

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816)EDN: [ICSHUU](https://www.edn.ru/ICSHUU)

УДК 574.5



Популяционная структура комплекса среднеевропейских зеленых лягушек как индикатор геоэкологической ситуации на территории урбанизированных ландшафтов и водных объектах юга среднерусской возвышенности

А.С. Бархатов, Э.А. Снегин, В.В. Киселев,
Е.А. Снегина, А.Г. Корнилов, М.В. Раевская

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Изучению комплекса среднеевропейских зелёных лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс) посвящено много работ. Однако наибольший интерес исследователей представлен изучением видового состава и образование гибридных форм, в то время как сведения по популяционной структуре скудны.

Целью исследования является проведение анализа генетической структуры популяций среднеевропейских зелёных лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс), основанный на применении изоферментных маркёров, в трансформируемых биотопах юга Среднерусской возвышенности. Данный подход позволяет использовать исследуемые популяции в качестве высокочувствительного биоиндикатора негативных изменений водной и околотоводной среды, обусловленных антропогенным воздействием.

Материалы и методы. Исследование представляло собой комплексную оценку популяционно-генетической структуры 36 изолированных субпопуляций исследуемых земноводных с применением изоферментных молекулярных маркеров. Анализ осуществлялся путем электрофореза изоферментов в 10%-ном полиакриламидном геле. В рамках исследования были изучены три независимые изоферментные системы, характеризующиеся кодоминантным типом наследования: два мономерных локуса эстеразы (EST-1 и EST-2), проявляющих каждая по три аллельных варианта, и один димерный локус лактатдегидрогеназы (LDH-3), также имеющий три аллельные формы. Полученные данные позволяют эффективно применять предложенный набор показателей в качестве надёжного индикатора геоэкологического состояния урбанизированных ландшафтов и малых рек юга Среднерусской возвышенности.

Результаты. Анализ генетической вариабельности исследуемых групп выявил высокий уровень генетической гетерогенности. Полностью полиморфными оказались все изученные изоэнзимные локусы ($P = 100 \%$). Среднее число аллелей на локус составило 2,89, эффективное число аллелей – 2,35. Расчетная статистика Райта показала низкий показатель индекса внутривидовой дифференциации при этом среднее значение интенсивности обмена генами достигло более единицы, что свидетельствует о значительной степени межпопуляционного взаимодействия и миграционной активности особей на данной территории несмотря на интенсивную антропогенную трансформацию среды обитания. Полученные данные позволяют предположить наличие эффективной адаптивной стратегии комплекса *P. esculentus*, обеспечивающей успешность существования вида в условиях городской экосистемы. Сопоставление показателей внутривидовой дифференциации тест-объектов с данными экспертных оценок гидроэкологической ситуации в районе исследования позволило выявить слабую, но статистически значимую связь между показателями экспертных балльных оценок гидроэкологической ситуации и эффективным числом аллелей (A_e), что говорит о сильном влиянии дополнительных факторов, не учтенных в комплексной гидроэкологической оценке (ядохимикаты на сельскохозяйственных угодьях, изменения климата, фактор беспокойства и т.п.).

Ключевые слова: *Pelophylax esculentus* комплекс; популяционная структура; урбанизированные ландшафты; малые реки; гидроэкологическое состояние; гидрохимические показатели

Для цитирования. Бархатов, А. С., Снегин, Э. А., Киселев, В. В., Снегина, Е. А., Корнилов, А. Г., & Раевская, М. В. (2026). Популяционная структура комплекса среднеевропейских зеленых лягушек как индикатор геоэкологической ситуации на территории урбанизированных ландшафтов и водных объектах юга среднерусской возвышенности. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 103–128. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816>

Population structure of the Central European green frog complex as an indicator of the geoeological situation in urbanized landscapes and water bodies in the south of the Central Russian Upland

**A.S. Barkhatov, E.A. Snegin, V.V. Kiselev,
E.A. Snegina, A.G. Kornilov, M.V. Raevskaya**

Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation

Abstract

Background. Nowadays a wide range of works is dedicated to *Pelophylax esculentus* complex. The most investigations focus on the structure of species and hybrid forms, at the same time, the information of population structure is insufficient.

The article is **aimed** to genetic structure analysis of Central European green frogs (*Pelophylax esculentus* complex). The tools of isozyme markers in the anthropogenically transformed biotopes (south of the Central Russian Upland) are basis of the analysis. The approach underlines the role of green frog populations as sensitive biological indicators for water quality monitoring as well as near-water ecosystem monitoring.

Materials and methods. The method of protein polymorphism and isozyme molecular markers is implemented for comprehensive assessment of the population genetic structure of 36 isolated amphibian subpopulations (*Pelophylax esculentus*).

Electrophoresis of isozymes took place in 10% polyacrylamide gel. Three independent isozyme systems characterized by codominant inheritance were investigated: two monomeric esterase loci (EST-1 and EST-2), each exhibiting three allelic variants, and one dimeric lactate dehydrogenase locus (LDH-3), also having three allelic forms. The obtained data provide better leverage for reliable indication of the geoecological state of urban landscapes and small rivers within the south of the Central Russian Upland.

Results. The analysis of the genetic variability of the studied groups discovered high level of genetic heterogeneity. All the studied isozyme loci were completely polymorphic ($P = 100\%$). The average number of alleles per locus was 2.89, and the effective number of alleles was 2.35. Wright's statistics showed a low index of intraspecific differentiation, while the average value of gene exchange intensity >1 . Despite the intensive anthropogenic transformation of the habitat, interpopulation interaction and migration activity are significantly high in this area. It could be suggested that effective adaptive strategy for the *Pelophylax esculentus* complex of the investigated species in urban ecosystems exists.

The indicators of intraspecific differentiation (genetic characteristics) of test objects and the data of expert assessments of the hydroecological situation (hydroecological characteristics) in the study area were compared. As a result, a slight correlation was found between the indicators of expert evaluation of the hydroecological situation and the effective number of alleles (A_e), which underlines a strong influence of extra factors. The factors could be such as pesticides from agricultural land, climate changes, disturbance factor, etc.).

Keywords: *Pelophylax esculentus* complex; population structure; urbanized landscapes; small rivers; hydroecological state; hydrochemical indicators

For citation. Barkhatov, A. S., Snegin, E. A., Kiselev, V. V., Snegina, E. A., Kornilov, A. G., & Raevskaya, M. V. (2026). Population structure of the Central European green frog complex as an indicator of the geoecological situation in urbanized landscapes and water bodies in the south of the Central Russian Upland. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 103–128. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1816>

Введение

Известно, что с точки зрения современной науки, элементарные эволюционные явления происходят в популяциях в виде направленного изменения частот аллелей. При этом в настоящее время особое внимание уделяется изучению популяций, обитающих в биотопах, подверженных влиянию человеческой деятельности, так как именно на территории городов и промышленных объектов наблюдаются наиболее выраженные изменения генетической структуры популяций [5].

Главной причиной указанных трансформаций является возникновение новых механизмов изоляции, реализующихся на протяжении ограниченного временного интервала и приводящих к фрагментации популяции на небольшие, пространственно разобщенные микрогруппы. Это способствует возникновению значительных модификаций генетической организации, необходимых для формирования адаптивных стратегий выживания [6]. Данные процессы способны существенно влиять на дальнейшую эволюционную траекторию соответствующих демографически обособленных группировок [5; 6].

Объекты, представляющие наибольший интерес для проведения популяционно-генетических исследований среди амфибий, включают виды комплекса среднеевропейских зелёных лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс) [4; 27; 32; 35]. Данный комплекс включает в себя три основные таксономические единицы: прудовая лягушка – *Pelophylax lessonae* (Camerano, 1882); озёрная лягушка – *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771), при этом по многочисленным исследованиям озёрная лягушка представляет собой комплекс криптических форм – «западная» *P. ridibundus* и «восточная» *P. cf. bedriagae* (анатолийская лягушка) [4; 33], а так же съедобная лягушка (гибридная форма) – *Pelophylax esculentus* (Linnaeus, 1758). Таким образом, комплекс среднеевропейских зеленых лягушек представляет собой сложный гибридогенный комплекс обусловленный полуклональным (мероклональным) типом наследования, полиплоидией и разнообразными типами популяционных систем [38].

Изучение генетической структуры и филогеографии указанных видов занимает центральное место во многих научных публикациях. Тем не менее, большая часть публикаций посвящена вопросам определения видового состава комплекса [10; 12; 13; 23; 25; 28; 32; 34], включая методы электрофореза белков [36; 37]. В то же время информация относительно внутривидового полиморфизма белков, выявленного на уровне популяции на территории Российской Федерации, ограничена лишь отдельны-

ми видами бурых лягушек [19]. Следует подчеркнуть, что, несмотря на интенсивные исследования, направленные на изучение генетического полиморфизма ядерных и митохондриальных маркеров, проведение аллозимного анализа сохраняет свою актуальность, для изучения популяционной структуры, поскольку анализу подвергаются кодирующие участки генома [24].

Целью настоящего исследования является комплексная оценка генетической структуры популяций среднеевропейских зелёных лягушек комплекса *Pelophylax esculentus* посредством анализа полиморфизма изоферментных маркёров, как одного из индикаторов гидроэкологического состояния малых рек юга Среднерусской возвышенности.

Данное исследование представляет собой часть работы по изучению популяционной структуры сложного гибридогенного комплекса среднеевропейских зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* комплекс) включающего в себя изучение морфометрических, морфофизиологических и фенотипических показателей, а также генетической структуры на основе микросателлитных и изоферментных маркеров и определении видового состава и уровня гибридизации в популяционных системах [1].

Материалы и методы исследования

Материал был собран в большей степени на территории Белгородской области, за исключением отдельных точек, находящихся в пределах Воронежского и Курского регионов. Все пункты отбора проб приурочены к водосборам малых рек региона. Различия между пунктами сбора определялись уровнем антропогенного воздействия, классифицированного согласно методике, разработанной В.Л. Вершининым и Р.И. Замалетдиновым [4; 10].

В рамках гидроэкологического мониторинга водной среды изучаемых территорий был рассмотрен показатель УКИЗВ (таблица 1), который характеризует удельную величину гидрохимического загрязнения водных объектов (класс качества воды) [8; 13].

Как видно из таблицы 1 экологическое состояние исследуемых рек Белгородской области в целом имеет неудовлетворительное состояние. В большинстве случаев качество вод оценивается как «загрязнённая» или «грязная».

На рассматриваемых реках было проведено исследование выборки, включающей 770 экземпляров (684 особи вида *Pelophylax ridibundus*, 85—*Pelophylax esculentus*, одна особь—*Pelophylax lessonae*), отобранных из 36 локальных популяций комплекса *Pelophylax esculentus*. Географически ареал изученных популяций охватывал бассейны рек Днепр и Дон (рис. 1).

Таблица 1.

Гидрохимические показатели класса качества воды по мониторинговым данным Росгидромета (фрагмент базы данных)

Table 1. Hydrochemical indicators of water quality classes based on Roshydromet monitoring data (database excerpt)

№ п/п	Река (створ)	УКИЗВ	Класс качества воды	Качество вод	Характерные загрязняющие вещества
1	Северский Донец (с. Беломестное)	2,58	3а	загрязненная	NO_2^- , Cu, Mn, Fe , SO_4^{2-} , БПК ₅
2	Тихая Сосна (1 км выше г. Алексеевка, близ с. Ильинка)	2,25	3а	загрязненная	NO_2^- , Mn, SO_4^{2-} БПК ₅
3	Ворскла (с. Козинка)	4,38	4а	грязная	Fe, NO_2^- , Cu, PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , БПК ₅ , Mg
4	Оскол (с. Пятницкое)	3,51	3б	очень загрязненная	NO_2^- , Cu, PO_4^{3-} , Zn, БПК ₅ , NH_4^+
5	Оскол (с. Ивановка)	5,13	4б	грязная	NO_2^- , Cu, PO_4^{3-} , SO_4^{2-} БПК ₅ , Mn, Fe, NH_4^+
6	Нежеголь (16 км выше г. Шебекино)	2,13	3а	загрязненная	NO_2^- , Cu, БПК ₅ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}
7	Короча (1,5 км выше г. Короча)	2,76	3а	загрязненная	NO_2^- , Cu, БПК ₅ , SO_4^{2-} , NH_4^+

Примечание: УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды

Все пункты отбора проб можно условно разделить [13] по степени антропогенного воздействия на водную среду указанные в таблице 2:

1. Пункты (№ 1, 2, 3, 4, 23) с высокоурбанизированным ландшафтов, которые включают внутригородские территории (г. Белгород, Белгородское водохранилище) в следствие значительного влияния городских стоков, а также территории г. Губкин и Старый Оскол, которые находятся под влиянием селитебно-промышленных стоков Старооскольско-Губкинского горно-промышленного района (5 баллов).

2. Пункты (№ 6, 18, 22, 24, 25, 29, 31) в районах с высокой сельскохозяйственной нагрузкой (много пашни, животноводческие комплексы) (4 балла).

3. Умеренные районы (№ 10, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 32, 33, 36) с сельскохозяйственной нагрузкой (не канализованный частный сектор) (2-3 балла).

4. Квази-природные (5, 7, 9, 11, 30, 34, 35) геоэкологические условия (пункты отбора в лесах, на лугах и т.д.) (1 балл).

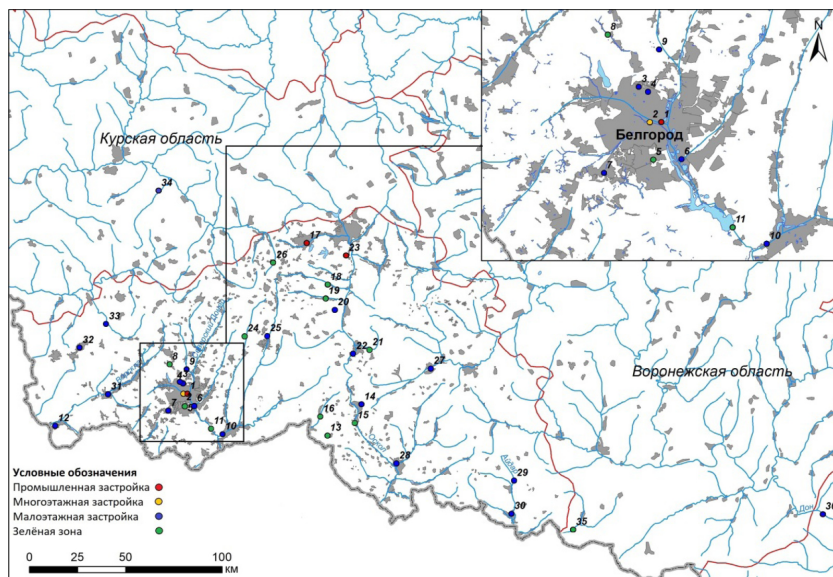


Рис. 1. Пункты сбора *P. esculentus* на водных объектах Белгородской области
Fig. 1. Collection sites for *P. esculentus* in water bodies of the Belgorod Region

Экстракция аллозимов осуществлялась посредством механического диспергирования мышечной ткани с использованием тefлонового гомогенизатора в среде трис-хлористоводородного буфера концентрации 0,05 моль/л (pH = 6,7), после чего материал подвергался криоконсервации при температурном режиме -60°C. Последующая очистка проводилась методом ультрацентрифугирования на протяжении получаса при скорости вращения ротора 10 000 оборотов в минуту и стабильной термостатированной температуре +4°C в ультрацентрифуге 5424 Eppendorf (Германия).

Электрофоретическое разделение аллозимов проводили в камере для вертикального электрофореза VE-20 (Helicon, Россия) с использованием полиакриламидного геля в концентрации 10%, выполненные согласно методике, предложенной Остерманом [20], в электролитической среде

трис-глицинового буфера (pH=8,3). Электрофорез проводился непрерывно в течение четырёх часов при постоянном электрическом потенциале величиной 200 В, и поддерживаемой постоянной низкой температурой (+4°C).

Идентификация эстеразных компонентов осуществлялась путём последовательного погружения обработанных гелевых блоков сначала в раствор борной кислоты (3%, 15 мин.), далее в среду раствора трис-хлористого буфера (0,1 моль/л, pH=7,8), обогащённого субстратом альфа-нафтил ацетатом и красителем Fast Red. Для визуализации лактатдегидрогеназных фракций использовали фосфатный буфер 0,1-молярной концентрации (pH=7,4), дополненный NAD, HCS, FMS и натрия лактатом высокой молярности (1M).

Проведенный анализ электрофореграмм зеленых лягушек выявил наличие трех генетических локусов, кодоминантного типа наследования (рис. 2). Из них выявлены два мономерные локуса эстераз трех аллелями у каждого (EST-1 и EST-2) и димерный локус лактатдегидрогеназы с тремя аллельными вариантами (LDH-3). Учитывая невозможность точного определения аллелей в локусах LDH-1 и LDH-2, исследования по ним не проводилось.

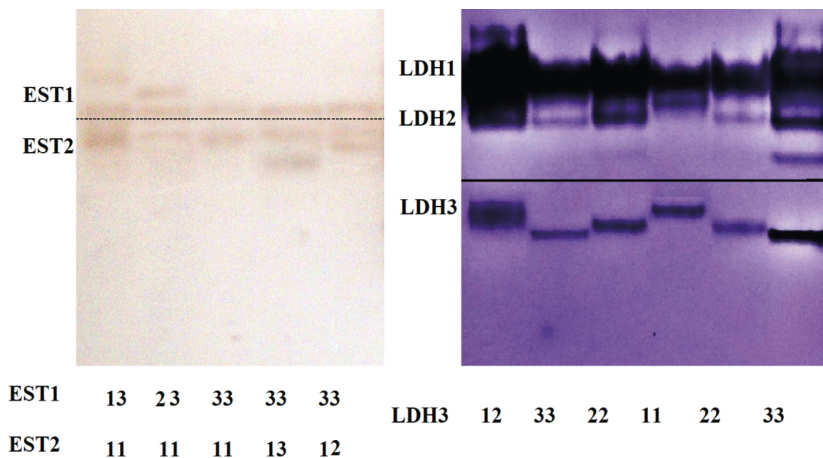


Рис. 2. Фрагмент электрофореграммы ферментов неспецифических эстераз и лактатдегидрогеназы

Fig. 2. A portion of the electrophoregram showing nonspecific esterases and lactate dehydrogenase

Полученные результаты обрабатывали стандартными методами вариационной статистики, с использованием пакета программ PAST V.3.1 [29], GenAlEx v.6.5 [30].

Результаты и их обсуждение

Известно, что экологическое состояние исследуемого региона оценивается как критическое ввиду специфики его географической локализации и длительной историко-эволюционной динамики развития. При этом, продолжается усиление технологического давления, которое ведёт к ухудшению общей экологии, негативно влияя на всю флору и фауну региона [8; 22].

При этом, несмотря на сильную антропогенную нагрузку в изучаемых популяциях наблюдается высокий уровень гетерогенности (табл. 2). Согласно полученным данным все изучаемые локусы полностью полиморфны, а среднее число аллелей на локус (A) составило 2,89.

Таблица 2.

Показатели генетического разнообразия в популяциях *P. esculentus* complex на малых реках Белгородской области

Table 2. Genetic diversity indices in populations of the *P. esculentus* complex in small rivers of the Belgorod Region

Река	Показатели генетического разнообразия*							
	N	P	A	Ae	I	Ho	He	F
1. С. Донец	19	100	2,67	2,26	0,840	0,509	0,508	-0,035
2. Везёлка	20	100	3	2,12	0,850	0,433	0,507	0,097
3. Оскочное	20	100	3	2,1	0,828	0,383	0,488	0,256
4. Ячевевский	16	100	3	1,76	0,650	0,417	0,368	-0,065
5. Дубовое	18	100	2,67	1,89	0,718	0,407	0,419	0,003
6. Устье	26	100	2,33	1,76	0,529	0,231	0,305	0,073
7. Майский	16	100	2,67	2,07	0,709	0,438	0,421	-0,030
8. Северный	22	100	2,67	1,99	0,709	0,515	0,430	-0,172
9. Шопино	23	100	2,67	2,12	0,731	0,348	0,439	0,116
10. Нежеголь	22	100	3	2,42	0,953	0,682	0,571	-0,171
11. Графовка	17	100	3	2,6	1,024	0,784	0,615	-0,275
12. Готово	25	100	3	2,39	0,962	0,667	0,578	-0,152
13. Плотва	13	100	3	2,5	0,967	0,744	0,595	-0,246
14. Сазон	20	100	3	2,42	0,967	0,683	0,574	-0,191
15. Оскол 1	22	100	3	2,42	0,962	0,742	0,578	-0,276
16. Волчья	18	100	3	2,52	0,996	0,741	0,600	-0,254
17. Губкин	60	100	3	2,39	0,961	0,506	0,571	0,108
18. Орлик	25	100	3	2,34	0,926	0,667	0,552	-0,222
19. Ольшанка	14	100	3	2,32	0,928	0,690	0,565	-0,242
20. Халань	34	100	2,67	2,14	0,803	0,559	0,511	-0,139
21. Беленькая	24	100	2,67	2,35	0,855	0,694	0,560	-0,313

22. Оскол	18	100	3	2,43	0,974	0,704	0,582	-0,223
23. Чуфичка	15	100	3	2,38	0,928	0,711	0,576	-0,244
24. Корень	19	100	3	2,37	0,943	0,579	0,564	-0,036
25. Короча	14	100	2,67	2,33	0,862	0,619	0,525	-0,195
26. Сейм	17	100	3	2,12	0,863	0,373	0,528	0,294
27. Т. Сосна	22	100	3	2,64	1,018	0,545	0,610	0,07
28. Валуй	24	100	2,67	2,14	0,784	0,653	0,497	-0,348
29. Г. Дунай	21	100	2,67	2,32	0,892	0,810	0,563	-0,478
30. Айдар	33	100	3	2,78	1,054	0,859	0,639	-0,344
31. Ворскла	19	100	3	2,67	1,026	0,702	0,624	-0,129
32. Ракита	21	100	3	2,51	0,966	0,746	0,594	-0,236
33. Пена	27	100	3	2,65	1,017	0,704	0,620	-0,138
34. Полная	22	100	3	2,82	1,065	0,758	0,645	-0,180
35. Белая	12	100	3	2,73	1,048	0,611	0,633	0,033
36. Дон	12	100	3	2,71	1,037	0,639	0,630	-0,003
Среднее	100		2,89± 0,03	2,35 ±0,05	0,898 ±0,022	0,607 ±0,023	0,544 ±0,014	-0,119 ±0,031

Примечание: N – число особей в выборке; P – процент полиморфных локусов; A – среднее число аллелей; Ae – эффективное число аллелей; I – индекс Шеннона; Ho – наблюдаемая гетерозиготность; He – ожидаемая гетерозиготность; F – индекс фиксации (коэффициент инбридинга).

Максимальное генетическое разнообразие выявлено среди популяций, населяющих ненарушенные либо слабо трансформированные природные биотопы с минимальным уровнем антропогенного воздействия (№34 «Полная», №33 «Айдар», №35 «Белая», №36 «Дон»). В свою очередь, наибольший уровень мономорфизма установлен внутри популяций, локализованных в городской агломерации Белгорода. Вместе с тем, согласно данным ранее проведенного нами исследования с использованием анализа микросателлитной ДНК (STR), наиболее гетерогенные популяции обитают в условиях сильного антропогенного пресса, а именно популяции №3 «Оскольное», №18 «Орлик», №4 «Ячевский» в то время, как наиболее мономорфные показатели генетического разнообразия отмечен в менее затронутых природных регионах (популяции №35 «Белая», №36 «Дон», №28 «Валуй») [3]. Данное противоречие объясняется воздействием естественного отбора на генетическую структуру изучаемых популяций, а именно на распределение частот аллелей изоферментных маркеров. Стоит также отметить, что проведенный ранее анализ фенотипического разнообразия изучаемого комплекса также выявил снижение фенотипического

разнообразия и повышение доли редких морф в градиенте антропогенного пресса [2]. Проведенный корреляционный анализ между уровнем фенотипической вариабельности внутри популяции и показателем наблюдаемой гетерозиготности по изоферментам выявил положительную зависимость ($R=0,699$, $p < 0,001$). В то же время аналогичная зависимость для селективно-нейтральных микросателлитных локусов не выявлена. Рассматриваемое противоречие обусловлено тем обстоятельством, что в условиях урбанизированных ландшафтов и интенсивного антропогенного воздействия некоторые аллельные варианты аллозимов получают селективное преимущество, способствуя формированию мономорфизма по соответствующим локусам. Между тем динамика распределения частот аллелей нейтральных маркеров микросателлитных последовательностей ДНК преимущественно определяется генетико-автоматическими процессами (дрейфом генов), что в контексте крупных размеров популяций земноводных представляется адаптивной реакцией организмов на динамичные и нестабильные экологические условия антропогенных биотопов [26].

Значения коэффициента инбридинга в изучаемых популяциях оказались на низком уровне. В ряде случаев, были отмечены отрицательные значения коэффициента инбридинга. Данный феномен объясняется избытком гетерозигот. По опубликованным нами ранее данным более половины особей от общей выборки представлены интрогрессивными или гибридными особями, что и обуславливает избыток гетерозигот. Данный факт свидетельствует о нестабильных условиях обитания, так как гибридные или интрогрессивные особи обладают селективным преимуществом по сравнению с генетически «чистыми» особями [7; 13], что в свою очередь также может приводить к изменению популяционных систем зеленых лягушек [17].

На следующем этапе исследования, мы определили уровень дифференциации изучаемых популяций при помощи модели Райта (табл. 3).

Индекс подразделенности популяций (F_{st}) в среднем имеет низкое значение, а уровень потока генов (N_m) больше 1, что «согласно теории эволюции со смещающимся равновесием» [39] свидетельствует о существенном обмене генами между популяциями *P. esculentus* комплекс в ходе активных миграций. При этом коэффициент инбридинга особей в субпопуляциях (F_{is}) и коэффициент инбридинга относительно большой популяции (F_{it}) имеют отрицательные значения, также свидетельствуют об избытке гетерозигот, обусловленный гибридизацией в популяциях.

Степень различия между локалитетами оценивали с использованием анализа главных компонент (PCA) на основе генетических дистанций по

Неи (рис. 3). При этом на первую компоненту (PC1) приходится 37,03% наблюдаемой изменчивости популяций, а на вторую (PC2) – 30,13% от общей дисперсии.

Таблица 3.

Значения полокусных значений коэффициентов инбридинга и уровня потока генов в изучаемых популяциях по данным изоферментов

Table 3. Values of the semi-locus inbredness coefficients and gene flow rates in the studied populations, based on isoenzyme data

Локусы	Показатели			
	Fis	Fit	Fst	Nm
Est 1	-0,256	-0,105	0,120	1,828
Est 2	-0,302	-0,111	0,147	1,451
LDH 3	0,143	0,192	0,056	4,205
M ± m	-0,138±0,141	-0,008±0,100	0,108±0,027	2,495±0,862

Примечание: Fis–коэффициент инбридинга особи относительно субпопуляции; Fit–коэффициент инбридинга особи относительно большей популяции; Fst–коэффициент инбридинга субпопуляции относительно большой популяции. Nm–средний показатель интенсивности обмена генами между популяциями.

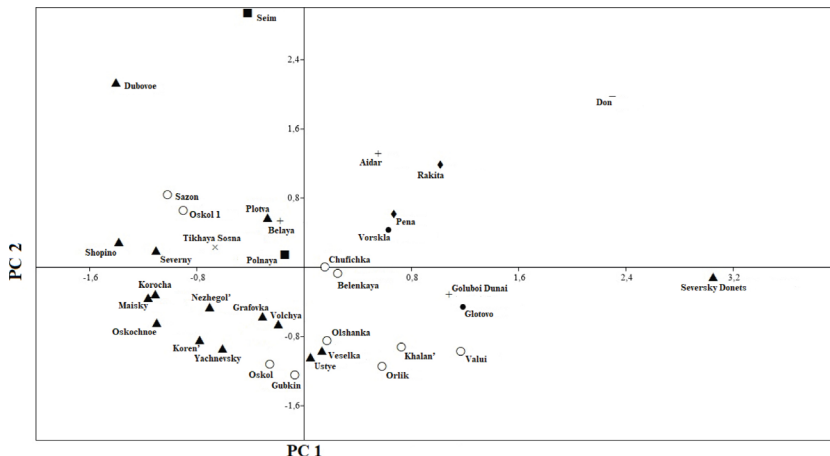


Рис. 3. Результаты анализа по методу главных компонент генетических расстояний Неи изоферментных маркеров. Значками обозначены популяции бассейнов: ◆ – р. Пена; ● – р. Ворскла; ■ – р. Сейм; ▲ – р. Северский Донец; ○ – р. Оскол; + – р. Айдар; × – р. Тихая Сосна; – – р. Дон.

Fig. 3. Results of a principal component analysis of genetic distances among NEI isoenzyme markers. The symbols denote river basin populations: ◆ – Pena River; ● – Vorskla River; ■ – Seim River; ▲ – Severksy Donets River; ○ – Oskol River; + – Aidar River; × – Tikhaya Sosna River; – – Don River.

Метод анализа главных компонент выявил значительную степень генетического сходства между большинством исследуемых популяций, невзирая на существенную пространственно-географическую дисперсность выборки. Тем не менее, диаграмма демонстрирует наличие обособленных кластеров, представленных уникальной популяцией №5 («Дубовое»), существенно географически удаленной локальной группой №36 («Дон») и отдельно стоящим пунктом №26 («Сейм»).

Особое внимание привлекает локализация пункта №1 («Северский Донец»), который характеризуется выраженной генетической дифференциацией относительно соседних локалитетов (№2 «Везёлка», №6 «Устье»), несмотря на территориальную смежность последних. Данный факт свидетельствует о наличии уникальных аллельных комбинаций и подтверждает предположение о генетической уникальности рассматриваемой группы особей.

Результаты анализа методом главных компонент согласуются с визуализацией графика регрессии, отображающего взаимосвязь показателя интенсивности межпопуляционного генного обмена (N_m) с величиной географической дистанции (D_g). Статистическая проверка данной корреляционной связи не позволила выявить наличие достоверной зависимости между указанными показателями (рис. 4).

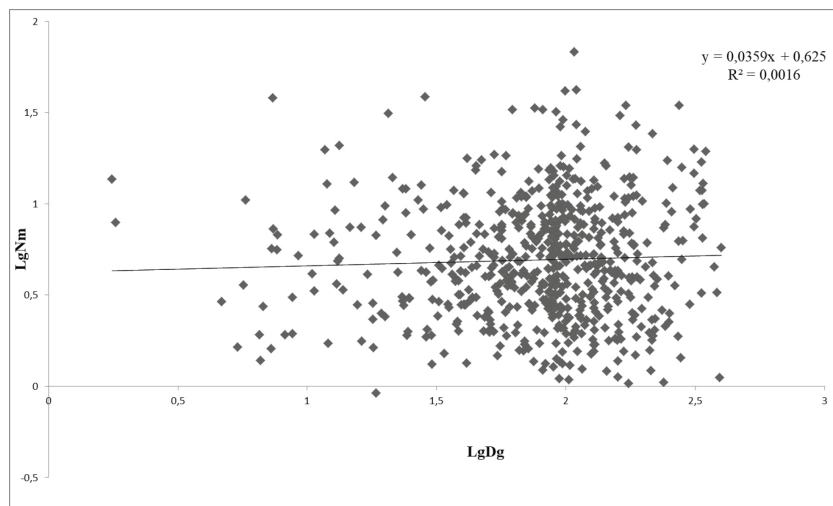


Рис. 4. Уравнение линейной регрессии

Fig. 4. The linear regression equation

Кроме того, нами была установлена существенная генетическая близость исследуемых популяций населяющих Донской и Днепровский водосборные бассейны, что также свидетельствует о высоком уровне обмена генами между этими двумя группами. Рассчитанная генетическая дистанция по Неи ($D = 0,053$), незначительное значение индекса подразделённости ($F_{st} = 0,017$) и высокий уровень межпопуляционного потока генов ($Nm = 14,57$ особей за одно поколение) указывают на активное перемещение амфибий данного таксономического комплекса внутри рассматриваемой территории.

Для сравнения показателей внутривидовой дифференциации тест-объектов с оценками экологической ситуации, построенными с учетом гидрохимического фона были рассчитаны коэффициенты корреляции между показателями экспертных балльных оценок гидроэкологической ситуации и показателями A , A_e , Ho , He (табл. 4).

Полученные данные демонстрируют слабую зависимость между показателями экспертных балльных оценок гидроэкологической ситуации и показателем генетического разнообразия. Например, в отношении балльных оценок и показателя A_e коэффициент корреляции $r = -0,34$ ($p > 0,05$), что говорит о сильном влиянии дополнительных факторов, не учтенных в комплексной гидроэкологической оценке (ядохимикаты на сельскохозяйственных угодьях, изменения климата, фактор беспокойства и т.п.). Также статистически не значимы оказались значения коэффициентов попарной корреляции между экспертными оценками экологической ситуации и показателями A , Ho и He .

Таблица 4.

Коэффициенты попарной корреляции между балльными оценками благополучия (неблагополучия) гидроэкологической ситуации и показателями генетического разнообразия по изоферментным маркерам

Table 4. Pairwise correlation coefficients between scores for the well-being (or poor state) of the hydroecological situation and indicators of genetic diversity based on isoenzyme markers

	баллы	A	A_e	Ho	He
баллы					
A	0,05				
A_e	-0,34	0,60			
Ho	-0,26	0,45	0,76		
He	-0,24	0,70	0,95	0,81	

Заключение

Полученные результаты позволяют расширить существующие представления относительно популяционно-генетической структуры комплек-

са *Pelophylax esculentus*, характеризующегося сложной гибридогенной природой. Анализ генетической структуры исследуемого региона на основании полиморфизмов белков (изоферментов) демонстрирует высокое разнообразие аллелей, обусловленное доминированием особей гибридной природы и интрогрессией. Данное явление представляет собой адаптационную реакцию популяции на нестабильность экологических условий местообитаний. Результаты проведенного анализа методом главных компонент, основанные на оценках генетических расстояний Неи и показателях дифференциации F-статистики Райта, указывают на наличие интенсивных миграционных процессов среди популяций данного вида, индуцированных антропогенным воздействием, что косвенно подтверждает негативную динамику гидроэкологических характеристик упомянутых малых рек и их водосборных территорий. Отсутствие тесной корреляционной связи между оценками гидроэкологической и гидрохимической ситуации малых рек Белгородской области и показателями генетического разнообразия в популяциях *P. esculentus* complex может служить основанием для уточнения системы и показателей гидроэкологического мониторинга и последующего уточнения (пересмотра) интегральных геоэкологических оценок.

При том стоит отметить, что нарушение показателей генетического разнообразия в популяциях *P. esculentus* complex, как в высокоурбанизированных ландшафтах, так и в квази-природной среде может быть связано, с одной стороны – с миграционными процессами особей, с другой – с серьезной антропогенной деформацией всех природных экосистем Белгородской области, в том числе и малых рек [7; 14; 15; 20; 33].

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FZWG-2025-0006.

Список литературы

1. Бархатов, А. С. (2022). *Популяционная структура комплекса среднеевропейских зеленых лягушек (Pelophylax esculentus complex) в условиях юга Среднерусской возвышенности* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, специальность 1.5.15]. 168 с. EDN: <https://elibrary.ru/KHCLAU>
2. Бархатов, А. С., & Снегин, Э. А. (2021). Фенотипическая структура популяций *Pelophylax esculentus* complex в условиях урбанизированных ландшафтов юга

- Среднерусской возвышенности. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки*, (3), 68–84. <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2021-3-7>. EDN: <https://elibrary.ru/JHGRAX>
3. Бархагов, А. С., Снегин, Э. А., & Юсупов, С. Р. (2021). Генетическая структура популяций комплекса зеленые лягушки (*Pelophylax esculentus* complex) на территории юга Среднерусской возвышенности. *Экологическая генетика*, 19(2), 107–119. <https://doi.org/10.17816/ecogen48555>. EDN: <https://elibrary.ru/XLXIWX>
 4. Боркин, Л. Я., Литвинчук, С. Н., Розанов, Ю. М., & Скоринов, Д. В. (2004). О криптических видах (на примере амфибий). *Зоологический журнал*, 83(8), 936–960. EDN: <https://elibrary.ru/OWGDLD>
 5. Вершинин, В. Л. (1997). *Экологические особенности популяций амфибий урбанизированных территорий* [Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук, 03.00.16]. Екатеринбург. 47 с. EDN: <https://elibrary.ru/ZKDFHJ>
 6. Вершинин, В. Л. (2007). *Биота урбанизированных территорий*. Екатеринбург. 73 с.
 7. Вершинин, В. Л., Ситников, И. А., Вершинина, С. Д., Трофимов, А. Г., Лебединский, А. А., & Миура, И. И. (2019). Митохондриальная гетероплазмия у озерной лягушки (*Pelophylax ridibundus* Pallas, 1771). *Генетика*, 55(8), 972–977. <https://doi.org/10.1134/S0016675819080174>. EDN: <https://elibrary.ru/MLXSHT>
 8. Дегтярь, А. В., Григорьева, О. И., & Татаринцев, Р. Ю. (2016). *Экология Белогорья в цифрах* [Монография]. Белгород: КОНСТАНТА. 122 с. ISBN 978-5-9786-0456-6. EDN: <https://elibrary.ru/ZEFKPZ>
 9. Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС». (2024). *Ежегодники качества поверхностных вод и эффективности проведенных водоохранных мероприятий по территории деятельности ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС»*. Курск.
 10. Ермаков, О. А., Файзулин, А. И., Закс, М. М., Кайбелева, Э. И., & Зарипова, Ф. Ф. (2014). Распространение «западной» и «восточной» форм озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* s. l. на территории Самарской и Саратовской областей (по данным анализа митохондриальной и ядерной ДНК). *Известия Самарского научного центра РАН*, 16(5-1), 409–412. EDN: <https://elibrary.ru/TVWSFJ>
 11. Замалетдинов, Р. И. (2002). Фенотипическая структура популяций зеленых лягушек на урбанизированных территориях. *Поволжский экологический журнал*, (2), 163–165.
 12. Замалетдинов, Р. И., Павлов, А. В., Закс, М. М., Иванов, А. Ю., & Ермаков, О. А. (2015). Молекулярно-генетическая характеристика лягушек *Pelophylax*

- esculentus* комплекса на восточной периферии ареала (Поволжье, Республика Татарстан). *Вестник Томского государственного университета. Биология*, (3-31), 54–66. <https://doi.org/10.17223/19988591/31/5>. EDN: <https://elibrary.ru/UMIEQJ>
13. Иванов, А. Ю. (2019). *Молекулярно-генетические и экологические особенности распространения криптических форм озерной лягушки в восточной части ареала* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, 03.02.08]. Пенза. 137 с. EDN: <https://elibrary.ru/HBFIIB>
 14. Киселев, В. В., & Корнилова, Е. А. (2025). Оценка общего гидроэкологического состояния малых рек Белгородской области. *Региональные геосистемы*, 49(1), 80–92. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-1-80-92>. EDN: <https://elibrary.ru/MRCUYB>
 15. Курепина, В. А., Киселев, В. В., & Корнилов, А. Г. (2022). Динамика гидроэкологической ситуации р. Тихая Сосна на территории Белгородской и Воронежской областей. *Региональные геосистемы*, 46(1), 108–118. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-1-108-118>. EDN: <https://elibrary.ru/RUFDUZ>
 16. Корнилова, Е. А., Лисецкий, Ф. Н., & Родионова, М. Е. (2023). Гидроэкологические особенности реки Ворсклы (российский участок) в контексте природно-хозяйственных изменений. *Региональные геосистемы*, 47(4), 550–568. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-550-568>. EDN: <https://elibrary.ru/PETHMS>
 17. Лада, Г. А. (2021). Изменения популяционных систем зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* complex) на территории Русской равнины. *Полевой журнал биолога*, (3-1), 53–63. <https://doi.org/10.52575/2658-3453-2021-3-1-53-63>. EDN: <https://elibrary.ru/LLMYZQ>
 18. Лисецкий, Ф. Н., Дегтярь, А. В., Буряк, Ж. А., Павлюк, Я. В., Нарожная, А. Г., Землякова, А. В., & Маринина, О. А. (2015). *Реки и водные объекты Белогорья*. Белгород: Константа. 362 с. ISBN 978-5-9786-0413-9. EDN: <https://elibrary.ru/VTQNNR>
 19. Макеева, В. М., Белоконов, М. М., Малюченко, О. П., & Леонтьева, О. А. (2006). Оценка состояния генофонда природных популяций позвоночных животных в условиях фрагментированного ландшафта Москвы и Подмосковья (на примере бурых лягушек). *Генетика*, 42(5), 628–642. EDN: <https://elibrary.ru/НТОВСВ>
 20. Остерман, Л. А. (1981). *Методы исследования белков и нуклеиновых кислот. Электрофорез и ультрацентрифугирование*. М.: Наука. 288 с.
 21. Петин, А. Н., Петина, М. А., & Новикова, Ю. И. (2014). *Северский Донец: гидрологический режим и экологическое состояние вод* [Монография]. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ». 184 с.

22. Присный, А. В., Седин, И. Ф., Червонный, В. В., Присный, Ю. А., Соколов, А. Ю., & Лобода, Б. М. (2012). *Животный мир Белгородской области* [Коллективная монография] (А. В. Присный, ред.). Белгород: Белгородская обл. тип. 400 с.
23. Свинин, А. О. (2015). *Распространение, типы популяционных систем и морфологическая изменчивость зеленых лягушек гибридогенного Pelophylax esculentus-комплекса на северо-востоке их ареалов* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, 03.02.04]. Казань. 205 с.
24. Снегин, Э. А., Снегина, Е. А., & Артемчук, О. Ю. (2019). Оценка генетической структуры популяций кустарниковой улитки (*Fruticicola fruticum*) на основе локусов неспецифических эстераз. *Экологическая генетика*, 17(4), 15–26. <https://doi.org/10.17816/ecogen17415-26>. EDN: <https://elibrary.ru/BIWHRN>
25. Файзулин, А. И., Замалетдинов, Р. И., Литвинчук, С. Н., Розанов, Ю. М., Боркин, Л. Я., Ермаков, О. А., Ручин, А. Б., Лада, Г. А., Свинин, А. О., Башинский, И. В., & Чихляев, И. В. (2018). Видовой состав и особенности распространения зеленых лягушек (*Pelophylax esculentus* complex) на особо охраняемых природных территориях Среднего Поволжья (Россия). *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.24189/ncr.2018.056>. EDN: <https://elibrary.ru/UZEZJA>
26. Шмальгаузен, И. И. (1968). *Факторы эволюции (Теория стабилизирующего отбора)*. М.: Наука. 451 с.
27. Berger, L. (1970). Some characteristics of crosses within *Rana esculenta* complex in postlarval development. *Annales Zoologici*, 27(17), 373–416.
28. Čavlović, K., Buj, I., Karaica, D., Jelić, D., & Choleva, L. (2018). Composition and age structure of the *Pelophylax esculentus* complex (Anura; Ranidae) population in inland Croatia. *Salamandra*, 54, 11–20. EDN: <https://elibrary.ru/SDXKTT>
29. Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), Article 4. 9 pp.
30. Peakall, R., & Smouse, P. E. (2006). GenAlEx 6: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research — an update. *Molecular Ecology Notes*, 6(1), 288–295. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x>
31. Skierska, K., Lagner, A., Rozenblut-Kościsty, B., et al. (2023). Population structure, mate choice, and genome transmission in naturally formed pairs in a *Pelophylax lessonae*–*Pelophylax esculentus* hybridogenetic system. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 77(8), 92. <https://doi.org/10.1007/s00265-023-03366-y>. EDN: <https://elibrary.ru/UDUVLK>
32. Svinin, A. O., Dedukh, D. V., Borkin, L. J., et al. (2021). Genetic structure, morphological variation, and gametogenic peculiarities in water frogs (*Pelophylax*) from

- northeastern Europe. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 59, 646–662. <https://doi.org/10.1111/jzs.12447>. EDN: <https://elibrary.ru/HYLIGR>
33. Plötner, J. (2005). *Die westpaläarktischen Wasserfrösche: von Märtyren der Wissenschaft zur biologischen Sensation*. Bielefeld: Laurenti-Verlag. 160 p. (Beiheft der Zeitschrift für Feldherpetologie, 9).
34. Lisetskii, F. N., & Buryak, Z. A. (2023). Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin. *Water*, 15(13), 2443. <https://doi.org/10.3390/w15132443>. EDN: <https://elibrary.ru/VRTLTU>
35. Uzzell, T., Gunther, R., & Berger, L. (1977). *Rana ridibunda* and *Rana esculenta*: A leaky hybridogenetic system (Amphibia Salientia). *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 128(9), 147–171.
36. Tunner, H. G. (1973). Das Albumin und andere Bluteiweiße bei *Rana ridibunda* Pallas, *Rana lessonae* Camerano, *Rana esculenta* Linne und deren Hybriden. *Zeitschrift für Zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 11, 219–233.
37. Tunner, H. G. (1974). Die klonale Struktur einer Wasserfroschpopulation. *Zeitschrift für zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 12(4), 309–314.
38. Vinogradov, A. E., Borkin, L. J., Günther, R., & Rosanov, J. M. (1990). Genome elimination in diploid and triploid *Rana esculenta* males: Cytological evidence from DNA flow cytometry. *Genome*, 33(5), 619. <https://doi.org/10.1139/g90-092>. EDN: <https://elibrary.ru/XOFJWI>
39. Wright, S. (1970). *Random drift and shifting balance theory of evolution. Mathematical topics in population genetics*. Berlin: Springer Verlag. 31 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46244-3_1

References

1. Barkhatov, A. S. (2022). *Population structure of the Central European green frog complex (*Pelophylax esculentus* complex) in the southern part of the Central Russian Upland* [Doctoral dissertation, specialty 1.5.15]. 168 pp. EDN: <https://elibrary.ru/KHCLAU>
2. Barkhatov, A. S., & Snegin, E. A. (2021). Phenotypic structure of *Pelophylax esculentus* complex populations in urbanized landscapes of the southern Central Russian Upland. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Povolzhskiy Region. Natural Sciences*, (3), 68–84. <https://doi.org/10.21685/2307-9150-2021-3-7>. EDN: <https://elibrary.ru/JHGRAX>
3. Barkhatov, A. S., Snegin, E. A., & Yusupov, S. R. (2021). Genetic structure of green frog complex (*Pelophylax esculentus* complex) populations in the southern part of the Central Russian Upland. *Ecological Genetics*, 19(2), 107–119. <https://doi.org/10.17816/ecogen48555>. EDN: <https://elibrary.ru/XLXIWX>

4. Borkin, L. Ya., Litvinchuk, S. N., Rozanov, Yu. M., & Skorinov, D. V. (2004). On cryptic species (using amphibians as an example). *Zoological Journal*, 83(8), 936–960. EDN: <https://elibrary.ru/OWGDLD>
5. Vershinin, V. L. (1997). *Ecological features of amphibian populations in urbanized areas* [Abstract of doctoral dissertation, 03.00.16]. Yekaterinburg. 47 pp. EDN: <https://elibrary.ru/ZKDFHJ>
6. Vershinin, V. L. (2007). *Biota of urbanized areas*. Yekaterinburg. 73 pp.
7. Vershinin, V. L., Sitnikov, I. A., Vershinina, S. D., Trofimov, A. G., Lebedinsky, A. A., & Miura, I. I. (2019). Mitochondrial heteroplasmy in the marsh frog (*Pelophylax ridibundus* Pallas, 1771). *Genetics*, 55(8), 972–977. <https://doi.org/10.1134/S0016675819080174>. EDN: <https://elibrary.ru/MLXSHT>
8. Degtyar, A. V., Grigorieva, O. I., & Tatarintsev, R. Yu. (2016). *Ecology of Belogorye in numbers* [Monograph]. Belgorod: Konstanta. 122 pp. ISBN 978-5-9786-0456-6. EDN: <https://elibrary.ru/ZEFKPZ>
9. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet), Central Black Earth Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring. (2024). *Annual reports on surface water quality and effectiveness of water protection measures within the area of operation of the Central Black Earth Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring*. Kursk.
10. Ermakov, O. A., Faizulin, A. I., Zaks, M. M., Kaibeleva, E. I., & Zaripova, F. F. (2014). Distribution of the “western” and “eastern” forms of the marsh frog *Pelophylax ridibundus* s. l. in the Samara and Saratov regions (based on mitochondrial and nuclear DNA analysis). *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 16(5-1), 409–412. EDN: <https://elibrary.ru/TVWSFJ>
11. Zamaletdinov, R. I. (2002). Phenotypic structure of green frog populations in urbanized areas. *Povolzhsky Ecological Journal*, (2), 163–165.
12. Zamaletdinov, R. I., Pavlov, A. V., Zaks, M. M., Ivanov, A. Yu., & Ermakov, O. A. (2015). Molecular genetic characteristics of frogs of the *Pelophylax esculentus* complex in the eastern periphery of the range (Volga region, Republic of Tatarstan). *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, (3-31), 54–66. <https://doi.org/10.17223/19988591/31/5>. EDN: <https://elibrary.ru/UMIEQJ>
13. Ivanov, A. Yu. (2019). *Molecular genetic and ecological features of the distribution of cryptic forms of the marsh frog in the eastern part of the range* [Doctoral dissertation, 03.02.08]. Penza. 137 pp. EDN: <https://elibrary.ru/HBFIIB>
14. Kiselev, V. V., & Kornilova, E. A. (2025). Assessment of the general hydroecological state of small rivers in the Belgorod region. *Regional Geosystems*, 49(1), 80–92. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2025-49-1-80-92>. EDN: <https://elibrary.ru/MRCUYB>

15. Kurepina, V. A., Kiselev, V. V., & Kornilov, A. G. (2022). Dynamics of the hydroecological situation of the Tikhaya Sosna River in the Belgorod and Voronezh regions. *Regional Geosystems*, 46(1), 108–118. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-1-108-118>. EDN: <https://elibrary.ru/RUFDUZ>
16. Kornilova, E. A., Lisetskii, F. N., & Rodionova, M. E. (2023). Hydroecological features of the Vorskla River (Russian section) in the context of natural and economic changes. *Regional Geosystems*, 47(4), 550–568. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-550-568>. EDN: <https://elibrary.ru/PETHMS>
17. Lada, G. A. (2021). Changes in population systems of green frogs (*Pelophylax esculentus* complex) in the East European Plain. *Field Journal of Biologist*, (3-1), 53–63. <https://doi.org/10.52575/2658-3453-2021-3-1-53-63>. EDN: <https://elibrary.ru/LLMYZQ>
18. Lisetskii, F. N., Degtyar, A. V., Buryak, Zh. A., Pavlyuk, Ya. V., Narozhnyaya, A. G., Zemlyakova, A. V., & Marinina, O. A. (2015). *Rivers and water bodies of Belogor'ye*. Belgorod: Konstanta. 362 pp. ISBN 978-5-9786-0413-9. EDN: <https://elibrary.ru/VTQNNR>
19. Makeeva, V. M., Belokon, M. M., Malyuchenko, O. P., & Leontyeva, O. A. (2006). Assessment of the gene pool state of natural vertebrate populations under fragmented landscape conditions in Moscow and the Moscow region (using brown frogs as an example). *Genetics*, 42(5), 628–642. EDN: <https://elibrary.ru/HTOBCB>
20. Osterman, L. A. (1981). *Methods for studying proteins and nucleic acids: Electrophoresis and ultracentrifugation*. Moscow: Nauka. 288 pp.
21. Petin, A. N., Petina, M. A., & Novikova, Yu. I. (2014). *Seversky Donets: Hydrological regime and ecological state of waters* [Monograph]. Belgorod: Publishing House “Belgorod”, Belgorod State National Research University. 184 pp.
22. Prisnyi, A. V., Sedin, I. F., Chervonnyi, V. V., Prisnyi, Yu. A., Sokolov, A. Yu., & Loboda, B. M. (2012). *Fauna of the Belgorod Region* [Collective monograph] (A. V. Prisnyi, Ed.). Belgorod: Belgorod Regional Printing House. 400 pp.
23. Svinin, A. O. (2015). *Distribution, types of population systems, and morphological variability of green frogs of the hybridogenetic Pelophylax esculentus complex in the northeastern part of their range* [Doctoral dissertation, 03.02.04]. Kazan. 205 pp.
24. Snegin, E. A., Snegina, E. A., & Artemchuk, O. Yu. (2019). Assessment of the genetic structure of shrub snail (*Fruticicola fruticum*) populations based on nonspecific esterase loci. *Ecological Genetics*, 17(4), 15–26. <https://doi.org/10.17816/ecogen17415-26>. EDN: <https://elibrary.ru/BIWHRN>
25. Faizulin, A. I., Zamaletdinov, R. I., Litvinchuk, S. N., Rozanov, Yu. M., Borkin, L. Ya., Ermakov, O. A., Ruchin, A. B., Lada, G. A., Svinin, A. O., Bashinsky, I. V., & Chikhlyayev, I. V. (2018). Species composition and distribution patterns of green

- frogs (*Pelophylax esculentus* complex) in protected areas of the Middle Volga region (Russia). *Nature Conservation Research. Reserve Science*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.24189/ncr.2018.056>. EDN: <https://elibrary.ru/UZEZJA>
26. Shmalgauzen, I. I. (1968). *Factors of evolution (Theory of stabilizing selection)*. Moscow: Nauka. 451 pp.
 27. Berger, L. (1970). Some characteristics of crosses within *Rana esculenta* complex in postlarval development. *Annales Zoologici*, 27(17), 373–416.
 28. Čavlović, K., Buj, I., Karaica, D., Jelić, D., & Choleva, L. (2018). Composition and age structure of the *Pelophylax esculentus* complex (Anura; Ranidae) population in inland Croatia. *Salamandra*, 54, 11–20. EDN: <https://elibrary.ru/SDXKTT>
 29. Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), Article 4. 9 pp.
 30. Peakall, R., & Smouse, P. E. (2006). GenA1Ex 6: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research — an update. *Molecular Ecology Notes*, 6(1), 288–295. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x>
 31. Skierska, K., Lagner, A., Rozenblut-Kościsty, B., et al. (2023). Population structure, mate choice, and genome transmission in naturally formed pairs in a *Pelophylax lessonae*–*Pelophylax esculentus* hybridogenetic system. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 77(8), 92. <https://doi.org/10.1007/s00265-023-03366-y>. EDN: <https://elibrary.ru/UDUVLK>
 32. Svinin, A. O., Dedukh, D. V., Borkin, L. J., et al. (2021). Genetic structure, morphological variation, and gametogenic peculiarities in water frogs (*Pelophylax*) from northeastern Europe. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 59, 646–662. <https://doi.org/10.1111/jzs.12447>. EDN: <https://elibrary.ru/HYLIGR>
 33. Plötner, J. (2005). *Die westpaläarktischen Wasserfrösche: von Märtyrern der Wissenschaft zur biologischen Sensation*. Bielefeld: Laurenti-Verlag. 160 pp. (Beiheft der Zeitschrift für Feldherpetologie, 9).
 34. Lisetskii, F. N., & Buryak, Z. A. (2023). Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin. *Water*, 15(13), 2443. <https://doi.org/10.3390/w15132443>. EDN: <https://elibrary.ru/VRTLTY>
 35. Uzzell, T., Gunther, R., & Berger, L. (1977). *Rana ridibunda* and *Rana esculenta*: A leaky hybridogenetic system (Amphibia Salientia). *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 128(9), 147–171.
 36. Tunner, H. G. (1973). Das Albumin und andere Bluteiweiße bei *Rana ridibunda* Pallas, *Rana lessonae* Camerano, *Rana esculenta* Linne und deren Hybriden. *Zeitschrift für Zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 11, 219–233.

37. Tunner, H. G. (1974). Die klonale Struktur einer Wasserfroschpopulation. *Zeitschrift für zoologische Systematik und Evolutionsforschung*, 12(4), 309–314.
38. Vinogradov, A. E., Borkin, L. J., Günther, R., & Rosanov, J. M. (1990). Genome elimination in diploid and triploid *Rana esculenta* males: Cytological evidence from DNA flow cytometry. *Genome*, 33(5), 619. <https://doi.org/10.1139/g90-092>. EDN: <https://elibrary.ru/XOFJWI>
39. Wright, S. (1970). *Random drift and shifting balance theory of evolution. Mathematical topics in population genetics*. Berlin: Springer Verlag. 31 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46244-3_1

ВКЛАД АВТОРОВ

- Бархатов А.С.:** Формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач. Общее руководство. Сбор образцов для исследования. Проведение экспериментальной части. Написание черновика рукописи.
- Снегин Э.А.:** Формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач. Общее руководство. Проведение экспериментальной части.
- Киселев В.В.:** Сбор образцов для исследования. Интерпретация результатов исследования. Анализ гидрохимического состояния рассматриваемых водных объектов. Ранжирование (балльная оценка) пунктов отбора по степени антропогенного воздействия на водную среду различных антропо-функциональных зонах. Написание черновика рукописи.
- Снегина Е.А.:** Статистическая обработка данных. Визуализация данных. Интерпретация результатов исследования. Подбор и анализ литературы.
- Корнилов А.Г.:** Общее руководство. Проведение корреляционного анализа между показателями внутривидовой дифференциации тест-объектов с данными экспертных оценок гидроэкологической ситуации в районах исследования, построенными с учетом гидрохимического фона.
- Раевская М.В.:** Профессиональный перевод статьи на английский язык, подбор и анализ списка литературы по гидроэкологической и гидрохимической тематике. Редактирование рукописи и оформление рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

- Anatoly S. Barkhatov:** Formation of an idea; formulation or development of key goals and objectives. General management. Collection of samples for research. Conducting the experimental part. Writing a draft manuscript.
- Eduard A. Snegin:** Formation of an idea; formulation or development of key goals and objectives. General management. Conducting the experimental part.
- Vladislav V. Kiselev:** Collection of samples for research. Interpretation of research results. Analysis of the hydrochemical state of the water bodies under consideration.

Ranking (point assessment) of sampling points according to the degree of anthropogenic impact on the aquatic environment in various anthropo-functional zones. Writing a draft manuscript.

Elena A. Snegina: Statistical data processing. Data visualization. Interpretation of research results. Selection and analysis of literature.

Andrey G. Kornilov: General management. Conducting a correlation analysis between the indicators of intraspecific differentiation of test objects and expert assessments of the hydroecological situation in the study areas, taking into account the hydrochemical background.

Maria V. Raevskaya: Professional translation of the article into English, selection and analysis of the list of literature on hydroecological and hydrochemical topics. Editing and formatting the manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Бархатов Анатолий Сергеевич, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник НИЦ Геномной селекции

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
barkhatov@bsu.edu.ru*

Снегин Эдуард Анатольевич, доктор биологических наук, профессор, директор НИЦ Геномной селекции

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
snegin@bsu.edu.ru*

Киселев Владислав Викторович, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
kiselev_v@bsuedu.ru*

Снегина Елена Андреевна, научный сотрудник НИЦ Геномной селекции

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
snegina@bsu.edu.ru*

Корнилов Андрей Геннадьевич, доктор географических наук, профессор, ведущий кафедрой географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
kornilov@bsuedu.ru*

Раевская Мария Викторовна, ассистент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация
raevskaya@bsuedu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anatoly S. Barkhatov, Candidate of Biological Sciences, Junior Research Fellow at the Research Center for Genomic Selection

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
barkhatov@bsu.edu.ru*

Eduard A. Snegin, Doctor of Biological Sciences, Professor, Director of the Research Center for Genomic Selection

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
snegin@bsu.edu.ru*

Vladislav V. Kiselev, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor in the Department of Geography, Geoecology, and Life Safety at the Institute of Earth Sciences

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
kiselev_v@bsuedu.ru*

Elena A. Snegina, Research Associate, Research Center for Genomic Selection

*Belgorod State University
85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
snegina@bsu.edu.ru*

Andrey G. Kornilov, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Chair of the Department of Geography, Geoecology, and Life Safety at the Institute of Earth Sciences

Belgorod State University

85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation

kornilov@bsuedu.ru

Maria V. Raevskaya, Assistant Professor, Department of Geography, Geoecology, and Life Safety, Institute of Earth Sciences

Belgorod State University

85, Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation

raevskaya@bsuedu.ru

Поступила 10.12.2025

После рецензирования 04.02.2026

Принята 26.02.2026

Received 10.12.2025

Revised 04.02.2026

Accepted 26.02.2026