

ЭКОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОХРАНЕ ЖИВОТНЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНЫХ ВИДОВ В ГОРОДЕ МОСКВЕ)

© 2010 В.М. Макеева¹, А.В. Смуров²

¹Музей землеведения и ²Экоцентр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 11.05.2010

Впервые предложен и апробирован в системе городских особо охраняемых территорий (ООПТ) эколого-генетический подход к охране животных урбанизированных ландшафтов (методология, концепция, стратегия, технологии). На основании данных об эффективной численности исследованных популяций рассчитан прогноз скорости исчезновения московских популяций модельных видов животных (одного вида наземных моллюсков и 2 видов бурых лягушек). Более 56% популяций может исчезнуть в ближайшие 100 лет, из них 28% - за 25 лет, при стандартном подходе к охране животных (территориальной охране). Предложенные эколого-генетическая концепция и стратегия охраны животных включают, наряду с территориальной охраной, активное восстановление генофонда популяций. Разработаны эколого-генетические принципы и методы сохранения разнообразия и численности животных антропогенных экосистем, эффективность которых подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: популяция, генофонд, охрана животных, урбанизированный ландшафт, эколого-генетический подход, прогноз, стратегия охраны

В условиях происходящей на наших глазах глобальной урбанизации планеты особую актуальность приобретает решение одной из центральных проблем экологии – разработки эффективных подходов к сохранению биоразнообразия (в том числе – диких животных) антропогенных и особенно – урбанизированных территорий. В настоящее время урбанизированные ландшафты занимают более 60% территории планеты. Основная часть животных в них обитает рефугиально на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Однако, проблема устойчивого сохранения видов диких животных в рамках традиционного подхода в них не была решена. В антропогенных и урбанизированных ландшафтах наблюдается максимальная скорость исчезновения видов животных: в Европе под угрозой исчезновения находится от 40% до 70% видов животных, обитающих на городских особо охраняемых территориях. Доля исчезающих видов позвоночных животных, внесенных в Красную книгу г. Москвы, составляет: млекопитающих – 40%, птиц – 50%, рептилий –

60%, амфибий – 70%. В последнее десятилетие в России стали активно создаваться городские ООПТ, расположенные в крупных населенных пунктах. В Москве создана мощная сеть особо охраняемых территорий, охватывающих около 16% территории города [1]. Главная отличительная черта городских ООПТ состоит в том, что небольшие по площади территории находятся в виде отдельных изолированных островов в предельно урбанизированном ландшафте и охрана биоразнообразия в них сочетается с активным использованием территории в целях рекреации.

Теория научной организации охраны биоразнообразия, в т. ч. животных, в урбанизированных ландшафтах (при создании городских ООПТ) была недостаточно разработана. Современная чисто экологическая концепция сохранения биоразнообразия, нацеленная на территориальную охрану, опирается, главным образом, на способность охраняемых экосистем к самовосстановлению [2-4]. Такой традиционный подход не достаточен для решения проблем сохранения биоразнообразия урбанизированных территорий, т.к. не учитывает специфические условия обитания животных в мелких изолятах фрагментированного ландшафта, приводящих к быстрому изменению структурно-функциональных свойств генофонда

Макеева Вера Михайловна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник. E-mail: vmmakeeva@yandex.ru

Смуров Андрей Валерьевич, доктор биологических наук, директор. E-mail: smr@mes.msu.ru

охраняемых популяций и их быстрому вымиранию за счет дрейфа генов и инбридинга [5, 6]. Масштаб и степень изменения генофонда популяций животных, обитающих в условиях антропогенной фрагментации ландшафта, был выявлен в результате количественной оценки состояния генофонда, проведенной на примере модельных видов на городских ООПТ в г. Москве. Для этого впервые в России и мире была создана система эколого-генетического мониторинга городских популяций животных (на примере модельных объектов – одного вида наземных моллюсков – *Bradybaena*¹ *fruticum*, Mull., и 2 видов бурых лягушек – остромордой, *Rana arvalis* Nills. и травяной, *Rana temporaria* L.). Проведена количественная оценка степени изменения параметров генофонда городских популяций животных в сравнительном аспекте с природными эталонными популяциями. Выявлено резкое сокращение (до 70%) генетического разнообразия мелких изолятов урбанизированного ландшафта по сравнению с эталонными природными популяциями [7, 8]. Выявлены факторы и механизмы структурно-функционального изменения генофонда популяций, происходящие в условиях антропогенной фрагментации ландшафта – дрейф генов и сопутствующий ему инбридинг. Главный итог количественной оценки состояния генофонда популяций состоит в следующем: выявлена общая тенденция необратимого снижения степени гетерозиготности городских популяций. Уменьшение степени гетерозиготности популяций связано с уменьшением их жизнеспособности, плодовитости, скорости роста и других показателей [9], что имеет решающее значение для понимания и разработки генетических аспектов охраны биоразнообразия.

Выявленную общую закономерность обеднения разнообразия генофонда городских изолятов следует квалифицировать как устойчивое необратимое изменение генофонда, происходящее под воздействие антропогенной изоляции. Поэтому одновременно с созданием городских ООПТ возникла проблема сохранения и восстановления их биоразнообразия, которая стала решаться в рамках государственной программы по «Восстановлению биоразнообразия города Москвы». Острая необходимость решения практических задач по сохранению и восстановлению биоразнообразия на ООПТ г. Москвы повлекла за собой

потребность разработки эколого-генетического подхода к охране биоразнообразия, который включает популяционно-генетический уровень охраны. Концепция и стратегия охраны для урбанизированных территорий на этом уровне до последнего времени отсутствовала.

Эколого-генетический подход к сохранению биоразнообразия (в т.ч. животных) антропогенных экосистем (методология, концепция, стратегия, технологии) – это подход к охране с учётом структурно-функционального состояния экосистем на популяционно-генетическом уровне их организации. Теоретическим основанием для разработки эколого-генетического подхода к охране биоразнообразия антропогенных экосистем явилась формулировка эколого-генетической теории неизбежности сокращения биоразнообразия в антропогенных ландшафтах Земли, включая диких животных [7, 10]. Согласно теории в условиях урбанизации фрагментация ландшафта, ведущая к образованию мелких изолятов, уменьшает генетическое разнообразие популяций животных за счет активизации негативных генетических процессов – дрейфа генов и инбридинга. Результатом этих процессов является снижение способности к адаптации и, как следствие, неизбежное вымирание популяций. Практическим основанием для разработки эколого-генетического подхода к охране животных антропогенных экосистем послужили результаты 25-летнего оригинального эколого-генетического мониторинга (точка отсчета 1975 г.) популяций кустарниковой улитки *Bradybaena fruticum* (Muller, 1774), выявившего факты резкого изменения генофонда популяций в условиях антропогенного ландшафта Москвы и Подмосковья [11]. Как же реальное состояние генофонда, полученное с помощью его оценки, отражается на длительности существования популяций? Ответ на этот вопрос был получен с помощью прогноза, сделанного на основании эффективной численности исследованных популяций. Результаты оценки состояния генофонда и прогноз явились основанием для разработки эколого-генетической концепции и стратегии охраны животных.

Материалы и методы. В систему эколого-генетического мониторинга вошли 36 популяций животных: 20 популяций улиток, из которых 12 обитают на ООПТ г. Москвы, и 16 популяций бурых лягушек, из них 9 городских популяций. Остальные популяции животных были собраны в 5 пунктах Северо-западного Подмосковья, Калужской и Новгородской областях. Всего исследовано более

¹ Некоторые авторы относят этот вид к роду *Fruticicola*: Кантор Ю.И., Сысоев А.В. Каталог моллюсков России и сопредельных стран. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. – 627 с.

30000 раковин моллюсков и более 9000 методом электрофореза (1975-2005 гг.), из них около 3000 улиток – по 13 полиморфным локусам (2002-2003 гг.). Исследовано 554 лягушки по 7 полиморфным локусам, 21 аллелю (2003 г).

Методика расчета длительности существования популяций (прогноза). Для расчетов длительности существования популяций была использована формула, предложенная М.Э. Сулеем [12]:

$$t=1,5 N_e \quad (1),$$

где t – число поколений, Ne – эффективная численность популяции.

Расчет эффективной численности популяции. Для составления прогноза необходимо знание эффективной численности популяции, то есть количества особей, достигших репродуктивного возраста. Она вычисляется по формуле, выведенной на основании формулы Райта [5]:

$$N_e = \frac{4N_m \cdot N_f}{N_m + N_f}, \quad (2)$$

где Ne – эффективная численность популяции, Nm – число самцов, Nf – число самок.

Формула Райта (3) описывает условия увеличения коэффициента инбридинга за одно поколение:

$$\Delta F = \frac{1}{8N_m} + \frac{1}{8N_f}; \quad (3)$$

где ΔF – увеличение коэффициента инбридинга за одно поколение, Nm – число самцов, Nf – число самок.

За условие порогового значения ΔF Сулеем взято значение ΔF=0,5-0,6. Этот порог выведен из селекционной практики животноводства с учетом того, что плодовитость в малых популяциях начинает падать, когда коэффициент инбридинга достигает 0,5-0,6 [12]. Придав ΔF значение 0,5-0,6 в формуле

$$\Delta f = 1 - \left(1 - \frac{1}{2} N_e\right)^t; \quad (4)$$

можно получить формулу (1). Расчет коэффициентов инбридинга проводился с помощью F-статистик Райта [4].

Результаты и обсуждение. Данные прогноза длительности существования московских популяций бурых лягушек также показывают, что количество поколений до подхода к порогу вымирания мало, что отображает табл. 1.

Таблица 1. Прогноз длительности существования популяций модельных видов на ООПТ г. Москвы (по данным эффективной численности 2002-2003 гг.)

Вид	Кол-во популяций (%)	Эффективная численность (Ne)	Число поколений (t)
Bradybaena fruticum	25	3,5 - 5	5-7
	8	6 - 10	9-15
	42	21 - 24	32-37
	25	26 - 66	40-100
Rana arvalis	67	2 - 3	3-4
	33	8 - 11	12-17
Rana temporaria	25	3,5 - 4	5 - 6
	8	7 - 11	11-17
	17	16 - 18	24 - 27
	50	25 - 28	38-42

Примечание: длительность существования популяций в поколениях вычислялась по формуле $t = 1,5 \cdot N_e$, где Ne – эффективная численность популяций вычислялась по формуле 2. Поколение (возраст половозрелости) составляет 5 лет для всех модельных видов

Прогноз скорости исчезновения московских популяций кустарниковой улитки (табл. 1):

в ближайшие 25-30 лет может исчезнуть 25% городских популяций;

за 100-200 лет может исчезнуть 75% популяций;

только 25% популяций имеют шанс на длительное существование (около 500 лет).

Прогноз скорости исчезновения московских популяций бурых лягушек (табл. 1): для *R. arvalis*: в ближайшие 15-20 лет может исчезнуть 67% популяций; за 60-80 лет может исчезнуть 100% изолятов, т.е. в парках Москвы исчезнет вид в целом; **для *R. temporaria*:** 50% популяций может исчезнуть в ближайшие 100 лет, из них половина – за 25 лет.

Таблица 2. Прогноз скорости исчезновения популяций животных на ООПТ г. Москвы (по сумме 3 исследованных модельных видов, по данным 2002-2003 гг.)

Временной интервал в годах (Т)	Процент исчезающих популяций
25	28
100	56
160-200	84
250-500	100

Примечание: временной интервал в годах вычислялся по формуле $T = kt$, где k – возраст половозрелости для вида, для улиток и лягушек он составляет 5 лет. Расчет проводился по данным эффективной численности 25 московских популяций животных (13 улиток, 12 лягушек; 6 из которых исключены из генетического анализа из-за малой численности)

Результаты проведенных исследований показывают, что большинство существующих московских природных особо охраняемых экосистем слишком малы и не способны обеспечить сохранение мелких изолированных популяций исчезающих видов животных (по чисто генетическим и эволюционным причинам). Полученные результаты представляют интерес для переоценки современной традиционной (территориальной) стратегии охраны животных, обитающих в условиях урбанизированных ландшафтов [13, 14]. Обобщение результатов количественной оценки, прогноза и изучения механизмов деградации генофонда городских популяций (на примере модельных видов животных, обитающих на ООПТ г. Москвы) позволило иначе оценить современную экологическую концепцию сохранения биоразнообразия. На этой основе разработана оригинальная эколого-генетическая концепция и стратегия охраны животных антропогенных экосистем, включающая не только пассивную территориальную охрану, но и активное восстановление генофонда популяций деградирующего биоразнообразия [11].

Главная идея эколого-генетической концепции охраны животных антропогенных экосистем [8] состоит в признании необходимости и возможности восстановления,

сохранения и устойчивого использования природных популяций диких животных, обитающих в городских ООПТ, используемых в целях рекреации. Эта идея соответствует генеральной линии современной стратегии охраны биоты, сформулированной в конвенции «О биологическом разнообразии»: сохранении в процессе устойчивого использования (1995) [15]. Стратегия охраны животных антропогенных экосистем Земли [8, 11] должна быть нацелена на переход от исключительно территориальной пассивной охраны и невмешательства к активному восстановлению и устойчивому сохранению генофонда популяций. Безусловно, территориальная охрана необходима, но она не может быть единственной и достаточной мерой в условиях интенсивного использования городских территорий в целях рекреации. Основой для обоснования современной стратегии охраны биоразнообразия (в т.ч. животных) являются фундаментальные принципы охраны природы с учетом как экосистемного, так и популяционно-генетического уровня охраны [9, 16] с нашими модификациями, учитывающими специфику генофонда антропогенных экосистем [11, 17]. В отличие от традиционного территориального подхода, главным условием соблюдения эколого-генетических принципов охраны животных антропогенных экосистем [17] является не просто сохранение существующей численности популяций, а сохранение или восстановление определенной минимальной численности популяций, или – систематическое поддержание генетического разнообразия в мелких изолятах. Результаты проведенного эколого-генетического мониторинга позволили определить минимальный предел численности, при котором не происходит утери генетического разнообразия популяций. Для кустарниковой улитки он составляет не менее 1000 особей.

Главный принцип поддержания устойчивости популяций (неэксплуатируемых) видов – это принцип необходимости поддержания минимального разнообразия всех структурных элементов, на всех уровнях организации экосистем. **На генетическом уровне** это означает, что должно сохраняться, как правило, около 90% генетической изменчивости от её потенциально возможной (природной) величины, характерной для крупных природных популяций данной природной зоны. **На популяционном уровне** это означает, что численность не может быть ниже определенной для каждого вида минимальной численности.

Исходя из вышеизложенного очевидно, что **стратегия охраны животных на ООПТ** урбанизированных ландшафтов должна быть нацелена как на сохранение и восстановление генетического разнообразия, так и на сохранение численности популяций, поскольку скорость эрозии генофонда зависит от численности популяций. Устойчивое сохранение малочисленных популяций животных возможно за счет контролируемой организации искусственных генетических потоков из природы или из зоокультуры.

На основе эколого-генетического подхода обосновано новое научное направление – геноурбанонология (синтез генетики и экологии) [18, 8]. Цель геноурбанонологии состоит в познании генетических параметров и закономерностей сохранения устойчивости и восстановления экосистем антропогенных и особенно урбанизированных ландшафтов. Геноурбанонология дает глубокое понимание генетических законов устойчивости экосистем, открывает перспективу для сохранения видов животных в антропогенных и особенно – урбанизированных ландшафтах.

С позиций нового научного направления – геноурбанонологии, стратегической задачей научной организации городских ООПТ является сохранение генетических параметров экосистем, что означает восстановление качества генофонда популяций, одновременно с сохранением и восстановлением минимальной численности. Охранять и восстанавливать необходимо не только исчезающие, но и ключевые виды, что будет способствовать поддержанию гомеостаза экосистем в целом. Это возможно при создании специальных программ эколого-генетического мониторинга за состоянием биоразнообразия в городе. В г. Москве одним из практических решений проблемы восстановления биоразнообразия явились мероприятия по оздоровлению (обогащению) генетического разнообразия популяций исчезающих видов животных, обитающих на ООПТ (с 2004 г.). Результаты эксперимента по обогащению генофонда 4 популяций кустарниковой улитки подтвердили эффективность использования генетических технологий в целях сохранения и длительного устойчивого использования популяций животных урбанизированных ландшафтов [11, 17].

Выводы: предлагаемый эколого-генетический подход позволяет эффективно и экономически выгодно планировать мероприятия по сохранению генетического разнообразия популяций исчезающих видов животных и поддержанию устойчивости деградирующих

экосистем в целом. Необходимо отметить, что разработанный эколого-генетический подход (методология, концепция, стратегия, технологии) и полученные результаты указывают на необходимость его использования в службе охраны животных в качестве приоритетного (наряду с традиционным экосистемным) для различных территорий, измененных и подверженных воздействию человека, включая водные экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Красная книга* города Москвы. – М.: АБФ, 2001. – 610 с.
2. *Реймерс, Н.Ф.* Особо охраняемые природные территории / *Н.Ф. Реймерс, Ф.Р. Штильмарк.* – М.: Мысль, 1978. – 296 с.
3. *Пузаченко, Ю.Г.* Заповедники России – гарант сохранения самовосстановительного потенциала страны. Концептуальные положения // *НМЗ Заповедное дело.* – 1996. – Вып. 1. – С. 90-94.
4. *Дежкин, В.В.* Территориальная охрана природы в мире и в России // *Россия в окружающем мире (аналитический ежегодник)* – М.: Модус-К-Этерна, 2006. – С. 59-81.
5. *Wright, S.* Coefficient of inbreeding and relationship // *Amer. Natur.* – 1922. – V. 56. – P. 330-338.
6. *Дубинин, Н.П.* Генетико-автоматические процессы и их влияние на механизмы эволюции // *Журн. эксперим. биологии.* – 1931. – Т. 7, № 5/7. – С. 463-478.
7. *Макеева, В.М.* Оценка состояния генофонда природных популяций беспозвоночных животных в условиях фрагментированного ландшафта Москвы и Подмосковья (на примере кустарниковой улитки, *Bradybaena fruticum* (Mull.)) / *В.М. Макеева, М.М. Белоконов, О.П. Малюченко* // *Генетика.* – 2005. - № 11. – С. 1495-1510.
8. *Макеева, В.М.* Оценка состояние генофонда природных популяций позвоночных животных в условиях фрагментированного ландшафта Москвы и Подмосковья (на примере бурых лягушек) / *В.М. Макеева, М.М. Белоконов, О.П. Малюченко, О.А. Леонтьева* // *Генетика.* – 2006. – Т. 42, №4. – С. 1-15.
9. *Алтухов, Ю.П.* Генетические процессы в популяциях: Учебное пособие 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 431 с.
10. *Макеева, В.М.* Судьба диких животных в городе: теория неизбежности их вымирания // *Материалы Второй научно-практической конференции «Животные в городе» 15-17 апреля 2002 г.* – М.: ИПЭЭ РАН им. А.Н. Северцова, 2003а. – С. 7-9.
11. *Макеева, В.М.* Эколого-генетические основы охраны животных антропогенных экосистем (на примере Москвы и Подмосковья): автореферат дисс... докт. биол. наук. – М., 2008. – 47 с.

12. Сулей, М.Э. Пороги для выживания: поддержание приспособленности и эволюционного потенциала // Биология охраны природы. – М.: Мир, 1983. – С. 177-197.
13. Makeeva, V.M. Современные подходы к сохранению животных урбанизированных ландшафтов / В.М. Makeeva, М.И. Непоклонова, А.В. Смуров // Межведомственный юбилейный сборник научных трудов конференции, посвященной 90-летию со дня основания МГАВ-МиБ им К.И. Скрябина. – М., 2009. – Ч.4. – С. 297-309.
14. Makeeva, V.M. Эколого-генетические методы сохранения разнообразия и численности животных антропогенных экосистем (на примере модельных видов животных в Москве и Подмосковье) / В.М. Makeeva, А.В. Смуров, М.М. Белоконь, И.В. Нанаева // Труды съезда генетиков и селекционеров, посвященного 200-летию со дня рождения Ч. Дарвина и Пятого съезда Вавиловского общества генетиков и селекционеров (Москва, 21-27 июня 2009 г.). – М., 2009. – С. 122.
15. Конвенция о биологическом разнообразии // Текст и приложение: UNEP/CBD/94/1.D. December 1995. – 34 p.
16. Банников, А.Г. Охрана природы / А.Г. Банников, А.К. Рустамов. – М.: Колос, 1977. – 208 с.
17. Makeeva, V.M. Эколого-генетические принципы сохранения разнообразия и численности животных антропогенных экосистем (на примере модельных видов в Москве и Подмосковье) / В.М. Makeeva, А.В. Смуров // Сборник трудов 3-ей Международной научно-практической конференции «Сохранение разнообразия животных и охотничье хозяйство России» (19-20 февраля 2009 г.). – М., 2009. – С. 58-61.
18. Makeeva, V.M. О целесообразности выделения геноурбанографии в качестве самостоятельного научного направления // Сб. трудов VII Международной научной конференции «Новые идеи в науках о Земле». – М.: Изд-во МГРИ, 2005. – Т. 4. – С. 28.

ECOLOGICAL-GENETIC APPROACH TO PROTECTION THE ANIMAL URBANIZED LANDSCAPES (ON THE EXAMPLE OF MODELLING KINDS IN MOSCOW CITY)

© 2010 V.M. Makeeva¹, A.V. Smurov²

¹ Museum of Physical Geography and ² Ecocenter of Moscow State University named after M.V. Lomonosov

For the first time it is offered and approved in system of city especially protected areas (EPA) ecological-genetic approach to animal protection of the urbanized landscapes (methodology, concept, strategy, technologies). On the basis of data about effective numerosity of the researched populations the forecast of extinction speed of Moscow modelling kinds populations of animals (one kind of ground molluscs and 2 kinds of brown frogs) is calculated. More than 56% of populations can disappear in nearest 100 years, from them about 28% - for 25 years with standard approach to animal protection (territorial protection). Offered ecological-genetic concept and strategy of animal protection include, also with territorial protection, active restoration of gene pool of populations. Ecological-genetic principles and methods of preservation the variety and numerosity of animals anthropogenic ecosystems which efficiency is confirmed experimentally .

Key words: population, gene pool, animal protection, urbanized landscape, ecological-genetic approach, forecast, strategy of protection