УДК 598.2 /.9: 504.74.54

Б.Д. Куранов, С.В. Савельев, В.И. Гулимова

РЕПРОДУКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЭМБРИОНАЛЬНЫЕ НАРУШЕНИЯ У МУХОЛОВКИ-ПЕСТРУШКИ (*FICEDULA HYPOLEUCA*) В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ

Изучено влияние выбросов Сибирского химического комбината (Томская область) на размножение и эмбриональное развитие мухоловки-пеструшки.

Оптимальный выбор уровня организации биосистем для индикации техногенного воздействия является важным методическим условием при проведении соответствующих исследований. При сохранении прежнего видового разнообразия и популяционной структуры могут наблюдаться нарушения на организменном уровне. В полной мере это относится к последствиям радиационного и химического загрязнения окружающей среды.

У птиц во время эмбрионального развития перенос нехарактерных элементов к зародышу не происходит, как у млекопитающих. Развитие эмбрионов птиц в автономной среде яйца позволяет намного точнее определить роль радиационного загрязнения окружающей среды по сравнению с амфибиями и млекопитающими.

Мухоловка-пеструшка питается и выкармливает птенцов исключительно беспозвоночными, собирая их чаще в подкронно-подлесочном ярусе растительности. Данная особенность экологии вида позволяет рассматривать мухоловку-пеструшку в качестве индикатора техногенного загрязнения указанного биогоризонта.

Материал и методики

Исследования проведены в 1994–2006 гг. в санитарно-защитной зоне Сибирского химического комбината (СЗЗ СХК). Контрольный участок находился в 23–25 км от комбината в направлении, противоположном господствующим ветрам. Исследования здесь проводили в 1986–1991 гг. Для привлечения мухоловки-пеструшки развешали 215 гнездовий с диаметром летка 30 мм и площадью дна 100 см^2.

Оба участка находятся на правобережье р. Томи. В районе наблюдений доминируют вторичные осиново-березовые леса с участием хвойных пород.

Основной задачей СХК, работающего более 50 лет, является наработка оружейного плутония. В его выбросах имеются различные радионуклиды, редкие и редкоземельные элементы, соединения фтора, оксиды азота и другие химические агенты. Удельная активность Cs^{137} в почве на опытной площадке составила 180,2 (133,1–249,0), в контроле – 17,6 Бк/кг. Соответственно средний показатель площадной активности радиоцезия составил 0,63 и 0,06 Ки/км^2.

На модельных площадках ежегодно проводили абсолютный учет гнезд, прослеживали их судьбу, фиксировали величину кладки, успешность инкубации и выкармливания. Жилым считали гнездо, в котором было отложено хотя бы одно яйцо. Объем яиц вычисляли по формуле: $V= 0,51 \cdot LB^2$, где L – длина (мм); B – максимальный диаметр (мм) [1]. Всего обследовано 1277 гнезд мухоловки-пеструшки, из них – 1008 в опыте, промерено 1511 яиц. Рассчитаны следующие показатели: успешность насиживания (число вылупившихся птенцов / число отложенных яиц, %); успешность выкармливания (число вылетевших / число вылупившихся птенцов, %); успешность размножения (число вылетевших птенцов / число отложенных яиц, %); птенцов на попытку размножения (число вылетевших птенцов / число самок, приступивших к откладке яиц); птенцов на успешную попытку размножения (число вылетевших птенцов / число самок со слетками). Эмбриональную смертность (суммарное число неоплодотворенных яиц и яиц с погибшими эмбрионами) определяли по кладкам с известным результатом вылупления, гибель части выводка – от числа вылупившихся птенцов выводков любой дальнейшей судьбы.

Для эмбрионального анализа отобрано 233 зародыша. Для всех стадий использованы методы макроскопического и гистологического исследования. Дифференциальное окрашивание тканей применялось в основном для изучения эмбрионов на ранних стадиях развития, выборочно – для эмбрионов на более поздних стадиях и при обнаружении отклонений от нормального развития. При анализе ранних этапов развития использовали 46 основных критериев структурной организации эмбриона. После 35-й стадии эмбрионов обследовали по 113 параметрам.

Для определения радионуклидов, тяжелых металлов и редкоземельных элементов в тканях эмбрионов использовали рентгеновский микроспектрометрический анализ.

Анализ репродуктивных показателей

Плотность гнездования. Средний показатель занятости синичников мухоловкой-пеструшкой имеет близкие значения в СЗЗ СХК (94,6%) и контроле (93,0%). Гнездовая плотность с учетом линейного типа развески синичников составила 10,5 гн. / 10 га в опыте и 10,3 гн. / 10 га в контроле. Таким образом, при существующем уровне загрязнения опытного участка мухоловка-пеструшка не избегает его в период размножения, а показатель гнездовой плотности здесь не уступает контрольному значению.

Значения и достоверность различий репродуктивных показателей мухоловки-пеструшки в участках сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Репродуктивные показатели мухоловки-пеструшки

Показатель	Санитарно-защитная зона СХК	Контроль
Размер кладки	6,79±0,03	6,92±0,06
Объем яиц, мм^3	1669±7	1657±5
Доля успешных гнезд, %	82,2±1,3*	67,7±2,9
Эмбриональная смертность, %	6,6±0,3*	4,6±0,5
Успешность насиживания, %	86,1±0,4*	82,3±0,9
Гибель части выводка, %	4,7±0,3	4,6±0,6
Успешность выкармливания, %	87,8±0,5*	74,8±1,2
Успешность размножения, %	75,6±0,6*	61,6±1,2
Успешность размножения в уцелевших гнездах, %	89,6±0,4	88,3±0,9
Птенцов на успешную попытку размножения	6,02±0,05	5,96±0,12
Птенцов на попытку размножения	4,95±0,09*	3,96±0,20

Примечание. * – достоверные отличия от контрольного показателя ($p < 0,05$).

Величина кладки и оологические показатели. Средний размер кладки, а также объем яиц мухоловки-пеструшки в СЗЗ СХК и контроле достоверно не отличаются. Величина полной кладки у вида варьирует в опыте в пределах 4–10, в контроле – 4–9 яиц. Во всех зонах модальной является кладка из 7 яиц, и ее доли в участках сравнения почти полностью совпадают.

Успешность размножения. *Доля успешных гнезд* у мухоловки-пеструшки в СЗЗ СХК достоверно больше, чем в контроле. В опыте потери гнезд от хищников в 2,6 раза меньше по сравнению с контрольной популяцией. Доля брошенных гнезд у обследованных группировок вида имеет близкие значения. Полная эмбриональная смертность (7 случаев) отмечена только в опытном участке.

Общая успешность размножения в СЗЗ СХК достоверно больше по сравнению с контрольной популяцией, что связано с более значительными потерями в контроле на стадии продуцирования и насиживания кладок, а также в период выкармливания птенцов. Снижение успешности размножения мухоловки-пеструшки в условиях радиационного загрязнения среды отмечено в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС [2] и на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа [3]. Загрязнение ландшафта тяжелыми металлами приводит к снижению начальной плодовитости, а также успешности инкубации кладок и выкармливания птенцов у данного вида [4].

Успешность насиживания в СЗЗ СХК достоверно выше по сравнению с контролем. Наблюдаемые различия в основном связаны с тем, что у опытной группировки вида заметно меньше потери, связанные с хищничеством. Гибель яиц в связи с бросанием неполных и завершенных кладок в обследованных участках различается незначительно. Эмбриональная смертность достоверно выше у птиц в СЗЗ СХК и в 1,4 раза превышает аналогичный показатель в контрольной популяции. Важно отметить, что ведущим фактором отхода яиц в контроле является хищничество, тогда как в опыте эмбриональная смертность превалирует над другими причинами гибели яиц.

Успешность выкармливания в СЗЗ СХК достоверно больше по сравнению с контролем. Это связано с тем, что потери птенцов из-за хищничества и гибель целых выводков, не связанная с хищничеством, в опыте значительно меньше, чем в контрольном участке. Частичная птенцовая смертность в участках сравнения находится в одинаковых пропорциях.

Успешность размножения в *уцелевших гнездах* в СЗЗ СХК и контроле достоверно не отличается. Данное обстоятельство указывает на то, что в обеих зонах ведущую роль в снижении репродуктивного успеха играют факторы, приводящие к полной гибели кладок и выводков.

Количество птенцов на попытку размножения в СЗЗ СХК достоверно больше, чем в контрольной популяции. Различия по данному показателю в основном объясняются меньшей гибелью кладок и птенцов в опытном участке в связи с хищничеством и бросанием выводков. Число птенцов на успешную попытку размножения в участках сравнения значимо не отличается.

На основании проведенных исследований можно выделить наиболее информативные показатели, касающиеся оценки успешности размножения мухоловки-пеструшки в условиях техногенного загрязнения среды. В первую очередь к ним относится эмбриональная и частичная птенцовая смертность. Два других показателя – успешность размножения в уцелевших гнездах и количество птенцов на успешную попытку менее точны, так как не учитывают кладки с полной эмбриональной гибелью и выводки, в которых наблюдалась частичная птенцовая смертность, но погибшие позже по разным причинам. Тем не менее они заслуживают внимания как способ интегральной оценки эмбриональной и частичной птенцовой смертности. К малоинформативным показателям следует отнести долю успешных гнезд, общую успешность размножения и количество птенцов на попытку размножения, так как на их значение существенное влияние оказывают естественные причины гибели кладок и выводков.

Анализ успешности воспроизводства мухоловки-пеструшки в зоне влияния выбросов СХК показал, что техногенное воздействие проявляется в основном на эмбриональной стадии. По-видимому, радиационное загрязнение среды в первую очередь сказывается на эмбриогенезе как наиболее чувствительной стадии индивидуального развития. На высокий уровень эмбриональной смертности у озерной чайки (*Larus ridibundus*) и речной крачки (*Sterna hirundo*) вблизи зоны отчуждения ЧАЭС указывает А.Ю. Микитюк [5]. В то же время, как показали исследования птенцов полевого воробья (*Passer montanus*), общее содержание в их теле Sr^{90} от 0,01 мкКи после вылупления до 0,17 мкКи перед вылетом из гнезда не вызывало заметных изменений в их развитии [6]. По нашим данным, уровень накопления тяжелых металлов в перьях птенцов мухоловки-пеструшки перед вылетом относительно невысок и мало отличается от фоновых значений, установленных для Среднего Урала и Финляндии [7].

Анализ эмбриональных патологий

Патологичные эмбрионы обнаружены в 29% кладок мухоловки-пеструшки на опытной территории и в 6% кладок в контроле. Доля зародышей с различными отклонениями от нормального развития в СЗЗ СХК в 3,5 раза больше, чем в контроле (табл. 2). У опытной популяции выявлен более широкий спектр отклонений в развитии – девять типов патологий против трех в контроле. Только в СЗЗ СХК обнаружены такие аномалии развития, как гипертрофия, кистозное расщепление позвоночника и эктопия, а также другие патологии, к которым относятся порэнцефалия, липофусциноз и пузыревидное расслоение оболочки амниона. Сходные тенденции относительно встречаемости аномалий развития и анемий в зоне влияния СХК обнаружены также у мелких млекопитающих и амфибий [8].

Важно отметить, что патологичные зародыши в СЗЗ СХК распределены по кладкам не равномерно, а имеют тенденцию к концентрации в сравнительно небольшом количестве гнезд. Так, у всех семи эмбрионов, принадлежащих одной из кладок на опытной территории, обнаружены серьезные нарушения, заключающиеся в полном нарушении морфогенеза переднего мозга с выраженной гипертрофией нейроэпителия и стенок полушарий. Кожный эпидермис характеризовался атипичной дифференцировкой (клетки с мутным набуханием и разрушенными ядрами). В данной группе зародышей также обнаружены кистозное расщепление позвоночника, эктопия глаза и хрусталика. Во всех отделах головного и спинного мозга отмечены очаги порэнцефалии. По всей вероятности, все эти эмбрионы или большая их часть погибли бы еще на стадии инкубации. В то же время в нескольких соседних гнездах мухоловки-пеструшки не зафиксировано ни одного эмбриона с отклонениями от нормального развития.

Таблица 2

Встречаемость разных патологий у эмбрионов мухоловки-пеструшки

Типы патологий	Санитарно-защитная зона СХК (n =120)		Контроль (n =113)	
	абс.	%	абс.	%
Агенезия	2	1,7	1	0,9
Гипертрофия	1	0,8	–	–
Кистозное расщепление позвоночника	1	0,8	–	–
Эктопия	1	0,8	–	–
Порэнцефалия	7	5,8	–	–
Липофусциноз	2	1,7	–	–
Геморрагия	13	10,8	7	6,2
Анемия	7	5,8	4	3,5
Нарушение амниона	1	0,8	–	–
Всего эмбрионов с патологиями…	**26**	**21,7±3,8**	**7**	**6,2±2,3**

Особого внимания заслуживает липофусциноз у зародышей на опытной территории. Скопления гранул липофусцина находились в печени, их отличали многочисленность и большие размеры. Наибольшая плотность липофусциновых гранул наблюдалась вблизи сосудов, однако в целом они распределялись в ткани печени практически равномерно.

При исследовании амниотической оболочки методом интерференционной микроскопии у одного эмбриона в СЗЗ СХК выявлены пузыревидные расслоения.

Общим для контрольной и опытной популяций является наличие двух пиков встречаемости патологий, к которым относятся анемия и патологии кровеносной системы. Однако в опыте, кроме указанных нарушений, высока частота порэнцефалии. Доля анемичных зародышей и эмбрионов с аномалиями кровеносной системы в опытной популяции в 1,7 раза больше по сравнению с контролем, а порэнцефалия в контроле не зафиксирована. Следует отметить, что среди нарушений кровеносной системы в контроле у зародышей чаще встречаются гематомы, тогда как в опыте, кроме гематом, велика доля патехиальных скоплений клеток крови, субдуральных и внутримозговых кровоизлияний. К числу редких нарушений можно отнести патологию сосудистого сплетения, обнаруженную только в опытной популяции.

В СЗЗ СХК у эмбрионов мухоловки-пеструшки наиболее пораженными являются ЦНС и органы чувств, сердечно-сосудистая система и система крови, тогда как в контроле – только две последние системы (табл. 3). Кроме того, в опыте обнаружены патологии в органах пищеварения и амнионе, что не наблюдалось в контрольной популяции. Таким образом, опытная популяция мухоловки-пеструшки отличается от контрольной повышением частоты патологичных эмбрионов. Здесь также расширен спектр патологий и систем органов, подверженных различным нарушениям. Примечательным является наличие у зародышей в опыте различных аномалий развития. Другим характерным признаком опытной популяции является наличие эмбриональных патологий центральной нервной системы и органов чувств, которые полностью отсутствуют в контроле. Данные обстоятельства указывают на то, что окружающая среда на опытной территории обладает эмбриотоксическими свойствами, отрицательно влияющими на развитие зародышей изученного вида.

Среднее значение гамма-фона с поверхности гнезд мухоловки-пеструшки в опыте составило 16,5 мкВ/ч, в контроле – 11,1 мкВ/ч. Маловероятно, что наблюдаемые различия в экспозиционных дозах могли служить причиной резкого увеличения частоты патологий у эмбрионов в СЗЗ СХК.

Для оценки возможного влияния реутилизированных тератогенных веществ, попавших в организм зародыша от матери, проведено исследование тканей эмбрионов.

Таблица 3

Встречаемость патологий у эмбрионов мухоловки-пеструшки в разных системах органов

Система органов	Санитарно-защитная зона СХК (n =120)		Контроль (n =113)	
	абс.	%	абс.	%
ЦНС и органы чувств	7	5,8	–	–
Сердечно-сосудистая	13	10,8	7	6,2
Органы пищеварения	2	1,7	–	–
Кожа и ее производные	1	0,8	1	–
Система крови	7	5,8	4	4,4
Амнион	1	0,8	–	–

Методом рентгеновского микроспетрометрического анализа в тканях эмбрионов в СЗЗ СХК выявлены протоактиний и скандий в следовых количествах. В контроле у патологичных эмбрионов обнаружен лантан. Указанные элементы в обнаруженных количествах не могли оказать заметного воздействия на эмбриональное развитие. Возможным путем получения дозовой нагрузки является облучение эмбрионов радионуклидами из белка и желтка яиц, что требует проведения дополнительных исследований.

Заключение

На основе проведенных исследований установлено, что мухоловка-пеструшка в техногенном ландшафте испытывает как отрицательное, так и положительное воздействие. К отрицательному влиянию относится увеличение эмбриональной смертности, доли патологичных зародышей и расширение спектра эмбриональных патологий. К положительному – повышение успешности размножения и количества птенцов на попытку гнездования. Значения таких показателей, как плотность гнездования и объем яиц, в опытном и контрольном участках достоверно не отличаются.

Повышение репродуктивного успеха мухоловки-пеструшки в техногенном ландшафте объясняется исключительно ослаблением хищничества. Однако причины этого явления требуют специального изучения, так как нельзя исключать, что численность хищников, а в районе исследования основным разорителем гнезд мухоловки-пеструшки является бурундук, в СЗЗ СХК снижена из-за отрицательного влияния на популяцию вида выбросов предприятий ядерно-топливного цикла.

Сходства обследованных популяций вида по гнездовой плотности свидетельствуют о благоприятной для вида структуре лесных фитоценозов: состав и возраст древесных пород, наличие подлеска, плотность древостоя. Отсутствие различий между опытной и контрольной популяциями по таким показателям, как частичная птенцовая смертность и количество птенцов на успешную попытку размножения, говорит о том, что молодые в период выкармливания не испытывают серьезного токсического воздействия загрязняющих агентов.

Увеличение эмбриональной смертности, доли патологичных зародышей и расширение спектра патологий в СЗЗ СХК указывают на то, что окружающая среда на опытной территории обладает эмбриотоксическими свойствами, а отрицательное влияние техногенных факторов на успешность размножения изученного вида прослеживается в основном на эмбриональной стадии онтогенеза. Исследования развития мухоловки-пеструшки показывают, что правомерен вывод о патогенном превалировании радиационного загрязнения над токсическим действием радиоизотопов в эмбриональном развитии изученного вида. Данное положение согласуется с фактом повышения нуклеотидной изменчивости митохондриальной ДНК у опытной группировки мухоловки-пеструшки по сравнению с европейской и уральской популяциями вида [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hoyt D.F.* Practical methods of estimating volume and fresh weight of bird eggs // Auk. 1979. Vol. 96. P. 73–77.
2. *Габер Н.А.* Изменение численности и особенности размножения воробьиных птиц в 30-км зоне Чернобыльской АЭС в 1989–1982 гг. // Радиобиол. съезд. Пущино, 1993. Ч. 1. С. 197.
3. *Лебедева Н.В.* Популяции большой синицы и мухоловки-пеструшки на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Докл. Академии наук. 1994. Т. 335, № 4. С. 535–537.
4. *Безель В.С., Бельский Е.А.* Репродуктивные показатели птиц-дуплогнездников в условиях техногенного загрязнения среды обитания // Докл. Академии наук. 1994. Т. 338, № 4. С. 555–557.
5. *Микитюк А.Ю.* Успех воспроизводства популяций птиц водно-болотных систем радиохимически загрязненных ландшафтов // Радиобиологический съезд. Пущино, 1993. Ч. 2. С. 686–687.
6. *Ильенко А.И.* Концентрирование животными радиоизотопов и их влияние на популяцию. М.: Наука, 1974. 168 с.
7. *Eeva T., Belskii E., Kuranov B.* Environmental pollution affects genetic diversity in wild bird populations // Mutation Research. 2006. Vol. 608. P. 8–15.
8. *Савельев С.В., Москвитина Н.С., Куранов Б.Д., Куранова В.Н.* Нарушение эмбриогенеза в природных популяциях позвоночных как индикатор состояния среды обитания человека // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. Томск, 1996. С. 388–391.

Статья поступила в редакцию журнала 4 сентября 2006 г., принята к печати 5 декабря 2006 г.