этой связи попадание её в почву может как стимулировать развитие и размножение микроорганизмов, так и угнетать. Преобладание какого-либо из этих

процессов определяется составом нефти, её количеством и сроком воздействия (Журавлёва и др., 2017). Многочисленными исследованиями показано, что ТМ активно влияют на состав и численность почвенных микробных комплексов. Под влиянием ТМ происходят такие изменения, как возрастание или снижение общей численности определённых микроорганизмов, увеличение или снижение видового разнообразия, смена доминирующих и соподчинённых видов и т.д. (Murata et al., 2005; Terekhova et al., 2017). Металлы ингибируют процессы минерализации и синтеза различных веществ в почвах, подавляют дыхание почвенных микроорганизмов и способствуют морфологическим изменениям их репродуктивных органов, вызывают микробостатический эффект, могут выступать как мутагенный фактор (Фокина и др., 2015; Friedlová, 2010). Стерилизующий эффект поликомпонентных загрязнений приводит к выпадению чувствительных видов микроорганизмов, распаду микробных ценозов, потере биохимической активности почвы, а гибель микроорганизмов приводит к деградации экосистем (Еремченко и др., 2010).

ХМАО является одной из основных территорий в России по добыче нефти. Показано, что долгие годы эксплуатации нефтяных и газовых месторождений в регионе повлияли на состояние природной среды. Объекты нефтедобычи существенно изменили природные ландшафты округа, порывы нефтепроводов нанесли непоправимый вред природе (Соколов и др., 2017). Решение проблемы охраны почв и повышения их плодородия невозможно без знания изменения почвенных свойств и процессов, вызванных антропогенным воздействием. Очень важно не допустить потерь азота и снижения уровня его содержания в почвах, необходимого для развития лесной растительности на Европейском Севере (Федорец, Бахмет, 2003).

Город Когалым занимает устойчивое экономическое положение и имеет большой потенциал для дальнейшего развития. Осваиваются новые нефтяные месторождения, увеличивается население за счёт естественного прироста и притока перспективных кадров. Поэтому микробиологический анализ городских почв Когалыма имеет большое значение как для характеристики эколого-биологического состояния почв на современном этапе, так и дальнейшего прогнозирования экологических последствий деятельности человека на данной территории.

Целью настоящего исследования явилась оценка численности микроорганизмов определённых эколого-физиологических групп для диагностики состояния почвенно-биотического комплекса г. Когалыма. В ходе работы определяли: общую численность гетеротрофных микроорганизмов, количество микроорганизмов азотного цикла: аммонифицирующих, денитрифицирующих, нитрифицирующих и азотфиксирующих; выявляли взаимосвязи с геохимическими показателями.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования использовали почвенные пробы, отобранные на территории г. Когалыма, который находится на 62°16' с.ш., 74°29' в.д., высота над уровнем моря – 80 м. Когалымский регион расположен на Западно-Сибирской равнине, которая на территории ХМАО представлена подзонами север-

ной и средней тайги. Основу растительного покрова составляют сфагновые болота верхового типа и лесная растительность. Лесной покров подзон представлен сосновыми (62%), елово-кедровыми (18%), еловыми и берёзовыми лесами.

Город Когалым приравнен к районам Крайнего Севера. Здесь преобладает резко континентальный климат. Почвы Когалымского региона подзолистые тайги и болотные. Сосновые леса развиваются на торфянисто-подзолисто-глеевых почвах в условиях длительного избыточного увлажнения, а также на заторфованных понижениях среди дренированных массивов. Сосняки приурочены в основном к дренированным поверхностям водно-ледниковых равнин, песчаным субстратам. Под ними обычно формируются иллювиально-железистые почвы.

В 17 км северо-западнее г. Когалыма находится Когалымское нефтяное месторождение, освоение которого началось в 1985 г. Месторождение относится к Западно-Сибирской провинции. В пределах месторождения выявлены 7 нефтяных

залежей пластово-сводового и структурно-литологически экранированного типов.

Река Ингу-Ягун делит город на правобережный с капитальной застройкой 5 – 16 этажей и левобережный, состоящий из пос. Пионерный (Старый город), Фестивальный, Прибалтийских строителей – 1 – 3 этажа застройки и Северной и Восточной промышленных зон.

Основная отрасль промышленности г. Когалыма – нефтедобывающая, а также обработка и транспортировка углеводородной продукции. На обрабатывающее производство приходится около 30% от всего товарооборота. Это производства кокса и других нефтепродуктов, выпуск химической продукции, производство электронного оборудования.

В ходе настоящей работы были отобраны и изучены 53 почвенные пробы на пересечении основных автомобильных дорог г. Когалыма (рис. 1). Пробы с 1 по 26 отобраны в центральной селитебной части города, с 27 по 33 – в Северной промышленной зоне, а с 34 по 53 – на территории Восточной промышленной зоны и пос. Пионерный (Старый город), Фе-



Рис. 1. Схема расположения площадок опробования на территории г. Когалыма: 1 – кварталы застройки, 2 – водные объекты, 3 – железная дорога, 4 – автодорога, 5 – площадки опробования

Fig. 1. Layout of the testing areas on the territory of Kogalym: 1 – building districts, 2 – water sites, 3 – railway, 4 – highway, 5 – testing sites

стивальный, Прибалтийских строителей. Фоновые пробы в количестве 10 штук были отобраны на удалении 10 км в западном направлении от территории города в идентичных городским геоморфологическим и геологическим условиям. Отбор и подготовка проб производились в июне 2021 г. в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84. Точки отбора проб размещались с учётом розы ветров, особенностей микрорельефа, плана размещения зданий и коммуникаций. Отбор проб верхней части почвенного горизонта «А» (5 см), где обычно накапливается основная масса загрязнителей, выпадающих из атмосферы, осуществлялся методом «конверта» с пробных площадок размером от 2 – 3 до 10 м². Вес объединённой пробы варьировал в пределах 0.5 – 1.0 кг. Почвы: подзолы иллювиально-гумусовые; торфяные болотные верховые и торфяные болотные переходные с мелкими термокарстовыми озёрами; пойменные заболоченные. Почвообразующие породы – песчаные (Национальный атлас почв..., 2011).

Оценку общей численности культивируемых гетеротрофных микроорганизмов производили на ГРМ-агаре (ФБУН ГНЦ ПМБ, Оболенск, Россия) общепринятыми бактериологическими методами (Нетрусов и др., 2005). Учёт численности культивируемых микроорганизмов азотного цикла производили на агаризованных селективных средах. Численность аммонифицирующих микроорганизмов определяли на селективной среде следующего состава, г/л: пептон – 10.0; голодный агар – 20.0; денитрифицирующих микроорганизмов на среде: ГРМ-агар – 38±2; KNO₃ – 1.0; нитрифицирующих микроорганизмов – на среде Виноградского: KNO₃ – 10.0; K₂HPO₄ – 5.0; MgSO₄ – 2.5; NaCl – 2.5; FeSO₄ – 0.05; голодный агар – 20.0; азотфиксирующих микроорганизмов – на среде Эшби: глюкоза – 20.0; K₂HPO₄ – 0.2; MgSO₄ – 0.2; NaCl – 0.2; K₂SO₄ – 0.2; CaCO₃ – 5.0; голодный агар – 20.0.

Определение численности микроорганизмов в исследуемой почве включало несколько этапов: подготовку почвы к микробному анализу (гомогенизация), приготовление разведений почвенной суспензии в стерильном физиологическом растворе; посев полученных разведений на плотную среду в чашки Петри и подсчёт выросших колоний через 3 – 5 сут. культивирования в термостате при температуре 28 – 30°C (Foght, Aislabie, 2005). Высевы на ГРМ-агар и на селективные среды производили из разведений 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵ в нескольких повторностях. Все данные по численности микроорганизмов были пересчитаны на воздушно-сухие образцы.

Определение ТМ в почве проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной атомизацией на спектрофотометре «Квант-2АТ» (ООО «КОРТЭК», Россия). Подвижные кислоторастворимые формы металлов (Cu, Zn, Ni, Pb) определяли в вытяжках 1 М HNO₃ (РД 52.18.191-89).

Все полученные экспериментальные данные подвергали статистической обработке. Для этого полученные цифровые значения проверяли на нормальность распределения по критерию Колмогорова – Смирнова. Сравнение средних проводили с использованием теста Фишера и показателя наименьшей существенной разницы ($p \leq 0.05$) в однофакторном анализе дисперсии (ANOVA). Корреляционный анализ взаимосвязей между микробиологическими и эколого-геохимическими свойствами почв проводили с помощью расчёта коэффициента Пирсона (r).

Для обработки и анализа данных использовали пакет STATISTICA 13.0 (TIBCO Software Inc. 2017, Statsoft Russia).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Контроль качества окружающей среды по биоиндикаторным организмам в настоящее время признан актуальным экологически ориентированным научным подходом. Несмотря на существенное влияние сезонных факторов на почвенные микроорганизмы, общая численность гетеротрофных микроорганизмов и численность микроорганизмов отдельных физиологических групп являются надёжными индикаторами состояния почв в процессе урботрансформации (Sumatpouh, Risjani, 2014). Центральное положение в области почвенной микробиологии занимает цикл превращений азотсодержащих соединений в почве, тесно связанный с развитием и биохимической деятельностью аммонифицирующих, нитрифицирующих, денитрифицирующих и азотфиксирующих микроорганизмов (Grzyb et al., 2021). Различия в составе и численности микроорганизмов, участвующих в процессах метаболизма азота в почвах, могут служить основой биоиндикационной оценки влияния на почву техногенных загрязнителей.

Многие физиологические группы почвенных микроорганизмов проявляют чувствительность по отношению к нефтяным углеводородам (Саксонов и др., 2005; Коршунова и др., 2019). Характер воздействия нефтяного загрязнения на почвенные микроорганизмы определяется длительностью воздействия нефти или нефтесодержащих отходов и особенностями почвы, главным образом, её естественной буферностью. Нефть содержит как компоненты, легко усваиваемые микроорганизмами (источник энергии), так и усложняющие и замедляющие биологические процессы. Вследствие этого нефтяное загрязнение может вызывать как усиление активности микроорганизмов определённых групп, так и их угнетение. Почвенные микроорганизмы отвечают на нефтяное загрязнение повышением валовой численности и усилением активности, связанным, по мнению авторов (Колесников и др., 2007), с поступлением в почву дополнительного количества доступного микроорганизмам органического вещества. Кроме того, возможно, что токсические соединения, содержащиеся в нефти и нефтепродуктах, аккумулируясь на поверхности микробной клетки в нелетальных концентрациях, изменяют проницаемость мембраны, нарушают её барьерные функции, что определяет свободное поступление пищи в клетку и усиление метаболизма. В дальнейшем различные группы микроорганизмов по-разному реагируют на присутствие нефти: количество гетеротрофных, азотфиксирующих, аммонифицирующих, денитрифицирующих, углеводородокисляющих, спорообразующих бактерий, грибов, дрожжей, актиномицетов возрастает, нитрифицирующих, целлюлозоразрушающих – снижается, других остаётся постоянным (Рогозина, Шиманский, 2007; Мелехина и др., 2015).

Общая численность микроорганизмов, как правило, достаточно чётко отражает микробиологическую активность почвы, скорость разложения органических веществ и круговорота минеральных элементов. На основании данного показателя можно не только судить о степени загрязнённости почвы нефтью, но и о потенци-

альной способности почвы к восстановлению, а также о процессах разложения нефти в естественных природных условиях и при рекультивации загрязнённых почв (Малыхина и др., 2016). Численность гетеротрофных микроорганизмов в загрязнённой УВ почве является важным диагностическим параметром, потому что почвенная микрофлора активно участвует в процессах естественной деструкции углеводов.

Выступая в роли экотоксикантов, УВ могут ингибировать аборигенную почвенную микрофлору (Galitskaya et al., 2015). Рядом авторов показано, что углеводородное загрязнение почвы вызывает снижение количества гетеротрофных бактерий (Kucharski et al., 2010; Adesina, Adelasoye, 2014). Было показано (Nazim, Al-Ani, 2019), что керосин, дизельное топливо, смазочное масло и отработанное смазочное масло в концентрациях 5 и 10% значительно снижали количество гетеротрофных бактерий, наблюдалась обратная зависимость между концентрацией загрязняющих веществ и количеством гетеротрофных бактерий.

По данным проведённого нами геохимического анализа средняя концентрация подвижных форм ТМ в фоновых пробах была значительно ниже ПДК (в десятки и сотни раз), составляя: Cu и Ni – 0.18 мг/кг, Zn – 0.04 мг/кг; Pb – 0.61 мг/кг почвы. На исследованной территории г. Когалыма в 12 пробах подвижные формы Cu превышали ПДК (3.0 мг/кг) (Кузнецов и др., 1992). Выделялся один из районов города, расположенный в восточной части исследованной территории, в промышленной зоне, в котором отмечено превышение над ПДК в большинстве проб. В пробе № 38 превышение было максимальным (3.85 ПДК). В 14 пробах подвижные формы Ni превышали ПДК (4.0 мг/кг) (ГН 2.1.7.2041-06). В том же Восточном промышленном районе были сосредоточены почвы с повышенным содержанием подвижных форм Ni. В пробе № 47, находящейся на востоке территории, показано максимальное превышение над ПДК (в 2.2 раза). Во всех пробах обнаружены подвижные формы Pb от 0.08 до 2.93 мг/кг почвы, которые не превышали ПДК (6.0 мг/кг почвы) (ГН 2.1.7.2041-06). Во всех пробах обнаружены подвижные формы Zn в концентрации от 1.76 до 26.01 мг/кг почвы. Только в трёх пробах (№ 28, 33 и 38) концентрация подвижных форм Zn незначительно превышала ПДК (23.0 мг/кг почвы) (СанПиН 42-128-4433-87). Максимальная концентрация отмечена в пробе № 38, в которой было обнаружено также и максимальное содержание подвижных форм Cu.

Установлено (Багаева и др., 2013), что низкие концентрации ТМ в почве могут стимулировать рост и активность метаболических процессов у микроорганизмов и увеличивать микробную биомассу, а в более высоких концентрациях становятся токсичными и могут способствовать уменьшению микробной биомассы. ТМ способны ингибировать и блокировать отдельные процессы метаболизма почвенных бактерий (Сорокин и др., 2009), снижая их численность. Под действием ТМ может происходить ингибирование брожения, подавляться фотосинтез и азотфиксация. Показано значительное ингибирование нитрификации при содержании свинца и цинка в почве, равном 0.1%, никеля – 0.5%. Установлено, что медь и кадмий ингибируют процессы денитрификации. Высокие дозы меди, магния, цинка, хрома снижают активность аммонификации и нитрификации.

В то же время показано, что ТМ могут стимулировать развитие олигонитрофильных, споровых, аммонифицирующих, денитрифицирующих бактерий, актиномицетов и мицелиальных микроорганизмов в загрязнённых почвах (Мынбаева и др., 2013). Эффект, оказываемый загрязнением на микробиологические процессы, зависит от состава поступающих в почву веществ, интенсивности загрязнения, буферной способности почв. Установлено, что полиметаллическое загрязнение всегда оказывает более заметный эффект, чем загрязнение индивидуальным ТМ (Su et al., 2014).

Среднее количество культивируемых аэробных гетеротрофных микроорганизмов в фоновых почвенных пробах, как показали наши исследования, составило 5.1×10^4 КОЕ/г почвы, а в городских почвах изученной территории было в 3 раза выше – 1.5×10^5 КОЕ/г почвы. Данные почвы не отличаются богатством гетеротрофных микроорганизмов по шкале Д. Г. Звягинцева (1978), различия между значениями в фоновых пробах и урбопочвах не существенны и согласуются с известными сведениями о том, что в естественных почвах численность гетеротрофных бактерий ниже, чем в антропогенно-преобразованных почвах (Мишустин, 1975). Исследования, проведённые в почвах подтаёжных зон (Загуральская, 1993; Федорец, Бахмет, 2003), показали, что такие почвы бедны микроорганизмами, в них преобладают бактериально-грибные ценозы. В центральной селитебной части г. Когалыма в трёх пробах (№ 1, 2 и 3) количество гетеротрофных микроорганизмов находилось на высоком уровне: 1.0×10^8 КОЕ/г почвы, обусловленное, по всей видимости, поступлением в почву дополнительных субстратов для микроорганизмов биологического или синтетического происхождения.

Цикл превращений азотсодержащих соединений в почве неразрывно связан с развитием и биохимической деятельностью аммонифицирующих микроорганизмов. Аммонификаторы разлагают азотсодержащие соединения на более простые, которые осмотическим путём проникают в клетки микроорганизмов и под действием внутриклеточных ферментов подвергаются дезаминированию. Аммонификации подвергаются все белковые вещества, содержащиеся в почве. Аммонификаторы, как правило, разлагают легкодоступное азотсодержащее органическое вещество почвы. Процесс аммонификации неспецифичен, его способны проводить различные микроорганизмы, чаще всего представители родов *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Serratia*, а также *Proteus vulgaris*, *Escherichia coli*.

Результаты настоящих исследований показали, что почвы территории г. Когалыма по уровню обогащённости по шкале Д. Г. Звягинцева (1978) очень обеднены ($< 1 \times 10^6$ КОЕ/г почвы) и обеднены ($1 - 2 \times 10^6$ КОЕ/г почвы) бактериями-аммонификаторами (рис. 2). Количество аммонифицирующих микроорганизмов в большинстве почвенных микробоценозов составляло от 2.0×10^4 до 1.0×10^6 КОЕ/г почвы. Обнаруживалось несколько аномальных участков в селитебной части города с крайне высокой численностью аммонификаторов: пробы № 1, 3 (3.0×10^8 КОЕ/г почвы) и проба № 11 (5.0×10^8 КОЕ/г почвы), возможно, связанной с загрязнением почвы веществами не техногенного происхождения. Хотя не исключено и влияние ксенобиотиков. Активизация процессов аммонификации свидетельствует об интенсификации процессов обмена азотсодержащих органических веществ.

Авторами (Колесников и др., 2007; Середина и др., 2017) сообщалось об увеличении численности аммонифицирующих микроорганизмов в нефтезагрязнённой почве в 2 – 5 раз и более. Биологическое превращение соединений аммония непосредственно связано с соотношением легкодоступного углерода в почве и азота (C/N). Если в почве это соотношение очень широко, то происходит сравнительно быстрое увеличение численности и массы аммонифицирующих микроорганизмов. В Северной и Восточной промышленной зоне города, как видно из рис. 2, содержание аммонификаторов было минимальным. В пробах № 33, 44 и 45 численность аммонифицирующих микроорганизмов была самой низкой. Наши исследования показали, что среднее содержание аммонифицирующих микроорганизмов в фоновых пробах составляло 6.5×10^4 КОЕ/г почвы. В целом, в изученных почвах г. Когалыма численность аммонификаторов была в среднем в 3 раза выше, чем в неокультуренных почвах, что согласуется с литературными данными (Мишустин, 1975).

Денитрификаторы – группа микроорганизмов, которая приводит к восстановлению нитратов до закиси азота или молекулярного азота. Данный процесс обычно происходит при уменьшении содержания кислорода в почве (Кутовая и др., 2019). Развитию в загрязнённых почвах денитрификаторов способствует избыток органической массы, слабощелочная реакция среды и микробиологический фактор – низкий окислительно-восстановительный потенциал. Э. Р. Рахимовой с соавторами (2004) было показано, что в нефтезагрязнённой почве численность денитрифицирующих микроорганизмов возрастала в связи с созданием в загрязнённой почве анаэробных условий.

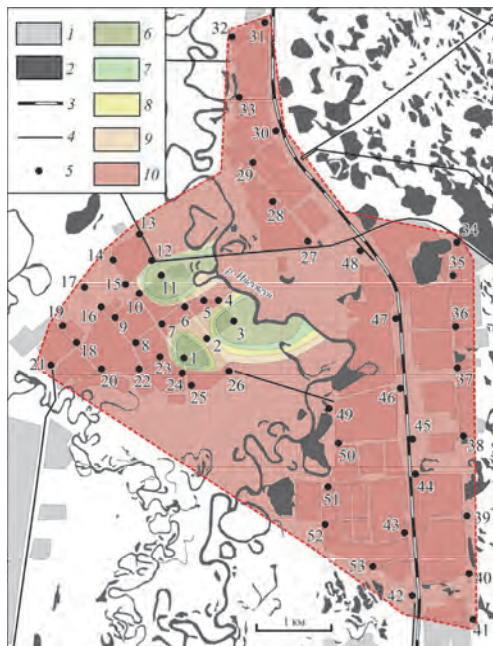


Рис. 2. Характер распределения содержания аммонифицирующих микроорганизмов ($\log$ числа микроорганизмов/г почвы) в почвах г. Когалыма: 1 – кварталы застройки, 2 – водные объекты, 3 – железная дорога, 4 – автодорога, 5 – площадки опробования. Степень обогащённости почвы аммонифицирующими микроорганизмами: 6 – очень богатая (>7.0), 7 – богатая (6.7 – 7.0), 8 – средняя (6.3 – 6.7), 9 – обеднена (6.0 – 6.3), 10 – очень обеднена (<6.0)

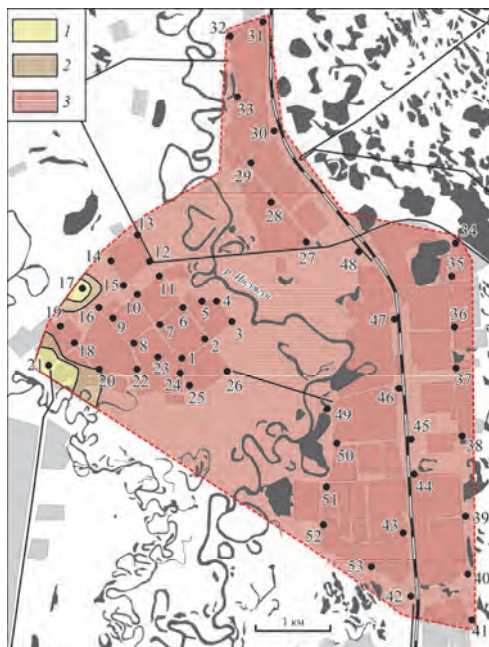
Fig. 2. Pattern of the distribution of the amount of ammonifying microorganisms ($\log$ of the number of microorganisms/g of soil) in the soils of Kogalym: 1 – building districts, 2 – water sites, 3 – railway, 4 – highway, 5 – testing sites. The degree of soil enrichment with ammonifying microorganisms: 6 – very rich (>7.0), 7 – rich (6.7–7.0), 8 – medium (6.3–6.7), 9 – depleted (6.0–6.3), 10 – very depleted (<6.0)

Известно, что нефтяное загрязнение резко снижает активность фермента нитратредуктазы в почве, который катализирует восстановление нитратного азота в почве до аммиака. При этом ингибирующее влияние нефтяных УВ на активность фермента «компенсируется» увеличением численности денитрификаторов, что способствует сохранению скорости процесса денитрификации в загрязнённой почве. С точки зрения круговорота азота, усиление процесса денитрификации – нежелательное явление, так как происходит обеднение почвы азотом. С другой стороны, вовлекая в окислительный метаболизм продукты частичного окисления углеводородов при сопряжённом восстановлении нитратов, денитрификаторы участвуют в процессах биодegradации.

Среднее содержание денитрифицирующих микроорганизмов в фоновых пробах составляло 7.0×10^4 КОЕ/г почвы. По уровню обогащённости по шкале Д. Г. Звягинцева (1978) данные почвы очень обеднены ($< 1 \times 10^6$ КОЕ/г почвы) денитрифицирующими микроорганизмами. Нами было установлено, что урбопочвы территории г. Когалыма тоже очень обеднены денитрификаторами (рис. 3). Этот микробиологический показатель не сильно варьировал в городских почвах изученной территории и не отличался заметно от значений в фоновых пробах. В среднем в городских почвах численность денитрифицирующих микроорганизмов была в 1.3 раза ниже, чем в фоновых пробах. Лишь три участка в селитебной центральной части города характеризовались повышенными значениями: пробы № 17, 20 и 21 ($1 - 5 \times 10^6$ КОЕ/г почвы). Так же, как и количество аммонифицирующих микроорганизмов, пониженное содержание денитрифицирующих микроорганизмов обнаруживалось в промышленных зонах на востоке и северо-востоке территории с минимальным количеством в пробах № 28, 38, 39, 43 и 44.

Рис. 3. Характер распределения содержания денитрифицирующих микроорганизмов (log числа микроорганизмов/г почвы) в почвах г. Когалыма. Степень обогащённости почвы денитрифицирующими микроорганизмами: 1 – средняя (6.3–6.7), 2 – обеднена (6.0–6.3), 3 – очень обеднена (< 6.0)

Fig. 3. Pattern of the distribution of the amount of denitrifying microorganisms (log of the number of microorganisms/g of soil) in the soils of Kogalym. The degree of soil enrichment with denitrifying microorganisms: 1 – medium (6.3–6.7), 2 – depleted (6.0–6.3), 3 – very depleted (< 6.0)



Нитрификаторы – микроорганизмы, которые осуществляют аэробное окисление аммиака и нитритов до азотистой кислоты или её самой далее до азотной кислоты в процессе нитрификации (Rana et al., 2019).

В ряде исследований показано, что почвы северотаёжной и среднетаёжной подзоны бедны микроорганизмами, как в количественном, так и в качественном отношении (Загуральская, 1993; Евдокимова, 1995). В связи с климатическими особенностями, а также физическими и химическими свойствами почвы формируются чрезвычайно малочисленные микробоценозы с крайне ограниченными деятельностью и функциями. Отсутствуют нитрификаторы, очень незначительно представлены денитрификаторы. Азотфиксирующие бактерии представлены анаэробными формами, численность их невелика. Было показано (Середина и др., 2017), что в неблагоприятных гидротермических условиях в торфяных почвах преобладают восстановительные процессы, и минерализация белковых веществ заканчивается на стадии образования аммиака. Неблагоприятные физические, химические и температурные условия угнетают деятельность нитрифицирующих бактерий, в результате чего образовавшийся аммиак не подвергается окислению, с чем связано крайне низкое, а иногда и полное отсутствие нитратного азота в торфяных почвах.

Известно, что нитрифицирующие бактерии являются наиболее чувствительными к воздействию нефти (Габбасова, 2004; Сулейманов, 2005). Снижение их численности в условиях загрязнения связано с тем, что в почве создается неблагоприятный для них воздушный режим. Депрессия нитрификационного процесса является своеобразным механизмом ауторегуляции биохимических процессов в условиях значительного расширения соотношения C:N, который заключается в направлении круговорота азота по более короткозамкнутому циклу. Снижение интенсивности процессов нитрификации может происходить и под влиянием высоких концентраций ТМ (Евдокимова, 2014).

Численность нитрифицирующих микроорганизмов, как в городских, так и в фоновых пробах изученных нами почв была низкой, составляя менее 1000 КОЕ/г почвы. Только в двух пробах городских почв центральной селитебной зоны г. Когалыма (№ 4 и 15) были выявлены нитрифицирующие микроорганизмы в количестве 4.0×10^4 и 2.0×10^5 КОЕ/г почвы соответственно.

Азотфиксаторы (дiazотрофы) – микроорганизмы, способные переводить молекулярный азот из воздуха в соединения, доступные для большинства организмов (Bagali, 2012). Промышленное загрязнение может как подавлять, так и стимулировать интенсивность азотфиксации. Высокие концентрации ТМ подавляют азотфиксирующую активность почвенных микроорганизмов. Наоборот, показано увеличение видового разнообразия и численности азотфиксирующих микроорганизмов в ответ на нефтяное загрязнение почвы (Елин, 2002).

При исследовании почв территории г. Когалыма обнаружено, что количество азотфиксирующих микроорганизмов, согласно шкале Д. Г. Звягинцева (1978), соответствует очень бедному ($< 2 \times 10^6$ КОЕ/г почвы) и бедному ($2 - 4 \times 10^6$ КОЕ/г почвы) уровню обогащённости (рис. 4). Их содержание в большинстве почвенных микробоценозов составляло от 5.0×10^4 до 2.0×10^6 КОЕ/г почвы. Обнаруживалось

несколько аномальных участков в селитебной части города с повышенной численностью азотфиксаторов: пробы № 2 и 14 (5.0×10^6 КОЕ/г почвы); пробы № 12 и 19 (1.0×10^7 КОЕ/г почвы). В Восточной промышленной зоне наблюдалось сниженное содержание азотфиксаторов с минимальным количеством в пробах № 40, 41 и 45. Среднее содержание азотфиксирующих микроорганизмов в фоновых пробах составляло 4.0×10^4 КОЕ/г почвы, что было значительно ниже (примерно в 44 раза), чем в большинстве ценозов городских почв.

В результате проведённого нами корреляционного анализа (таблица) была обнаружена сильная положительная взаимосвязь между ОЧГМ и количеством аммонифицирующих микроорганизмов ($r = 0.84$, $p \leq 0.05$); невысокая прямая корреляции ($r = 0.32$, $p \leq 0.05$) между ОЧГМ и количеством азотфиксирующих микроорганизмов; а также между содержанием денитрифицирующих и азотфиксирующих микроорганизмов.

Установлена значимая отрицательная корреляция между количеством денитрифицирующих микроорганизмов и содержанием в почве ТМ: Ni и Cu; невысокая отрицательная корреляция выявлена между количеством денитрифицирующих микроорганизмов и содержанием в почве Zn; между количеством аммонифицирующих микроорганизмов и содержанием в почве ТМ: Zn, Ni и Cu; между количеством азотфиксирующих микроорганизмов и содержанием в почве Ni. Невысокая прямая корреляция обнаружена между количеством азотфиксирующих микроорганизмов и содержанием в почве Pb.

Согласно полученным диагностическим показателям, с экологической точки зрения почвенные микробценозы территории г. Когалыма сильно не повреждены. Наиболее заметные различия между естественными и городскими почвами прослеживались для азотфиксирующих микроорганизмов, которых в естественных почвах было в среднем в 44 раза меньше, чем в урбопочвах Когалыма. В то же

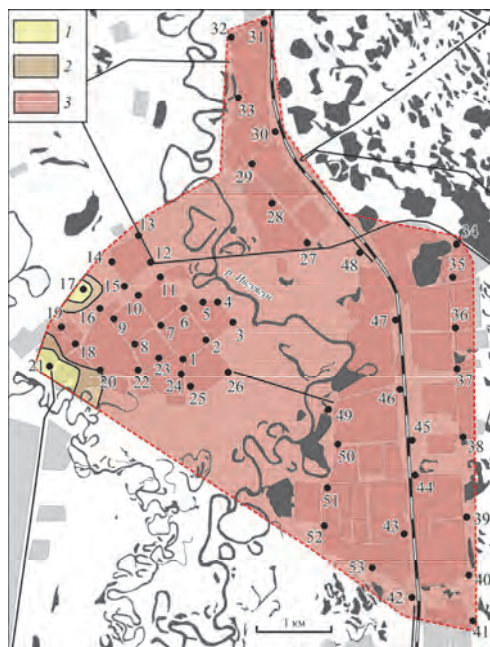


Рис. 4. Характер распределения содержания азотфиксирующих микроорганизмов (log числа микроорганизмов/г почвы) в почвах г. Когалыма. Степень обогащённости почвы азотфиксирующими микроорганизмами: 1 – средняя (6.6 – 7.0), 2 – обеднена (6.3 – 6.6), 3 – очень обеднена (<6.3)

Fig. 4. Pattern of the distribution of the amount of denitrifying microorganisms (log of the number of microorganisms/g of soil) in the soils of Kogalyma. The degree of soil enrichment with nitrogen-fixing microorganisms: 1 – medium (6.6–7.0), 2 – depleted (6.3–6.6), 3 – very depleted (<6.3)

время не было обнаружено сильных различий в численности гетеротрофных, аммонифицирующих, денитрифицирующих и нитрифицирующих микроорганизмов, которые могли бы наблюдаться при значительном воздействии на почву техногенных загрязнителей.

Корреляция между микробиологическими и геохимическими показателями почвы

Table. Correlation between microbiological and geochemical soil parameters

Показатель / Parameter	C_{Ni}	C_{Pb}	C_{Zn}	C_{Cu}	ОЧГМ / TNHM	Численность / Number		
						АФМ / NFM	АММ / AMM	ДНМ / DNM
C_{Ni}	1	–	–	–	–	-0.35*	-0.35*	-0.53*
C_{Pb}	–	1	–	–	–	0.36*	0.10	0.20
C_{Zn}	–	–	1	–	–	0.23	-0.38*	-0.33*
C_{Cu}	–	–	–	1	–	-0.25	-0.32*	-0.44*
ОЧГМ / TNHM	–	–	–	–	1	0.32*	0.04	0.02
Численность / Number								
АФМ / NFM	–	–	–	–	0.29	1	0.22	0.32*
АММ / AMM	–	–	–	–	0.84*	–	1	0.21
ДНМ / DNM	–	–	–	–	0.25	–	–	1

Примечания. *Значимая корреляция, при r , соответствующем уровню статистической значимости при $p \leq 0.05$. Сокращения: C – концентрация металла; ОЧГМ – общая численность гетеротрофных микроорганизмов; АФМ – азотфиксирующие микроорганизмы; АММ – аммонифицирующие микроорганизмы; ДНМ – денитрифицирующие микроорганизмы.

Notes. *Significant correlation, with r corresponding to the level of statistical significance when $p \leq 0.05$. Abbreviations: C – metal concentration; TNHM – total number of heterotrophic microorganisms; NFM – nitrogen-fixing microorganisms; AMM – ammonifying microorganisms; DNM – denitrifying microorganisms.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнивая средние значения изученных микробиологических показателей, можно отметить, что в фоновых пробах максимальной численностью обладают денитрифицирующие микроорганизмы, в почвах г. Когалыма – азотфиксирующие микроорганизмы. На основе полученных данных был установлен ряд содержания микроорганизмов в почвах г. Когалыма: азотфиксаторы > аммонификаторы > гетеротрофы > денитрификаторы; в фоновых пробах: денитрификаторы > аммонификаторы > гетеротрофы > азотфиксаторы.

Согласно данным эколого-геохимического анализа содержание подвижных форм Pb в почве города Когалыма и Zn (в большинстве проб) было в пределах нормы. В то же время содержание подвижных форм Ni и Cu превышало ПДК в восточной части городской территории. Снижение количества денитрифицирующих микроорганизмов в микробоценозах почв г. Когалыма по сравнению с фоновой территорией и наличие достоверной обратной корреляции с содержанием подвижных форм Ni и Cu указывает на возможное негативное действие данных ТМ на развитие денитрификаторов. Отсутствие заметной разницы в содержании гетеротрофных, аммонифицирующих, денитрифицирующих и нитрифицирующих микроорганизмов в городских почвах и фоновых пробах свидетельствует об от-

сутствии сильного влияния загрязнителей на территории города. Точечные аномальные зоны с высокими значениями численности микроорганизмов изученных физиологических групп были обнаружены не в промышленной, а в селитебной части города, и, скорее всего, не связаны с техногенным загрязнением. Повышенная численность азотфиксирующих микроорганизмов в почвах селитебной центральной части города, вероятно, связана с искусственным озеленением городской территории, развитием ризосферных и симбиотических микроорганизмов. Таким образом, согласно проведённым исследованиям, почвы территории г. Когалыма слабо загрязнённые и не представляют опасности для человека. В то же время необходимо отметить, что в Восточном промышленном районе наблюдались наиболее заметные отклонения от средних значений в изученных микробиологических показателях – снижение количества микроорганизмов азотного цикла: аммонифицирующих, денитрифицирующих и азотфиксирующих, особенно в почвенных пробах, отобранных вблизи железной дороги (№ 43 – 45).

Полученные результаты могут послужить основой для последующей системы долгосрочного мониторинга развивающегося города Когалыма, для разработки комплексного подхода при экологическом мониторинге урбосистем и прогнозирования состояния антропогенно нарушенных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багаева Т. В., Ионова Н. Э., Надеева Г. В.* Микробиологическая ремедиация природных систем от тяжелых металлов: учеб.-метод. пособие. Казань: Казанский университет, 2013. 56 с.
- Габбасова И. М.* Деградация и рекультивация почв Башкортостана. Уфа: Гилем, 2004. 284 с.
- Геннадиев А. Н.* Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2016. № 6. С. 30 – 39.
- ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
- ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: Межгосударственные стандарты. М.: Стандартинформ, 2008. 8 с.
- Евдокимова Г. А.* Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 1995. 272 с.
- Евдокимова Г. А.* Почвенная микробиота как фактор устойчивости почв к загрязнению // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 17 – 24.
- Еремченко О. З., Шестаков И. Е., Каменщикова В. И.* Эколого-биологические свойства урбаноземов г. Перми // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2010. Вып. 4. С. 56 – 62.
- Елин Е. С.* Биогеохимическая трансформация нефти – загрязнителя и болотного биогеоценоза при их взаимодействии // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2002. № 3. С. 153 – 166.
- Журавлева А. С., Лабутова Н. М., Андронов Е. Е.* Влияние нефтезагрязнения на микробоценоз почв, прилегающих к нефтехранилищу // Экологическая генетика. 2017. № 4. С. 60 – 68. <https://doi.org/10.17816/ecogen15460-68>

Загуральская Л. М. Микробная трансформация органического вещества в лесных почвах Карелии. СПб.: Наука. Санкт-Петербург. отд-ние, 1993. 136 с.

Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48 – 54.

Звягинцев Д. Г. Почва и микроорганизмы. М.: Изд-во МГУ, 1987. 256 с.

Колесников С. И., Казеев К. Ш., Велигонова Н. В., Патрушева Е. В., Азнаурьян Д. К., Вальков В. Ф. Изменение комплекса почвенных микроорганизмов при загрязнении чернозема обыкновенного нефтью и нефтепродуктами // Агрохимия. 2007. № 12. С. 44 – 48.

Коришунуова Т. Ю., Четвериков С. П., Бакаева М. Д., Кузина Е. В., Рафикова Г. Ф., Четверикова Д. В., Логинов О. Н. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. Т. 55, № 4. С. 338 – 349. <https://doi.org/10.1134/S0555109919040093>

Кузнецов А. В., Фесюн А. П., Самохвалов С. Г., Махонько Э. П. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

Кутюкова О. В., Тхакахова А. К., Семенов М. В., Чернов Т. И., Ксенофонтова Н. А., Железова А. Д., Гаджимаров Р. Г., Стукалов Р. С., Иванова Е. А., Никитин Д. А. Сравнительная оценка влияния нулевой и традиционной обработки на биологическую активность агро-черноземов Ставропольского края // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2019. № 100. С. 159 – 189. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-159-189>

Макаров О. А., Макаров А. А. Подходы к оценке риска химического загрязнения городских почв // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1147 – 1156. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090094>

Малыхина Л. В., Шайдуллина И. А., Антонов Н. А., Сибгатова Д. И., Яппаров А. Х., Дегтярева И. А., Латыпова В. З., Гадиева Э. Ш. Применение новых биотехнологий при рекультивации черноземов со смешанным типом загрязнения // Георесурсы. 2016. Т. 18, № 2. С. 138 – 144.

Мелехина Е. Н., Маркарова М. Ю., Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М., Канев В. В. Восстановительные сукцессии биоты в торфяной почве с нефтяным загрязнением при различных методах биологической рекультивации // Почвоведение. 2015. № 6. С. 740 – 750. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15060076>

Мишустин Е. Н. Ассоциация почвенных микроорганизмов. М.: Наука, 1975. 114 с.

Мынбаева Б. Н., Сейлова Л. Б., Воронова Н. В., Муздыбаева К. К., Амирашев Б. А., Иманбекова Т. Г. Микробиологическая индикация почв г. Алматы, загрязненных тяжелыми металлами // Доклады по экологическому почвоведению. 2013. Вып. 18, № 1. С. 176 – 184.

Напрасникова Е. В., Макарова А. П. Эколого-микробиологическая и биохимическая характеристика почвенного покрова в условиях аэротехногенного загрязнения // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2012. Т. 5, № 2. С. 19 – 26.

Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель, 2011. 632 с.

Нетрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л. М. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с.

Рахимова Э. Р., Осипова А. Л., Зарипова С. К. Очистка почвы от нефтяного загрязнения с использованием денитрифицирующих углеводородокисляющих микроорганизмов // Прикладная биохимия и микробиология. 2004. Т. 40, № 6. С. 649 – 653.

РД 52.18.191-89. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. М.: Государственной комитет СССР по гидрометеорологии, 1990. 32 с.

Рогозина Е. А., Шиманский В. К. Модели изменения почвенных экосистем под действием углеводородного загрязнения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. № 2. С. 27 – 43.

Саксонов М. Н., Абалаков А. Д., Данько Л. В., Бархатова О. А., Балаян А. Э., Стом Д. И. Экологический мониторинг нефтегазовой отрасли. Физико-химические и биологические методы: учеб. пособие. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2005. 114 с.

СанПиН 42-128-4433-87 «Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почвах», утв. заместителем Главного государственного санитарного врача СССР, 30.10.88 № 4433-87; ред. от 07.02.99. М., 1999. 25 с.

Середина В. П., Колесникова Е. В., Кондыков В. А., Непотребный А. И., Огнев С. А. Особенности влияния нефтяного загрязнения на почвы средней тайги Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. 2017. № 5. С. 108 – 112. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-5-108-112>

Соколов С. С., Сторчак Т. В., Тихомиров Я. Н. Разработка информационно-аналитической системы экологического мониторинга для слежения за текущим состоянием окружающей среды на территории нефтяных месторождений // Бюллетень науки и практики. 2017. № 4 (17). С. 170 – 183. <https://doi.org/10.5281/zenodo.546288>

Сорокин Н. Д., Гродницкая И. Д., Шапченко О. А., Евграфова С. Ю. Экспериментальная оценка устойчивости почвенного микробоценоза при химическом загрязнении // Почвоведение. 2009. № 6. С. 701 – 707.

Сулейманов Р. Р., Габбасова И. М., Ситдииков Р. Н. Изменение свойств нефтезагрязнённой серой лесной почвы в процессе биологической рекультивации // Известия РАН. Серия биологическая. 2005. № 1. С. 109 – 115.

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. 240 с.

Фокина А. И., Аишхмина Т. Я., Домрачева Л. И., Горностаева Е. А., Огородникова С. Ю. Тяжелые металлы как фактор изменения метаболизма у микроорганизмов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 5 – 17.

Adesina G. O., Adelasoye K. A. Effect of crude oil pollution on heavy metal contents, microbial population in soil, and maize and cowpea growth // Agricultural Sciences. 2014. Vol. 5, iss. 1. P. 43 – 50. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.51004>

Bagali S. S. Review: nitrogen fixing microorganisms // International Journal of Microbiological Research. 2012. Vol. 3, iss. 1. P. 46 – 52. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijmr.2012.3.1.61103>

Foght J., Aislabie J. Enumeration of soil microorganisms // Manual for Soil Analysis – Monitoring and Assessing Soil Bioremediation / eds. R. Margesin, F. Schinner. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. P. 261 – 280.

Friedlová M. The influence of heavy metals on soil biological and chemical properties // Soil and Water Research. 2010. Vol. 5, iss. 1. P. 21 – 27. <https://doi.org/10.17221/11/2009-SWR>

Fu J., Wang Q., Wang H., Yu H., Zhang X. Monitoring of non-destructive sampling strategies to assess the exposure of avian species in Jiangsu Province, China to heavy metals // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21, iss. 4. P. 2898 – 2906. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2242-4>

Galitskaya P., Gumerova R., Ratering S., Schnell S., Blagodatskaya E., Selivanovskaya S. Oily waste containing natural radionuclides: does it cause stimulation or inhibition of soil bacterial community? // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2015. Vol. 178, № 6. P. 825 – 833. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400641>

Grzyb A., Wolna-Maruwka A., Niewiadomska A. The significance of microbial transformation of nitrogen compounds in the light of integrated crop management // Agronomy. 2021. Vol. 11, № 7. Article number 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071415>

Hazim R. N., Al-Ani M. A. Effect of petroleum hydrocarbons contamination on soil microorganisms and biodegradation // *Rafidain Journal of Science*. 2019. Vol. 28, iss. 1. P. 13 – 22. <https://doi.org/10.33899/rjs.2019.159391>

Kucharski J., Tomkiel M., Boros E., Wyszowska J. The effect of soil contamination with diesel oil and petrol on the nitrification process // *Journal of Elementology*. 2010. Vol. 15, iss. 1. P. 111 – 118. <https://doi.org/10.5601/jelem.2010.15.1.111-118>

Murata T., Kanao-Koshikawa M., Takamatsu T. Effects of Pb, Cu, Sb, Zn and Ag contamination on the proliferation of soil bacterial colonies, soil dehydrogenase activity, and phospholipid fatty acid profiles of soil microbial communities // *Water, Air and Soil Pollution*. 2005. Vol. 164. P. 103 – 118.

Mustafa A. D., Juahir H., Yunus K., Amran M. A., Hasnam C. N. C., Azaman F., Abidin I. Z., Azmee S. H., Sulaiman N. H. Oil spill related heavy metal: a review // *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. 2015. Vol. 19, iss. 6. P. 1348 – 1360.

Rana A., Kumar R. P., Ramakrishnan B. Enzymology of the nitrogen cycle and bioremediation of toxic nitrogenous compounds // *Smart Bioremediation Technologies: Microbial Enzymes* / ed. P. Bhatt. London: Academic Press, 2019. P. 45 – 61. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818307-6.00003-2>

Su C., Jiang L., Zhang W. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques // *Environmental Skeptics and Critics*. 2014. Vol. 3, iss. 2. P. 24 – 38.

Sumampouw O. J., Risjani Y. Bacteria as indicators of environmental pollution: Review // *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*. 2014. Vol. 4, iss. 6. P. 251 – 258. <https://doi.org/10.5923/j.ije.20140406.03>

Terekhova V. A., Shitikov V. K., Ivanova A. E., Kydralieva K. A. Assessment of the ecological risk of technogenic soil pollution on the basis of the statistical distribution of the occurrence of micromycete species // *Russian Journal of Ecology*. 2017. Vol. 48, iss. 5. P. 417 – 424. <https://doi.org/10.1134/S1067413617050125>

Wolińska A., Kuźniar A., Szafranek-Nakoneczna A., Jastrzębska N., Roguska E., Stępniewska Z. Biological activity of autochthonic bacterial community in oil-contaminated soil // *Water, Air and Soil Pollution*. 2016. Vol. 227. Article number 130. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2825-z>

Microbiological assessment of the state of urban soils of the oil and gas region on the example of the territory of Kogalym

Y. V. Pleshakova ^{1✉}, E. V. Glinskaya ¹, A. S. Korobeinikova ¹,
D. M. Golubev ¹, A. Sh. Sheudzhen ², M. V. Reshetnikov ²

¹ Saratov State University

83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

² LLC "LUKOIL-Engineering"

19 Central'naya St., Kogalym 628486, Russia

Received: April 10, 2023 / revised: May 17, 2023 / accepted: May 17, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. In the course of this work, the total numbers of heterotrophic microorganisms and the numbers of microbes participating in the nitrogen cycle (ammonifying, denitrifying, nitrifying and nitrogen-fixing ones) in urban and natural (background) soils of Kogalym were estimated. A relation between the obtained results with geochemical indicators was revealed. Our microbiological analysis showed the predominance of nitrogen-fixing microorganisms in urban soils (5.0×10^4 – 2.0×10^6 CFU/g of soil), which were on average 44 less than in natural soils. In the last ones the average number of denitrifying microorganisms was 7.0×10^4 CFU/g of soil, exceeding 1.3 times their number in urban soils. Based on the information obtained, microbial contents in the soils of Kogalym were established as a row: nitrogen fixators > ammonifiers > heterotrophs > denitrifiers; in background samples: denitrifiers > ammonifiers > heterotrophs > nitrogen fixators. According to the data of ecological and geochemical analysis, an excess of the MPC of mobile forms of heavy metals, such as Cu, Ni and Zn, was revealed in the Eastern Industrial zone of the city. A significant inverse correlation was revealed between the number of denitrifying microorganisms in the Kogalym soil microbiocenoses and the content of mobile Ni and Cu forms, which points to a possible negative effect of these metals on the development of denitrifiers. The minimum number of ammonifying, denitrifying and nitrogen-fixing microorganisms was found in the Eastern Industrial zone, especially in the soil samples that were taken near the railway. On the whole, the absence of noticeable differences in the microorganisms' content of the studied groups in urban and natural soils indicates a low level of soil pollution in Kogalym. The obtained results represent the basis for subsequent ecological monitoring of the soils in the city and adjacent oil-producing areas, forecasting the environmental consequences of anthropogenic activities in these territories.

Keywords: soil pollution, heavy metals, heterotrophic, ammonifying, denitrifying, nitrifying and nitrogen-fixing microorganisms

For citation: Pleshakova Y. V., Glinskaya E. V., Korobeinikova A. S., Golubev D. M., Sheudzhen A. Sh., Reshetnikov M. V. Microbiological assessment of the state of urban soils of the oil and gas region on the example of the territory of Kogalym. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 352–373 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-352-373>

✉ Corresponding author. Department of Biochemistry and Biophysics of Saratov State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Yekaterina V. Pleshakova: <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>, plekat@yandex.ru; Elena V. Glinskaya: <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>, elenavg-2007@yandex.ru; Anastasija S. Korobeinikova: <https://orcid.org/0000-0002-3157-693X>, korobeinikovaanastasija@yandex.ru; Dmitry M. Golubev: <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>, dimagolubev2018@yandex.ru; Aleksandr Sh. Sheudzhen: <https://orcid.org/0000-0002-0000-2909>, Aleksandr.Sheudzhen@luoil.com; Michael V. Reshetnikov: <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>, rmv85@list.ru.

REFERENCES

- Bagaeva T. V., Ionova N. E., Nadeeva G. V. *Mikrobiologicheskaya remediatsiya prirodnikh sistem ot tiazhelykh metallov: uchebno-metodicheskoe posobie* [Microbiological Remediation of Natural Systems from Heavy Metals: Teaching Aid]. Kazan, Kazan University Publ., 2013. 56 p. (in Russian).
- Gabbasova I. M. *Degradatsiya i rekultivatsiya pochv Bashkortostana* [Degradation and Reclamation of Soils in Bashkortostan]. Ufa, Gilem, 2004. 284 p. (in Russian).
- Gennadiev A. N. Oil and environment. *Bulletin of Moscow University, Series 5: Geography*, 2016, no. 6, pp. 30–39 (in Russian).
- GN 2.1.7.2041-06. *Maximum Permissible Concentrations (MPC) and Approximate Permissible Concentrations (MPC) of Chemicals in the Soil: Hygienic standards*. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2006. 15 p. (in Russian).
- GOST 17.4.4.02-84. *Protection of Nature. The Soils. Methods of Sampling and Sample Preparation for Chemical, Bacteriological, Helminthological Analysis: Interstate Standards*. Moscow, Standardinform Publ., 2008. 8 p. (in Russian).
- Evdokimova G. A. *Ekologo-mikrobiologicheskie osnovy okhrany pochv Krainego Severa* [Ecological and Microbiological Bases of Soil Protection in the Far North]. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 1985. 272 p. (in Russian).
- Evdokimova G. A. Soil microbiota as a factor in soil resistance to pollution. *Theoretical and Applied Ecology*, 2014, no. 2, pp. 17–24 (in Russian).
- Eremchenko O. Z., Shestakov I. E., Kamenshchikova V. I. Ecological and biological properties of urbanozems in Perm. *Bulletin of the Udmurt University. Biology, Earth Sciences*, 2010, iss. 4, pp. 56–62 (in Russian).
- Elin E. S. Biogeochemical transformation of oil – a pollutant and swamp biogeocenosis during their interaction. *Bulletin of Ecology, Forest Science and Landscape Science*, 2002, no. 3, pp. 153–166 (in Russian).
- Zhuravleva A. S., Labutova N. M., Andronov E. E. Influence of oil pollution on the microbiocenosis of soils adjacent to the oil storage. *Ecological Genetics*, 2017, no. 4, pp. 60–68 (in Russian). <https://doi.org/10.17816/ecogen15460-68>
- Zagural'skaia L. M. *Microbial Transformation of Organic Matter in Forest Soils of Karelia*. Saint Petersburg, Nauka, 1993. 136 p. (in Russian).
- Zviagintsev D. G. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. *Pochvovedenie*, 1978, no. 6, pp. 48–54 (in Russian).
- Zviagintsev D. G. *Pochva i mikroorganizmy* [Soil and Microorganisms]. Moscow, Moscow State University Press, 1987. 256 p. (in Russian).
- Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., Veligonova N. V., Patrusheva E. V., Aznaur'ian D. K., Val'kov V. F. Changes in the complex of soil microorganisms under the contamination of common chernozem with oil and oil products. *Agrokimiya*, 2007, no. 12, pp. 44–48 (in Russian).
- Korshunova T. Iu., Chetverikov S. P., Bakaeva M. D., Kuzina E. V., Rafikova G. F., Chetverikova D. V., Loginov O. N. Microorganisms in the aftermath of oil pollution. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 338–349 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0555109919040093>
- Kuznetsov A. V., Fesiun A. P., Samokhvalov S. G., Makhonko E. P. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniiu tiazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodii i produkcii rastenievodstva* [Methodological Guidelines for the Determination of Heavy Metals in the Soils of Agricultural Land and Crop Products]. Moscow, Central Institute of Agrochemical Service for Agriculture Publ., 1992. 61 p. (in Russian).
- Kutovaya O. V., Tkhakakhova A. K., Semenov M. V., Chernov T. I., Ksenofontova N. A., Zhelezova A. D., Gadzhumarov R. G., Stukalov R. S., Ivanova E. A., Nikitin D. A. Comparative

evaluation of the influence of no-till and traditional treatment on the biological activity of agricultural chernozem of the Stavropol region. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, no. 100, pp. 159–189 (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-159-189>

Makarov O. A., Makarov A. A. Approaches to assessing the risk of chemical pollution of urban soils. *Pochvovedenie*, 2016, no. 9, pp. 1147–1156 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090094>

Malykhina L. V., Shaydullina I. A., Antonov N. A., Sibgatova D. I., Yapparov A. Kh., Degtyareva I. A., Latypova V. Z., Gadieva E. Sh. Application of new biotechnologies in the remediation of black soil with mixed pollution. *Georesursy*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 138–144 (in Russian).

Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Schemelinina T. N., Anchugova E. M., Kanev V. B. Restoration succession biota in peat soil with oil contamination with different methods of biological remediation. *Pochvovedenie*, 2015, no. 6, pp. 740–750 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0032180X15060076>

Mishustin E. N. *Assotsiatsiia pochvennykh mikroorganizmov* [Association of Soil Microorganisms]. Moscow, Nauka, 1975. 114 p. (in Russian).

Mynbaeva B. N., Seylova L. B., Voronova N. V., Muzdybaeva K. K., Amirashev B. A., Imanbekova T. G. Microbiological indication of soils of Almaty contaminated with heavy metals. *Interactive Journal of Ecological Soil Science*, 2013, no. 1, iss. 18, pp. 176–184 (in Russian).

Naprasnikova E. V., Makarova A. P. Ecological-microbiological and biochemical characteristics of soil cover under conditions of airborne technogenic pollution. *Proceedings of Irkutsk State University, Series: Biology. Ecology*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 19–26 (in Russian).

National Soil Atlas of the Russian Federation. Moscow, Astrel, 2011. 632 p. (in Russian).

Netrusov A. I., Egorova M. A., Zakharchuk L. M. *Praktikum po mikrobiologii* [Practicum in Microbiology]. Moscow, Academy, 2005. 608 p. (in Russian).

Rakhimova E. R., Osipova A. L., Zaripova S. K. Purification of soil from oil pollution using denitrifying hydrocarbon-oxidizing microorganisms. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2004, vol. 40, no. 6, pp. 649–653 (in Russian).

RD 52.18.191-89. *Methods for Measuring the Mass Fraction of Acid Soluble Forms of Metals (Copper, Lead, Zinc, Nickel, Cadmium) in Soil Samples by Atomic Absorption Analysis*. Moscow, State Committee on Hydrometeorology of the USSR Publ., 1990. 32 p. (in Russian).

Rogozina E. A., Shimansky V. K. Models of changes of soil ecosystems under the action of hydrocarbon pollution. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2007, no. 2, pp. 27–43 (in Russian).

Saxonov M. N., Abalakov A. D., Danko L. V., Barkhatova O. A., Balayan A. E., Stom D. I. *Ekologicheskii monitoring neftegazovoi otrasli. Fiziko-khimicheskie i biologicheskie metody: uchebnoe posobie* [Ecological Monitoring of Oil and Gas Industry. Physico-chemical and Biological Methods: Textbook]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2005. 114 p. (in Russian).

SanPiN 42-128-4433-87 “Sanitary Norms of Permissible Concentrations of Chemical Substances in Soils” approved by the Deputy Chief State Sanitary Doctor of the USSR, 30.10.88 № 4433-87; revised from 07.02.99. Moscow, 1999. 25 p. (in Russian).

Seredina V. P., Kolesnikova E. V., Kondykov V. A., Nepotrebnii A. I., Ognev S. A. Features of the Impact of oil pollution on the soils of the middle taiga of Western Siberia. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 5, pp. 108–112 (in Russian). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-5-108-112>

Sokolov S. S., Storchak T. V., Tikhomirov Y. N. Development of information-analytical system of environmental monitoring for tracking the current state of the environment in the territory of oil fields. *Bulletin of Science and Practice*, 2017, no. 4 (17), pp. 170–183 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.546288>

Sorokin N. D., Grodnitskaya I. D., Shapchenkova O. A., Evgrafova S. Y. Experimental evaluation of soil microbocenosis stability under chemical pollution. *Pochvovedenie*, 2009, no. 6, pp. 701–707 (in Russian).

Suleimanov R. R., Gabbasova I. M., Sitdikov R. N. Changes in the properties of oily gray forest soil during biological reclamation. *Biology Bulletin*, 2005, vol. 32, no. 1, pp. 93–99.

Fedorets N. G., Bakhmet O. N. *Ekologicheskie osobennosti transformatsii soedinenii ugleroda i azota v lesnykh pochvakh* [Ecological Peculiarities of Transformation of Carbon and Nitrogen Compounds in Forest Soils]. Petrozavodsk, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 240 p. (in Russian).

Fokina A. I., Ashikhmina T. Y., Domracheva L. I., Gornostaeva E. A., Ogorodnikova S. Yu. Heavy metals as a factor of metabolic changes in microorganisms (Review). *Theoretical and Applied Ecology*, 2015, no. 2, pp. 5–17 (in Russian).

Adesina G. O., Adelasoje K. A. Effect of crude oil pollution on heavy metal contents, microbial population in soil, and maize and cowpea growth. *Agricultural Sciences*, 2014, vol. 5, iss. 1, pp. 43–50. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.51004>

Bagali S. S. Review: nitrogen fixing microorganisms. *International Journal of Microbiological Research*, 2012, vol. 3, iss. 1, pp. 46–52. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijmr.2012.3.1.61103>

Foght J., Aislabie J. Enumeration of soil microorganisms. In: R. Margesin, F. Schinner, eds. *Manual for Soil Analysis – Monitoring and Assessing Soil Bioremediation*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, pp. 261–280.

Friedlová M. The influence of heavy metals on soil biological and chemical properties. *Soil and Water Research*, 2010, vol. 5, iss. 1, pp. 21–27. <https://doi.org/10.17221/11/2009-SWR>

Fu J., Wang Q., Wang H., Yu H., Zhang X. Monitoring of non-destructive sampling strategies to assess the exposure of avian species in Jiangsu Province, China to heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, vol. 21, iss. 4, pp. 2898–2906. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2242-4>

Galitskaya P., Gumerova R., Ratering S., Schnell S., Blagodatskaya E., Selivanovskaya S. Oily waste containing natural radionuclides: does it cause stimulation or inhibition of soil bacterial community? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, vol. 178, no. 6, pp. 825–833. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400641>

Grzyb A., Wolna-Maruwka A., Niewiadomska A. The significance of microbial transformation of nitrogen compounds in the light of integrated crop management. *Agronomy*, 2021, vol. 11, no. 7, article number 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071415>

Hazim R. N., Al-Ani M. A. Effect of petroleum hydrocarbons contamination on soil microorganisms and biodegradation. *Rafidain Journal of Science*, 2019, vol. 28, iss. 1, pp. 13–22. <https://doi.org/10.33899/rjs.2019.159391>

Kucharski J., Tomkiel M., Boros E., Wyszowska J. The effect of soil contamination with diesel oil and petrol on the nitrification process. *Journal of Elementology*, 2010, vol. 15, iss. 1, pp. 111–118. <https://doi.org/10.5601/jelem.2010.15.1.111-118>

Murata T., Kanao-Koshikawa M., Takamatsu T. Effects of Pb, Cu, Sb, Zn and Ag contamination on the proliferation of soil bacterial colonies, soil dehydrogenase activity, and phospholipid fatty acid profiles of soil microbial communities. *Water, Air and Soil Pollution*, 2005, vol. 164, pp. 103–118.

Mustafa A. D., Juahir H., Yunus K., Amran M. A., Hasnam C. N. C., Azaman F., Abidin I. Z., Azmee S. H., Sulaiman N. H. Oil spill related heavy metal: a review. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 2015, vol. 19, iss. 6, pp. 1348–1360.

Rana A., Kumar R. P., Ramakrishnan B. Enzymology of the nitrogen cycle and bioremediation of toxic nitrogenous compounds. In: P. Bhatt, ed. *Smart Bioremediation Technologies: Microbial Enzymes*. London, Academic Press, 2019, pp. 45–61. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818307-6.00003-2>

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

Su C., Jiang L., Zhang W. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, 2014, vol. 3, iss. 2, pp. 24–38.

Sumampouw O. J., Risjani Y. Bacteria as indicators of environmental pollution: Review. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*, 2014, vol. 4, iss. 6, pp. 251–258. <https://doi.org/10.5923/j.ije.20140406.03>

Terekhova V. A., Shitikov V. K., Ivanova A. E., Kydralieva K. A. Assessment of the ecological risk of technogenic soil pollution on the basis of the statistical distribution of the occurrence of micromycete species. *Russian Journal of Ecology*, 2017, vol. 48, iss. 5, pp. 417–424. <https://doi.org/10.1134/S1067413617050125>

Wolińska A., Kuźniar A., Szafranek-Nakonieczna A., Jastrzębska N., Roguska E., Stępniewska Z. Biological activity of autochthonic bacterial community in oil-contaminated soil. *Water, Air and Soil Pollution*, 2016, vol. 227, article number 130. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2825-z>

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 598.112.23:591.16

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-374-382>

ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ ВОСТОЧНОЙ ВЕРЕТЕНИЦЫ – *ANGUIS COLCHICA ORIENTALIS* (REPTILIA, ANGUIDAE) В ТАЛЫШСКИХ ГОРАХ

А. А. Кидов , А. А. Иванов, Р. А. Иволга,
Т. Э. Кондратова, Е. А. Кидова

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева
Россия, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

Поступила в редакцию 30.07.2023 г., после доработки 24.08.2023 г., принята 24.08.2023 г., опубликована 22.09.2023 г.

Аннотация. Приведены результаты изучения возраста и роста восточной веретеницы (*Anguis colchica orientalis* Anderson, 1872) в верховьях р. Тангерю в Астаринском районе Республики Азербайджан. Ящериц (8 самцов и 6 самок) отлавливали с марта по август в 2011 – 2019 гг. Возраст определяли по числу линий задержанного роста на поперечных срезах хвостовых позвонков. У трех погибших особей исследовали также срезы нижнечелюстной кости. Число линий задержанного роста на срезах нижнечелюстной кости и хвостового позвонка совпадало. Изученные животные имели возраст от 1 до 10 лет. Средний возраст самцов составил 4.86 года, а самок 5.33 лет. Больше половины самцов (62.5% или 5 особей) имели возраст 4 – 5 лет, а треть самок (2 особи) были шестилетними. Ожидаемая продолжительность жизни после первой зимовки у самок равнялась 6.70 годам ($S = 0.84$), а у самцов – 5.93 годам ($S = 0.82$). Отмечается, что определение возраста по поперечным срезам хвостовых позвонков у веретениц представляется возможным и позволяет проводить исследования на живых ящерицах.

Ключевые слова: герпетофауна, демография, продолжительность жизни, Азербайджан

Для цитирования. Кидов А. А., Иванов А. А., Иволга Р. А., Кондратова Т. Э., Кидова Е. А. Возрастная структура популяции восточной веретеницы – *Anguis colchica orientalis* (Reptilia, Anguidae) в Талышских горах // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 374 – 382. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-374-382>

 Для корреспонденции. Кафедра зоологии Института зоотехнии и биологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева.

ORCID и e-mail адреса: Кидов Артем Александрович: <https://orcid.org/0000-0001-9328-2470>, kidov_a@mail.ru; Иванов Андрей Алексеевич: <https://orcid.org/0000-0002-3654-5411>, andrew.01121899@gmail.com; Иволга Роман Александрович: <https://orcid.org/0000-0003-2050-5279>, romanivolga@gmail.com; Кондратова Татьяна Эдуардовна: <https://orcid.org/0000-0001-7533-7327>, t.kondratova@rgau-msha.ru; Кидова Елена Александровна: <https://orcid.org/0000-0003-3933-0499>, kidova_ea@rgau-msha.ru.

Введение. Возрастная структура является одной из важнейших демографических характеристик, позволяющих оценивать состояние популяций, планировать и осуществлять мероприятия по их управлению (Castanet, 1994). Для рептилий наиболее распространенным методом определения возраста на протяжении более чем 50 лет остается скелетохронология (Клейненберг, Смирина, 1969; Смирина, 1974; Castanet, Smirina, 1990; Comas et al., 2016). При изучении возраста пресмыкающихся обычно используют поперечные срезы трубчатых костей – бедра или плеча (Смирина, Ройтберг, 2012; Клевезаль, Смирина, 2016; Кидов и др., 2023а, б), значительно реже – фаланг пальцев (Dubey et al., 2013; Кидов и др., 2020; Guarino et al., 2020; Altunışık et al., 2022) или когтей (Galoyan et al., 2022). Очевидно, что применение этих регистрирующих структур невозможно для рептилий, лишенных конечностей – безногих ящериц, амфисбен и змей.

В этом случае альтернативой трубчатым костям конечностей для изучения возраста могут являться поперечные срезы позвонков. У большинства изученных видов в этих костях образуются линии задержанного роста, соответствующие диапаузам (Measey, Wilkinson, 1998; Guarino, 2010; Scholz et al., 2010; Guarino et al., 2016; Ma et al., 2022), что было доказано экспериментально в неволе на нескольких видах подвязочных змей (*Thamnophis* sp.) (Waye, Gregory, 1998). Стоит, однако, отметить, что использование позвонков, как регистрирующих структур, имеет свои недостатки: подготовка препаратов из них более трудоемка, первые линии задержанного роста могут быть резорбированы из-за ремоделирования костной ткани. Также не у всех особей удастся однозначно отличить зимовочные линии от дополнительных, что может приводить к недооценке или переоценке возраста (Guarino, 2010; Ma et al., 2022). В связи с этим подобные исследования не получили широкого распространения или применяются на очень небольших выборках. Однако использование хвостовых позвонков от ящериц, способных к автотомии и восстановлению хвоста, позволяет собирать материал прижизненно, что особенно важно при изучении редких и исчезающих видов или на особо охраняемых природных территориях.

Из представителей рода *Anguis* Linnaeus, 1758 возраст методом скелетохронологии определяли только у пяти особей итальянской веретеницы (*A. veronensis* Pollini 1818) (Guarino et al., 2016). В настоящей статье нами представлены первые данные о возрастной структуре популяции эндемика гирканских лесов Южного Прикаспия – восточной веретеницы (*Anguis colchica orientalis* Anderson, 1872).

Материал и методы. Ящериц отлавливали с марта по август в 2011 – 2019 гг. в Талышских горах в верхнем течении р. Тангерю – в пределах с. Сым (38.48° с.ш., 48.63° в.д.) Астаринского района Республики Азербайджан. У отловленных животных по внешним признакам определяли пол, измеряли длину тела (SVL) и купировали часть хвоста с автотомными (постпигальными) позвонками. В случае, если хвост нес на себе следы повреждения и регенерации, брали более краниальные части до неавтотомных (пигальных) позвонков. У трех погибших под колёсами автотранспорта особей также отбирали для исследований нижние челюсти. Материал до начала исследований хранили в 70%-м этаноле.

Кости разделяли, очищали от мягких тканей, в зависимости от толщины декальцинировали в течение 7 – 18 мин в 7%-м растворе азотной кислоты, а затем промывали в холодной проточной воде в течение четырех часов. Поперечные срезы толщиной 15 мкм изготавливали с помощью санного микротомы МС-2 (ОАО ХЗ «Точмедприбор», Россия), снабженного замораживающим столиком ОЛ-ЗСО 30. Окрашивание производили гематоксилином Эрлиха в течение 12 мин. Готовые препараты изучали под электронным микроскопом Микромед Р-1 (ООО «Наблюдательные приборы», Россия) при 100 – 400-кратном увеличении. Фотографии поперечных срезов выполняли при 100-кратном увеличении цифровой камерой Levenhuk M500 BASE (Levenhuk Optics Ltd., США). Всего были изучены препараты от 14 природных особей (8 самцов и 6 самок) и одной, рожденной в лаборатории. Все работы проводились в соответствии с «Международными руководящими принципами для биомедицинских исследований на животных» (International Guiding..., 2012).

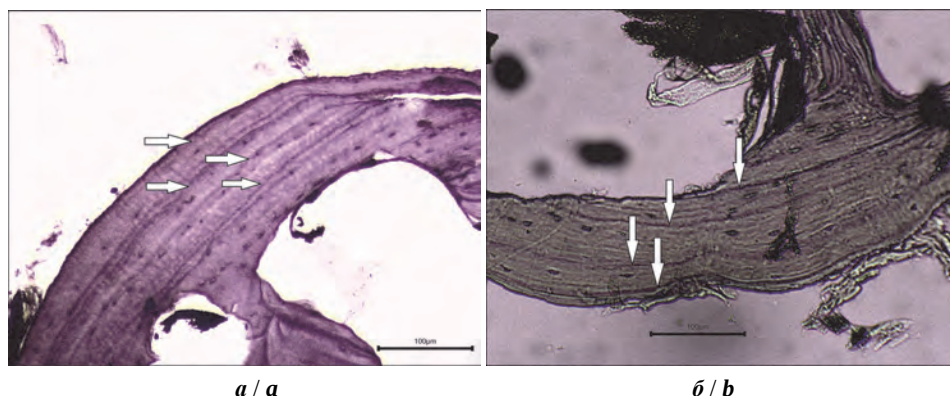
Как и в других исследованиях по изучению возраста яйцезавороняющих пресмыкающихся (Guarino, 2010; Guarino et al., 2016), нами не была обнаружена формирующаяся при вылуплении сеголеточная (неонатальная) линия задержанного роста у новорожденной особи, поэтому мы считали количество линий склеивания на поперечных срезах позвонков остальных веретениц равным числу пережитых ими зимовок.

Годовая оценка выживаемости прошедших минимум одну зимовку ящериц была рассчитана по формуле Робсона и Чапмена (Robson, Chapman, 1961). Ожидаемую продолжительность жизни особей после года определяли по формуле Себера (Seber, 1973). Рассчитывали среднее арифметическое и стандартное отклонение ($M \pm SD$), а также диапазон изменений признаков ($min - max$). Статистическую обработку данных выполняли в пакетах программ Microsoft Excel и STATISTICA 12 (StatSoft Inc., OK, USA).

Результаты и их обсуждение. Исследование гистологических препаратов показало, что наиболее подходящим местом для определения возраста веретениц являются дуги позвонков. В этой части позвонка кость хорошо развита, вследствие чего было отмечено наибольшее количество гематоксилинофильных линий, которые определяли как линии задержанного роста, сформированные в периоды гибернаций. У трех погибших особей число линий задержанного роста на срезах нижнечелюстных костей и позвонков совпадало (рисунок). Дополнительные линии были выражены слабо, что объясняется отсутствием задержек роста между зимовками. Наши наблюдения в природе также показывают, что в гирканских лесах Талыша *A. colchica orientalis* активны весь теплый период (с марта по октябрь включительно) и не уходят в летнюю спячку.

Изученные животные имели возраст от 1 до 10 лет (таблица). Средний возраст самцов составил 4.86 ± 2.23 года, а самок 5.33 ± 3.33 лет. Больше половины самцов (62.5% или 5 особей) имели возраст 4–5 лет, а треть самок (2 особи) были шестилетними. Ожидаемая продолжительность жизни после первой зимовки у самок равнялась 6.70 годам ($S = 0.84$), а у самцов – 5.93 годам ($S = 0.82$).

ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ ВОСТОЧНОЙ ВЕРЕТЕНИЦЫ



Поперечные срезы хвостового позвонка (а) и нижнечелюстной кости (б) у самца *Anguis colchica orientalis* в возрасте четырех лет (SVL = 112.6 мм)

Figure. Transverse sections of the caudal vertebra (a) and mandibular bone (b) in a four-year-old *Anguis colchica orientalis* male (SVL = 112.6 mm)

Таким образом, восточная веретеница принадлежит к долгоживущим ящерицам, как и другие представители рода. Так, максимальная продолжительность жизни, выявленная ранее для *A. veronensis* при изучении поперечных срезов позвонков, составляла 7 (самки) – 10 (самцы) лет (Guarino et al., 2016). Для европейских *A. fragilis* Linnaeus 1758 в условиях зоопарка отмечен случай доживания до возраста 50 лет (Luiselli et al., 1994).

Длина тела (SVL) *Anguis colchica orientalis* в разном возрасте

Table. Body length (SVL) of *Anguis colchica orientalis* at different ages

Возраст, лет / Age, years	Пол / Sex	n	SVL, мм / SVL, mm			
			M	SD	min	max
0 (новорожденный / newborn)	Не определен / Unspecified	1	47.36	–	–	–
1	Самец / Male	1	123.46	–	–	–
	Самка / Female	1	99.58	–	–	–
2	Самка / Female	1	137.32	–	–	–
4	Самец / Male	2	128.31	25.385	110.36	146.26
5	Самец / Male	3	118.12	5.530	112.58	123.64
6	Самец / Male	1	139.76	–	–	–
	Самка / Female	2	154.93	5.982	150.70	159.16
7	Самка / Female	1	175.40	–	–	–
9	Самец / Male	1	169.64	–	–	–
10	Самка / Female	1	142.69	–	–	–

Заключение. Проведенные исследования показывают, что метод скелетохронологии с использованием в качестве регистрирующих структур поперечных срезов хвостовых позвонков может успешно применяться для прижизненного определения возраста у веретениц. Также это позволяет осуществлять мониторинг состояния популяций редких видов ящериц, способных к автотомии и регенерации хвоста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кидов А. А., Хайрутдинов И. З., Иванов А. А., Кидова Е. А. Возрастная структура и рост круглоголовки-вертихвостки, *Phrynocephalus guttatus* (Reptilia, Sauria, Agamidae) в Терском песчаном массиве (Восточное Предкавказье) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2020. № 3 (31). С. 56 – 67. <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2020-3-5>

Кидов А. А., Иванов А. А., Иволга Р. А., Кондратова Т. Э. Возрастная структура и особенности роста согдианской круглоголовки *Phrynocephalus sogdianus* (Reptilia, Agamidae) // Труды Зоологического института РАН. 2023а. Т. 327, № 2. С. 226 – 233. <https://doi.org/10.31610/trudyzin/2023.327.2.226>

Кидов А. А., Кондратова Т. Э., Иволга Р. А., Лялков С. М. Возрастная структура, рост и размножение полосатого гологлаза (*Ablepharus bivittatus*, Reptilia, Scincidae) в Талышских горах (провинция Ардебиль, Иран) // Зоологический журнал. 2023б. Т. 102, № 6. С. 681 – 687. <https://doi.org/10.31857/S0044513423060089>

Клевезаль Г. А., Смирин Э. М. Регистрирующие структуры наземных позвоночных. Краткая история и современное состояние исследований // Зоологический журнал. 2016. Т. 95, № 8. С. 872 – 896. <https://doi.org/10.7868/S0044513416080079>

Клейнбергер С. Е., Смирин Э. М. К методике определения возраста амфибий // Зоологический журнал. 1969. Т. 48, № 7. С. 1090 – 1094.

Смирин Э. М. Перспективы определения возраста рептилий по слоям в кости // Зоологический журнал. 1974. Т. 53, № 1. С. 111 – 117.

Смирин Э. М., Ройтберг Е. С. Развитие исследований роста рептилий в направлениях, определенных А. М. Сергеевым // Зоологический журнал. 2012. Т. 91, № 11. С. 1291 – 1301.

Altunışık A., Yıldız M. Z., Üçeş F., Bozkurt M. A., Sömer M. Altitude impacts body size but not age in the Asia Minor thin-toed gecko (*Mediodactylus heterocercus*) // Canadian Journal of Zoology. 2022. Vol. 100, iss. 5. P. 315 – 321. <https://doi.org/10.1139/cjz-2021-0197>

Castanet J. Age estimation and longevity in Reptiles // Gerontology. 1994. Vol. 40, iss. 2 – 4. P. 174 – 192.

Castanet J., Smirina E. M. Introduction to the skeletochronological method in amphibians and reptiles // Annales des Sciences Naturelles, Zoologie 13^e Série. 1990. Vol. 11. P. 191 – 196.

Comas M., Reguera S., Zamora-Camacho F. J., Salvado H. H., Moreno-Rueda G. Effectiveness of phalanx skeletochronology to estimate age in living reptiles // PeerJ. 2016. Article number 4:e1809v1. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1809v1>

Dubey S., Sinsch U., Dehling M., Chevalley M., Shine R. Population demography of an endangered lizard, the Blue Mountains Water Skink // BMC Ecology. 2013. Vol. 13. Article number 4. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-13-4>

Galoyan E., Sopilko N., Kovalyeva A., Chamkina A. Double-check in lizard age estimation: use of phalanx bone and keratin claw sheath lamellas // Research Square. 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1888046/v1>

Guarino F. M. Structure of the femora and autotomous (postpygal) caudal vertebrae in the three-toed skink *Chalcides chalcides* (Reptilia: Squamata: Scincidae) and its applicability for age and growth rate determination // Zoologischer Anzeiger. 2010. Vol. 248, № 4. P. 273 – 283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcz.2009.11.001>

Guarino F. M., Mezzasalma M., Odierna G. Usefulness of postpygal caudal vertebrae and osteoderms for skeletochronology in the limbless lizard *Anguis veronensis* Pollini, 1818 (Squamata: Sauria: Anguidae) // Herpetozoa. 2016. Vol. 29. № 1/2. P. 69 – 75.

Guarino F. M., Nocera F. D., Pollaro F., Galiero G., Iaccarino D., Iovino D., Mezzasalma M., Petraccioli A., Odierna G., Maio N. Skeletochronology, age at maturity and cause of mortality of loggerhead sea turtles *Caretta caretta* stranded along the beaches of Campania (south-

ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ ВОСТОЧНОЙ ВЕРЕТЕНИЦЫ

western Italy, western Mediterranean Sea) // *Herpetozoa*. 2020. Vol. 33. P. 39 – 51. <http://dx.doi.org/10.3897/herpetozoa.33.e47543>

International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals. Geneva, Switzerland: Council for International Organization of Medical Sciences Publ., 2012. 4 p.

Luiselli L., Capula M., Anibaldi C. Food habits of the slow worm, *Anguis fragilis* (L.), in two contrasting alpine environments // *Bulletin de la Société Herpétologique de France*. 1994. Vol. 71/72. P. 45 – 48.

Ma M., Luo S., Tang X., Chen Q. Age structure and growth pattern of a high-altitude lizard population based on age determination by skeletochronology // *Journal of Experimental Zoology, Part A: Ecological and Integrative Physiology*. 2022. Vol. 337, iss. 5. P. 491 – 500. <https://doi.org/10.1002/jez.2583>.

Measey G. J., Wilkinson M. Lines of arrested growth in the caecilian, *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona) // *Amphibia – Reptilia*. 1998. Vol. 19, № 1. P. 91 – 95. <https://doi.org/10.1163/156853898X00359>

Robson D. S., Chapman D. G. Catch curves and mortality rates // *Transactions of the American Fisheries Society*. 1961. Vol. 90, iss. 2. P. 181 – 189. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1961\)90\[181:CCAMR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1961)90[181:CCAMR]2.0.CO;2)

Scholz S., Orlik M., Gonwouo L. N., Kupfer A. Demography and life history of a viviparous Central African caecilian amphibian // *Journal of Zoology*. 2010. Vol. 280, iss. 1. P. 17 – 24. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2009.00639.x>

Seber G. A. F. The estimation of Animal Abundance and Related Parameters. London: Griffin, 1973. 506 p.

Waye H. L., Gregory P. Determining the age of garter snakes (*Thamnophis* spp.) by means of skeletochronology // *Canadian Journal of Zoology*. 1998. Vol. 76, iss. 2. P. 288 – 294. <https://doi.org/10.1139/cjz-76-2-288>

**Age structure of the population
of *Anguis colchica orientalis* (Reptilia, Anguidae)
in the Talysh Mountains**

А. А. Кидов [✉], А. А. Иванов, Р. А. Иволга, Т. Е. Кондратова, Е. А. Кидова

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy
49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia

Received: July 30, 2023 / revised: August 24, 2023 / accepted: August 24, 2023 / published: September 22, 2023

Abstract. The paper presents the results of studying the age and growth of the eastern slow worm (*Anguis colchica orientalis*) in the upper reaches of the Tangeru River (Astara district, Republic of Azerbaijan). Lizards (8 males and 6 females) were caught from March to August in 2011–2019. Their age was determined by the number of lines of arrested growth (LAG) on the cross sections of the tail vertebrae. Sections of the mandibular bone were also examined in three dead individuals. The number of LAG on the mandibular bone sections and the caudal vertebra coincided. The studied animals were aged from 1 to 10 years. The average age of males and females was 4.86 and 5.33 years, respectively. More than half of the males (5 individuals) were 4–5 years old, and a third of the females (2 individuals) were six years old. The life expectancy after the first wintering in females and males was 6.70 ($S = 0.84$) and 5.93 years ($S = 0.82$), respectively. It is noted that age determination by cross-sections of the tail vertebrae in slow worms is possible and allows conducting studies on live lizards.

Keywords: herpetofauna, demography, life expectancy, Azerbaijan

For citation: Kidov A. A., Ivanov A. A., Ivolga R. A., Kondratova T. E., Kidova E. A. Age structure of the population of *Anguis colchica orientalis* (Reptilia, Anguidae) in the Talysh Mountains. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 3, pp. 374–382 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-3-374-382>

REFERENCES

- Kidov A. A., Khayrutdinov I. Z., Ivanov A. A., Kidova E. A. Age structure and growth of the spotted toadhead agama, *Phrynocephalus guttatus* (Reptilia, Sauria, Agamidae) in Terek sand massif (Eastern Ciscaucasia). *University Proceedings. Volga Region. Natural Sciences*, 2020, no. 3 (31), pp. 56–67 (in Russian). <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2020-3-5>
- Kidov A. A., Ivanov A. A., Ivolga R. A., Kondratova T. E. Age structure and growth features of the Tajikistan toadhead agama *Phrynocephalus sogdianus* (Reptilia, Agamidae). *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, 2023a, vol. 327, no. 2, pp. 226–233 (in Russian). <https://doi.org/10.31610/trudyzin/2023.327.2.226>

[✉] Corresponding author. Department of Zoology of the Institute of Zootechnics and Biology, Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Artem A. Kidov: <https://orcid.org/0000-0001-9328-2470>, kidov_a@mail.ru; Andrey A. Ivanov: <https://orcid.org/0000-0002-3654-5411>, andrew.01121899@gmail.com; Roman A. Ivolga: <https://orcid.org/0000-0003-2050-5279>, romanivolga@gmail.com; Tatyana E. Kondratova: <https://orcid.org/0000-0001-7533-7327>, t.kondratova@rgau-msha.ru; Elena A. Kidova: <https://orcid.org/0000-0003-3933-0499>, kidova_ea@rgau-msha.ru.

Kidov A. A., Kondratova T. E., Ivolga R. A., Lyapkov S. M. Age structure, growth and reproduction of the two-streaked snake-eyed skink (*Ablepharus bivittatus*, Reptilia, Scincidae) in the Talysh Mountains (Ardabil province, Iran). *Zoologicheskii zhurnal*, 2023b, vol. 102, no. 6, pp. 681–687 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044513423060089>

Klevezal G. A., Smirina E. M. Recording structures of terrestrial vertebrates. A sketch of history and the current state of investigations. *Zoologicheskii zhurnal*, 2016, vol. 95, no. 8, pp. 872–896 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0044513416080079>

Kleinenberg S. E., Smirina E. M. A contribution to the method of age determination in amphibians. *Zoologicheskii zhurnal*, 1969, vol. 48, no. 7, pp. 1090–1094 (in Russian).

Smirina E. M. Prospects of age determination by bone layers in reptilia. *Zoologicheskii zhurnal*, 1974, vol. 53, no. 1, pp. 111–117 (in Russian).

Smirina E. M., Roitberg E. S. On investigations of the reptilian growth in the directions suggested by A. M. Sergeev. *Zoologicheskii zhurnal*, 2012, vol. 91, no. 11, pp. 1291–1301 (in Russian).

Altunışık A., Yıldız M. Z., Üçeş F., Bozkurt M. A., Sömer M. Altitude impacts body size but not age in the Asia Minor thin-toed gecko (*Mediodactylus heterocercus*). *Canadian Journal of Zoology*, 2020, vol. 100, iss. 5, pp. 315–321. <https://doi.org/10.1139/cjz-2021-0197>

Castanet J. Age estimation and longevity in Reptiles. *Gerontology*, 1994, vol. 40, iss. 2–4, pp. 174–192.

Castanet J., Smirina E. M. Introduction to the skeletochronological method in amphibians and reptiles. *Annales des Sciences Naturelles, Zoologie 13^e Séries*, 1990, vol. 11, pp. 191–196.

Comas M., Reguera S., Zamora-Camacho F. J., Salvado H. H., Moreno-Rueda G. Effectiveness of phalanx skeletochronology to estimate age in living reptiles. *PeerJ*, 2016, article number 4:e1809v1. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1809v1>

Dubey S., Sinsch U., Dehling M., Chevalley M., Shine R. Population demography of an endangered lizard, the Blue Mountains Water Skink. *BMC Ecology*, 2013, vol. 13, article number 4. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-13-4>

Galoyan E., Sopilko N., Kovalyeva A., Chamkina A. Double-check in lizard age estimation: use of phalanx bone and keratin claw sheath lamellas. *Research Square*, 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1888046/v1>

Guarino F. M. Structure of the femora and autotomous (postpygal) caudal vertebrae in the three-toed skink *Chalcides chalcides* (Reptilia: Squamata: Scincidae) and its applicability for age and growth rate determination. *Zoologischer Anzeiger*, 2010, vol. 248, no. 4, pp. 273–283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcz.2009.11.001>

Guarino F. M., Mezzasalma M., Odierna G. Usefulness of postpygal caudal vertebrae and osteoderms for skeletochronology in the limbless lizard *Anguis veronensis* Pollini, 1818 (Squamata: Sauria: Anguinae). *Herpetozoa*, 2016, vol. 29, no. 1/2, pp. 69–75.

Guarino F. M., Nocera F. D., Pollaro F., Galiero G., Iaccarino D., Iovino D., Mezzasalma M., Petraccioli A., Odierna G., Maio N. Skeletochronology, age at maturity and cause of mortality of loggerhead sea turtles *Caretta caretta* stranded along the beaches of Campania (south-western Italy, western Mediterranean Sea). *Herpetozoa*, 2020, vol. 33, pp. 39–51. <http://dx.doi.org/10.3897/herpetozoa.33.e47543>

International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals. Geneva, Switzerland, Council for International Organization of Medical Sciences Publ., 2012. 4 p.

Luiselli L., Capula M., Anibaldi C. Food habits of the slow worm, *Anguis fragilis* (L.), in two contrasting alpine environments. *Bulletin de la Société Herpétologique de France*, 1994, vol. 71/72, pp. 45–48.

Ma M., Luo S., Tang X., Chen Q. Age structure and growth pattern of a high-altitude lizard population based on age determination by skeletochronology. *Journal of Experimental Zoology*,

А. А. Кидов, А. А. Иванов, Р. А. Иволга и др.

Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2022, vol. 337, iss. 5, pp. 491–500.
<https://doi.org/10.1002/jez.2583>.

Measey G. J., Wilkinson M. Lines of arrested growth in the caecilian, *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona). *Amphibia-Reptilia*, 1998, vol. 19, no. 1, pp. 91–95.
<https://doi.org/10.1163/156853898X00359>

Robson D. S., Chapman D. G. Catch curves and mortality rates. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1961, vol. 90, iss. 2, pp. 181–189. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1961\)90\[181:CCAMR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1961)90[181:CCAMR]2.0.CO;2)

Scholz S., Orlik M., Gonwouo L. N., Kupfer A. Demography and life history of a viviparous Central African caecilian amphibian. *Journal of Zoology*, 2010, vol. 280, iss. 1, pp. 17–24.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2009.00639.x>

Seber G. A. F. *The estimation of Animal Abundance and Related Parameters*. London, Griffin, 1973. 506 p.

Waye H. L., Gregory P. Determining the age of garter snakes (*Thamnophis* spp.) by means of skeletochronology. *Canadian Journal of Zoology*, 1998, vol. 76, iss. 2, pp. 288–294.
<https://doi.org/10.1139/cjz-76-2-288>

Редактор *А. Б. Мамаев*
Редактор английского текста *С. Л. Шмаков*
Художник обложки *И. Е. Табачишина*
Оригинал-макет подготовлен *В. Г. Табачишиным*
Корректор *Ю. И. Астахова*

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-23682 от 16.03.2006 г.
в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Учредители: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

ООО «Товарищество научных изданий КМК».
при участии ИП Михайлова К.Г.
123100 Москва, а/я 16; mikhailov2000@gmail.com

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных материалов в ООО «Фотоэксперт».
109316 Москва, Волгоградский проспект, д.42, корп.5, эт.1, пом. I, комн. 6.3-23Н.
Подписано в печать 18.09.2023. Подписано в свет 22.09.2023.
Формат 70х100/16. Объем 8 печ.л. Бум. мелов. Тираж 40 экз. Цена свободная

ISSN 1684-7318 ПОВОЛЖСКИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ 2023 №3



ТОВАРИЩЕСТВО
НАУЧНЫХ
ИЗДАНИЙ КМК

