

УДК 574:539.16.047:599.323.4: 577.346.017.4  
© 2013

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА МЕЛКИХ  
МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО  
РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА: НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ**

*Григоркина Е.Б., Оленев Г.В., Верхотурцев М.С.*

*Россия, г. Екатеринбург, Институт экологии растений и животных УрО РАН  
Тарасов О.В.*

*Россия, г. Озерск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Приведены результаты многолетнего мониторинга видового разнообразия и численности мелких грызунов в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа) (участок Бердениш) и на сопредельной территории. На основе функционально-онтогенетического подхода (два альтернативных типа онтогенеза грызунов) проанализирована популяционная структура малой лесной мыши. Показана высокая гетерогенность группировки зимовавших – основа трансгенерационной передачи радиоиндуцированных генетических и эпигенетических эффектов у мелких млекопитающих. Уровень и характер мутационных эффектов у лесных и полевых мышей из зоны ВУРСа свидетельствует об интенсивном мутационном процессе, показана значимая положительная корреляция частоты клеток с хромосомными aberrациями с удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани мышей. Методом группового мечения мелких млекопитающих тетрациклином в зоне ВУРСа получены данные об отсутствии изоляции населения грызунов подвижных видов (мышей и полевок) в зоне локального радиоактивного загрязнения, которое, как и на любых иных территориях, представлено резидентами, иммигрантами и эмигрантами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ВУРС, ГРЫЗУНЫ, МИГРАЦИИ, КОНФИГУРАЦИЯ ЗОНЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, СООТНОШЕНИЕ ВИДОВ, ЧИСЛЕННОСТЬ, ВОЗРАСТНАЯ СТРУКТУРА, ХРОМОСОМНЫЕ АБЕРРАЦИИ

Испытания ядерного оружия, крупные радиационные катастрофы на ядерных объектах, интенсивное развитие мировой ядерной промышленности привели к радиоактивному загрязнению биосферы Земли, накоплению техногенных радионуклидов в живых организмах и воздействию ионизирующих излучений на биоту и человека. Изучение аккумуляции радионуклидов в живых системах и исследование отдаленных последствий действия хронического облучения на природные сообщества с целью возможной оценки риска техногенного воздействия на биоту остаются актуальными задачами современной радиоэкологии [1]. Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРСа) (Челябинская обл), который сформировался в 1957 г. в результате аварии на ПО

“Маяк”, является уникальной природной лабораторией для изучения биологических ответов низкоинтенсивного ионизирующего излучения у мелких млекопитающих на разных уровнях организации населения, вызванных накоплением техногенных радионуклидов.

Мелкие млекопитающие являются, пожалуй, наиболее удобным объектом среди теплокровных животных, пригодным для проведения подобных исследований. Подробная изученность мелких грызунов и их лабораторных аналогов, многочисленность объектов в природе дает возможность для корректной обработки данных. Способность к значительным перемещениям, представленность в большинстве биотопов ВУРСа, гомойотермность, возможность изучения эффектов в чреде быстро сменяемых

поколений, сложная, но поддающаяся изучению возрастная структура и т.д. позволяют использовать мышевидных грызунов в качестве объектов мониторинга. Наконец, особенно важной является возможность дальнейшей экстраполяции результатов на других млекопитающих и человека.

Территория ВУРСа отличается большой протяженностью (около сотни километров) при узком поперечном сечении (несколько сот метров с интенсивным загрязнением), что позволяет считать ее совершенно уникальным техногенным образованием как в масштабах страны, так и в мире.

В зоне влияния ВУРСа проводились масштабные радиоэкологические исследования, результаты которых описаны в ряде монографий [2–4] и многочисленных публикациях. В настоящее время территория заповедника загрязнена преимущественно (95,7 %)  $^{90}\text{Sr}$  аварийных выпадений [5]. Интегральные запасы  $^{90}\text{Sr}$  в его почвенном покрове составляют  $571,2 \cdot 10^{12}$  Бк, а  $^{137}\text{Cs}$  –  $66,1 \cdot 10^{12}$  Бк [6]. Такие количества долгоживущих радионуклидов превращают заповедник в источник вторичного радионуклидного загрязнения сопредельных территорий. Стронций-90 представляет долговременную опасность, поскольку имеет длительный (около 30 лет) период полураспада, депонируется в костной ткани позвоночных животных и является источником внутреннего облучения организма. Результаты радиоэкологических исследований, выполненных на млекопитающих, имевших контакт с радионуклидами Восточно-Уральского радиационного заповедника, свидетельствуют о высоких (на два-три порядка величин выше, чем  $^{137}\text{Cs}$ ) значениях удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в скелете [7]. Идентификация бета-излучателей проб тканей животных с территории ВУРСа методами радиохимического анализа однозначно показала, что удельная  $\beta$ -активность скелета животных на 90–95 % обусловлена  $^{90}\text{Sr}$ – $^{90}\text{Y}$  с незначительной примесью (до 10 %) радионуклидов цепочки  $^{210}\text{Pb}$  [8].

В настоящей работе представлены некоторые авторские материалы, результаты совместных исследований сотрудников Института экологии растений и животных УрО РАН и коллег из ФГУП "ПО «Маяк», выполненные в рамках договоров о научно-техническом сотрудниче-

стве в период 2007–2011 гг. Полученные данные существенно дополняют сведения о многочисленных и неоднозначных биологических эффектах малых доз ионизирующей радиации на мелких млекопитающих, как объектах биомониторинга, в зависимости от накопления в их организме техногенных радионуклидов, а также акцентируют внимание на роли таких важных экологических факторов в диссеминации мутационного груза на сопредельные территории, как конфигурация зоны загрязнения и миграции животных.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Долговременные стационарные исследования** (2002–2011 гг.) проводились регулярно в Восточно-Уральском государственном заповеднике (ВУГЗ, Челябинская обл.) с апреля по октябрь в течение всего репродуктивного периода. Импактный участок (оз. Бердениш) находится на оси следа в 13 км от эпицентра взрыва. Гамма-фон на уровне почвы колеблется от 22 до 76 мкР/ч (в среднем – 50 мкР/ч), уровень  $\beta$ -загрязнения – 90–942 част./мин·см<sup>2</sup> (в среднем – 380 част./мин·см<sup>2</sup>) [9]. Плотность загрязнения почвы  $^{90}\text{Sr}$  в зоне ВУРСа варьирует в пределах 6740–16690 кБк/м<sup>2</sup>, на фоновом участке – 44 кБк/м<sup>2</sup> [6]. Экспериментальная площадка представлена разными типами биотопов: разнотравно-крапивная ассоциация (отмечено 17 видов растений); березняк разнотравно-вейниковый паркового типа (32 вида), березняк разнотравно-злаковый паркового типа (45 видов), разнотравно-злаковый луг, экотонные местообитания [9]. Фоновый участок (пос. Метлино) расположен за пределами ВУГЗа в 10–12 км от импактного участка и в 2 км к северо-востоку от пос. Метлино. Он представлен разнотравно-крапивной ассоциацией и березняком разнотравно-злаковым паркового типа (насчитывает 22 вида растений). Гамма-фон составляет 12 мкР/ч, уровень бета-загрязнения – 12 част./мин·см<sup>2</sup>.

**Мышевидных грызунов отлавливали давилками** конструкции «Геро» на стандартную приманку. Применяли метод ловушко-линий, давилки (по 100 шт. одновременно на обоих участках) расставляли через 5 м друг от друга на трое суток. Учетные площадки закла-

дывали во всех типах биотопов. Относительное обилие грызунов оценивали по результатам первых суток отлова на 100 ловушко-суток (л-с). **Структурно-функциональный состав** [10] проанализирован на примере малой лесной мыши (*Sylvaemus uralensis* Pall.) – фоновом виде грызунов, абсолютном доминанте в районе проведения работ, характеризующемся вагильностью, т.е. высокой миграционной активностью, и высокой экологической пластичностью. Работа выполнена на основе **функционально-онтогенетического подхода** предусматривающего бивариантность онтогенетического развития животных [11–13]. У каждой особи определяли возраст и физиологическое состояние по комплексу признаков с применением экстерьерных и интерьерных показателей. Величину помета характеризовали по числу эмбрионов и плацентарных пятен. Вклад разных возрастных групп в наращивание численности оценивали по числу зафиксированных следов размножения у зимовавших и сеголеток.

В работе использованы совместные материалы по изучению **эколого-генетических показателей**: частоты клеток с хромосомными абберациями, выполненными совместно с к.б.н. Ялковской Л.Э. (ИЭРиЖ УрО РАН) на малой лесной мыши и полевой мыши, доставленными из зоны ВУРСа (оз. Бердениш, оз. Урусуль) и фоновых участков – пос. Метлино (Челябинская обл.) и пос. Уецкое (Свердловская обл.) [14]. Препараты метафазных хромосом приготовлены из костного мозга стандартным методом [15]. Для каждого животного проанализировано по 50 клеток, регистрировали структурные абберации хромосом, анеуплоидные и полиплоидные клетки и пробелы.

**Радиометрические исследования** костного материала животных (бедренные кости) выполнены в ЦЗЛ ПО «Маяк». Пробы для радиометрии приготовлены методом мокрого озоления. Кости высушивали в сушильном шкафу до воздушно-сухого состояния, взвешивали, заливали концентрированной азотной кислотой на 4–5 ч. Полученный раствор перемешивали, нагревали до полного растворения и прозрачности, затем суспензию равномерно распределяли по всей рабочей поверхности мишени, пробу упаривали до полного высыхания и передавали

на измерение. Измерения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  осуществлены  $\beta$ -спектрометрическим методом на приборе БС-1, ошибка измерений для проб составляла не более 8 %. Удельную активность радионуклидов в костной ткани рассчитывали на 1 г воздушно-сухой массы вещества (Бк/г).

**Миграции фоновых видов грызунов в зоне влияния ВУРСа** изучены методом группового мечения мелких млекопитающих тетрациклином [16]. Приманку с тетрациклином раскладывали на землю в однородном биотопе (заросли рудеральной растительности) на расстоянии 3 м друг от друга на площадках размером 30×300 м, расположенных в разные годы или в эпицентре зоны радиоактивного загрязнения или на периферии следа [17]. Грызунов отлавливали давилками конструкции «Геро» в разные сроки после раскладывания приманки в разных локалитетах. Наличие тетрациклиновой метки определяли по желтому свечению в ультрафиолетовом свете в верхних резцах [16].

Анализ данных проведен с помощью компьютерного пакета лицензионных программ «Statistica» для Windows, версия 6.0 и Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Фаунистическое разнообразие*

За 10-летний период мониторинга базовых параметров населения мелких млекопитающих в зоне влияния ВУРСа ситуация была неоднородной. Фаунистические списки наших сборов до 2009 г. включали 10 видов грызунов, большинство из них широко распространены [9]. В прибрежной луговине регистрировались полевки-экономки, пашенные, узкочерепные и водяные полевки, в березовом лесу – красные полевки. Мыши были обычны для лесных биотопов, где достигали высокой численности в экотонных местообитаниях и на участках, представленных разнотравно-крапивной ассоциацией. Малые лесные мыши (*Sylvaemus uralensis* Pall., 1778) устойчиво доминировали на обоих участках, на их долю приходилось от 40 до 60 % всех уловов, поэтому большинство исследований выполнены на грызунах этого вида. Максимальная относительная численность грызунов на пике (в 2009 г.) составляла

59 экз./100 л.с., *S. uralensis* – 43 экз./100 л.с. Второе по численности место занимали полевые мыши (*Apodemus agrarius* Pall., 1771): от 14,3 до 56,7 % на импактном участке и от 6,2 до 60 % в контроле [13]. Остальные виды были немногочисленны и отмечались эпизодически. Согласно данным, опубликованным нами ранее [9, 13] средние индексы видового богатства Маргалефа (DMg) не различались на исследуемых участках, что привело нас к заключению о том, что рецентные уровни радиоактивного загрязнения не привели к снижению видового разнообразия мышевидных грызунов на участке Бердениш. Отметим здесь, что корректность выбора контрольного участка подтверждается, в частности, соотношением представленных видов.

2010 г. был засушливым и жарким. На исследуемых участках произошла трансформация родентоценоза в сторону его упрощения – из мышеобразных регистрировалась только малая лесная мышь (*S. uralensis*), поэтому численность формировалась за счет особей этого вида. При этом среднегодовая относительная численность *S. uralensis* в 2010 г. была высокой (45 экз./100 л.с.) и сопоставимой по величине с таковой в 2009 г. (пик), на фоновом участке она была ниже и составляла 32 экз./100 л.с. Зимой 2010–2011 гг. высота снежного покрова приближалась к 1 м (собственные февральские учеты), температура почвы на глубине 10 см составляла –10 °С, температура воздуха колебалась от –40 до +5 °С.

В 2011 г. проявилась возможность несинхронных изменений видового состава на импактном и фоновом участках (рис. 1).

Общей чертой для обоих участков можно считать возросшую в отловах долю бурозубок: в зоне ВУРСа она составляла 40 %, в контроле – 20 %. На фоновом участке на второе по численности место вышла красная полевка, ее доля в отловах была 45 %. Примечательно, что из зооценозов исчезли полевые мыши (*A. agrarius*), удельный вес которых в отловах предыдущих лет был значителен [9, 13]. Однозначно говорить о конкретных причинах явления затруднительно, однако сама феноменология заслуживает отдельного рассмотрения.

2011 г. в период с мая – июль характеризовался резкими перепадами температуры (мини-

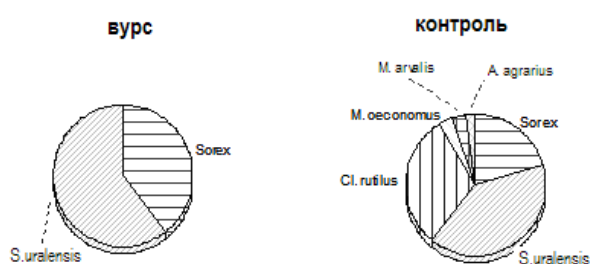


Рис. 1. Феноменология изменения видового состава населения грызунов в зоне ВУРСа и на фоновом участке (2011 г.)

мальные и максимальные значения различались в 12 раз), а главное – большим количеством осадков, что вызвало в условиях высокотравья (средняя высота травостоя достигала 2 м) преобладание процессов разложения фитомассы в нижнем ярусе. Отмечен высокий суточный ход температур, до нулевых отметок. Все это привело к существенному ухудшению качества кормов и местообитаний, что, в первую очередь, повлекло высокую смертность первых когорт сеголеток лесных мышей и даже частичную гибель зимовавших. Поэтому, несмотря на высокую стартовую численность животных весной, среднегодовая относительная численность грызунов на обоих участках была низкой и соответствовала в зоне ВУРСа 12 экз./100 л.с. (за счет *S. uralensis*), в контроле – 19 экз./100 л.с. (11 экз./100 л.с. , для *S. uralensis*, соответственно) (рис. 2).

**Численность** является одной из базовых характеристик популяции. Непрерывный ряд исследований (10 лет) охватил разные периоды динамики численности грызунов, отловы проводили ежемесячно с апреля по октябрь (рис. 2). Амплитуда колебаний численности мышеобразных варьировала в широких пределах, иногда достигая 20-кратных различий.

Численность грызунов, как правило, на импактном участке была выше или сопоставима (в годы депрессии), основной вклад в обилие вносили лесные мыши, которые во все годы мониторинга занимали лидирующее место в отловах. Сезонная динамика структуры и численности грызунов и малой лесной мыши, как вида – доминанта в радиационном био-

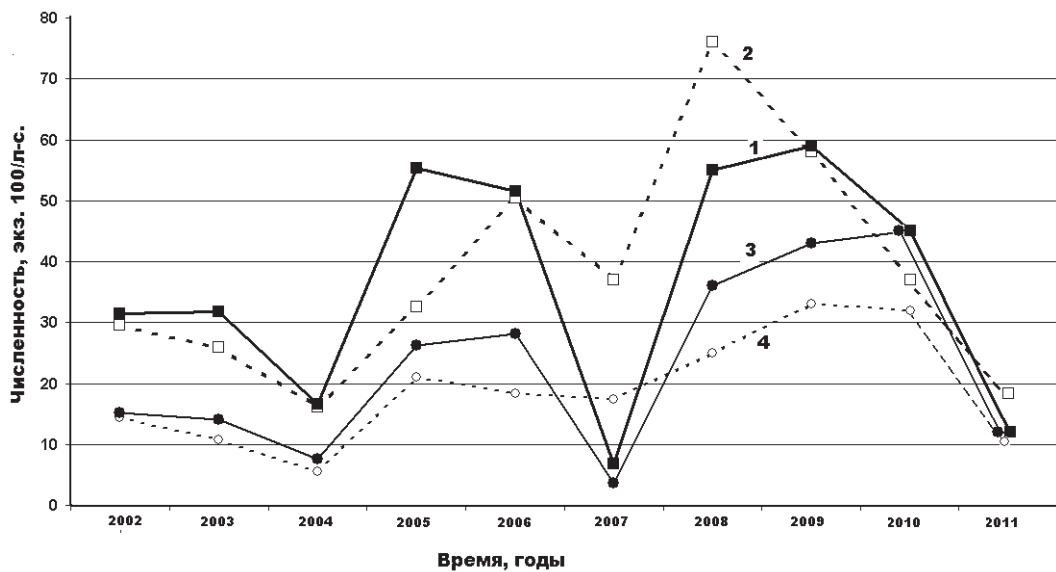


Рис. 2. Динамика относительной численности грызунов на ключевых участках в 2002–2011 гг. (среднегодовые значения): 1, 2 – грызуны в зоне ВУРСа и контроле, соответственно; 3, 4 – малая лесная мышь в зоне ВУРСа и контроле, соответственно

ценозе, заслуживает отдельного рассмотрения и в настоящей работе не приводятся. Отметим только, что сравнительный анализ демографической структуры свидетельствует о важной роли зимовавших в репродукции «вурсовского» населения, их доля в разные годы составляет 60–80 %, в контроле – 40 %, однако доля созревших сеголеток в размножении также существенна [9, 13].

Более высокая, чем на фоновом участке, численность грызунов в зоне ВУРСа обусловлена интенсификацией **процессов репродукции**. Этот феномен был описан ранее [3, 7, 18]. Об интенсификации воспроизводства свидетельствуют увеличение фактической плодовитости, снижение общей эмбриональной смертности и доли самок с эмбриональными потерями у лесных мышей и полевых мышей из зоны ВУРСа, по сравнению с контрольными животными. Следует отметить близкие значения изучаемых показателей у малой лесной мыши, населяющей далеко удаленные друг от друга экологически неравноценные фоновые участки (сопредельная территория за пределами Восточно-Уральского заповедника и эталонный участок в Ильменском

заповеднике) [19]. Результаты наших исследований [18, 20, 21] дают основание заключить, что одним из механизмов поддержания численности мышевидных грызунов в радиоактивно загрязненной среде, является интенсификация процессов воспроизводства, существенная роль в которых принадлежит системе иммунитета. Верификация предложенного нами объяснения проведена в модельном эксперименте на лабораторных мышках линии СВА, у которых были оценены показатели размножения на фоне угнетенного иммунного статуса (многократное введение иммунодепрессанта самкам перед спариванием). Экспериментально установлено увеличение доли репродуктивно активных особей и их фертильности, увеличение общего количества детенышей и выраженная их гипотрофия в раннем онтогенезе, отмечено преобладание самок в опытном потомстве. Кроме того, на фоне иммуносупрессии показано снижение уровня эмбриональных потерь и доли самок с эмбриональной гибелью [18].

В радиозоологической литературе отмечено, что характерной особенностью воздействия излучений в малых дозах на популяции рас-

тений и животных является элиминация различных изменений по мере усложнения уровня биологической организации [22, 23]. Это означает, что сдвиги регистрируются на клеточном уровне, тогда как видимых изменений на уровне популяций и экосистем не выявлено. Однако, мониторинговые исследования в зоне ВУРСа свидетельствуют, что обилие грызунов в зоне загрязнения в целом устойчиво выше, чем на сопредельном участке. Это напрямую связано с более высокими показателями плодовитости, более низкими, чем в контроле, уровнем эмбриональной смертности и долей животных с эмбриональными потерями. Важным результатом является также установленный нами факт неодинакового вклада разных структурно-функциональных групп в динамике «вурсовского» населения грызунов.

**Структурно-функциональный состав популяции *S. uralensis* из зоны ВУРСа [10].** Изучение динамики тонкой возрастной структуры (элемент демографической структуры), т.е. структуры на уровне элементарных внутрипопуляционных единиц (когорты) надорганизменного уровня, позволяет проводить детальный анализ внутрипопуляционных событий у грызунов. Суть функционально-онтогенетического подхода [11, 12], используемого нами для анализа структуры популяции, состоит в том, что при выделении внутрипопуляционных структурных единиц основным критерием является функциональное единство особей в группировках, соответствующих двум типам онтогенеза. За основу принят функциональный статус животных (функциональное состояние, связанное со спецификой роста, развития, репродуктивного состояния), а также синхронность его изменений во времени. Каждую группировку составляют особи, как правило, выходцы из нескольких когорт, связанные функциональным единством в воспроизводстве популяции. Термин когорты широко используется как в отечественной [24], так и в зарубежной [25, 26] литературе. Под когортами у грызунов и других животных, дающих несколько пометов подряд, обычно понимают очередные массовые пометы, считая с начала весеннего размножения. Мы считаем, что когорты вполне обоснованно можно рассматривать в качестве элементарных структурно-возрастных единиц популяции

при анализе тонкой возрастной структуры. Причем выделение когорт значительно упрощается при использовании функционально-онтогенетического подхода и при наличии четко работающего возрастного маркера. Для мышей в качестве краниологического маркера использована степень абразивного износа жевательной поверхности верхних моляров [27].

При анализе выяснилось, что группировка зимовавших мышей чрезвычайно разнородна, благодаря ежегодному присутствию в ней представителей всех поколений предыдущего года рождения, несмотря на то, что доли этих животных в разные годы меняются (рис. 3) [10]. В ней всегда имеются особи из первых когорт прошлого года (первое поколение – дети зимовавших), доля которых варьирует от 10 до 30 % в обычные годы и доходит до 100 % в экстремальных условиях [11, 12]. Основную часть группировки зимовавших составляют особи 3-ей и 4-ой когорт (дети и внуки зимовавших прошлого года – второе поколение). Пятая когорты – самая малочисленная (в основном правнуки зимовавших – третье поколение), наличествует в популяции не каждый год. Стоит отметить высокую разнородность (степень которой существенно колеблется по годам) собственно отдельных когорт по происхождению, так как родителями любой когорты часто являются особи из разных поколений. Кроме того, гетерогенность возрастает за счет “возрастного кросса” [12, 28]. На временных срезах разных лет (рис. 3) продемонстрировано одновременное наличие десяти когорт: пяти когорт предыдущего года рождения и пяти когорт следующего.

Важно отметить, что при переходе популяции через зиму сохраняется сформировавшееся к осени соотношение когорт и не наблюдается избирательной элиминации животных в течение осенне-зимне-весеннего периода [12]. При этом вся информация, приобретенная популяцией к осени, переносится через зиму. Благодаря наличию в зимующей группировке животных разных поколений предыдущего года рождения, создается возможность передачи генетической информации не только через последовательную смену поколений, но и непосредственно от первого поколения одного года рождения к первому поколению следующего года – транс-

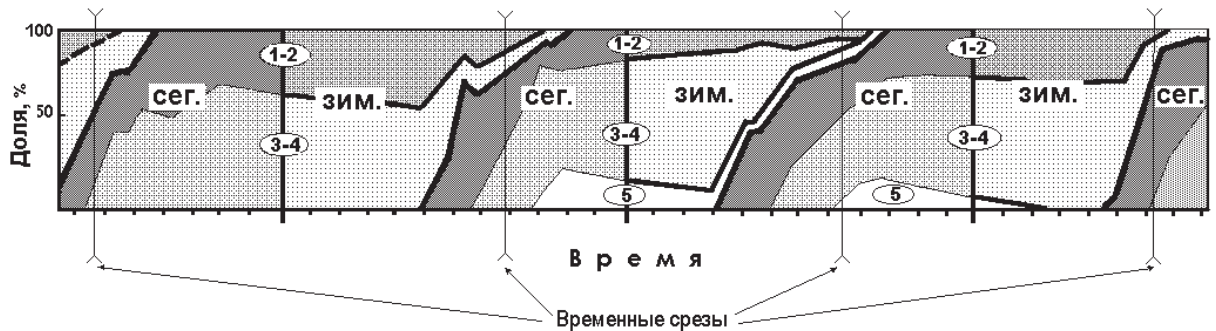


Рис. 3. Тонкая возрастная структура *S. uralensis* из зоны ВУРСа. 1–5 – когорты (зим. – зимовавшие, сег. – сеголетки) [10]

генерационный путь передачи. Известно, что изменение возрастной структуры популяции влечет за собой изменение ее генетического состава. Этот аспект представляется важным в практике эколого-генетических исследований на грызунах, поскольку, несмотря на морфофизиологическое и иное сходство, зимовавшие особи имеют разное происхождение и в разные годы могут качественно различаться по соотношению частот аллелей. Между тем, как показано в работе [29], аллозимная гетерозиготность определяет высокую интенсивность обменных процессов, скорость полового созревания, возраст первой репродукции и другие жизненно важные характеристики животных.

Разнородность группировки зимовавших является своеобразным буфером, наличие которого имеет принципиальное значение в экстремальных ситуациях, когда за счет действия неблагоприятных факторов различной природы, в том числе и антропогенной, размножение сеголеток нарушается или отсутствует вовсе, например, при засухах [11, 12]. Нами [9] показано, что в весенне-летний период доля зимовавших мышей в зоне ВУРСа составляет в разные годы 60–80 %. Логично предположить, что чем она выше, тем больше потенциальные возможности для трансгенерационной передачи генетической информации.

Таким образом, принципиально новым результатом при анализе тонкой возрастной структуры мышевидных грызунов из зоны радиоактивного загрязнения является впервые показанная реализующаяся возможность

трансгенерационной передачи радиационно-индуцированных генетических последствий не только через последовательную смену поколений, но напрямую – от первого поколения одного года рождения к первому поколению следующего года рождения [10]. В основе трансгенерационной трансмиссии генетических и эпигенетических эффектов лежит разнородность группировки зимовавших. В свою очередь базой для формирования функциональной разнородности популяции является бивариантность онтогенетического развития мелких млекопитающих – мощный механизм (резерв) поддержания ее разнокачественности особенно на антропогенно нарушенных, в т.ч. на радиоактивно загрязненных территориях.

#### **Эколого-генетические исследования на грызунах из зоны ВУРСа [14]**

Проведено сопряженное изучение нестабильности генома и удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани *S. uralensis*. Результаты цитогенетического исследования свидетельствуют об интенсивном мутационном процессе у грызунов из зоны ВУРСа (участки оз. Бердениш, оз. Урускуль). Обнаружены увеличение хромосомной нестабильности, проявляющееся в повышении частоты клеток с хромосомными aberrациями в костном мозге (табл. 1) и значимая положительная корреляция последних с удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани грызунов (рис. 4) [14].

Известно, что ионизирующее излуче-

ние индуцирует в первую очередь именно структурные нарушения хромосом и хроматид. Наибольшие частоты хромосомных aberrаций наблюдали у мышей с участков оз. Бердениш и оз. Урускуль, расположенных по оси ВУРСа, хотя различия между ними несущественны. Фоновые выборки между собой значимо не различались. Средняя частота клеток с хромосомными aberrациями у животных из импактных выборок была в 7–12 раз выше, чем в контроле (различия вы-

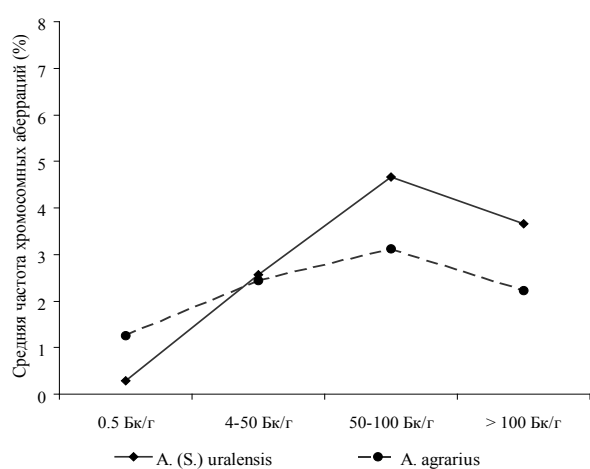


Рис. 4. Средняя частота хромосомных aberrаций у *A. (S.) uralensis* и *A. agrarius* в зависимости от удельной активности <sup>90</sup>Sr в костной ткани [14]

соко достоверны) (табл. 1). Значимые различия (в 5–11 раз) между «грязными» и «чистыми» выборками выявлены также по частоте встречаемости клеток с пробелами.

Особого внимания заслуживают aberrации хромосомного типа и клетки с множественными повреждениями, которые обнаружены у большей части мышей из импактных участков (80 и 72 %, соответственно). Доля носителей aberrантных клеток на фоновых территориях не превышала 27 %. Отметим, что мультиaberrантные клетки рассматривают качестве маркеров высокоэнергетического радиационного воздействия на организм млекопитающих и считают индикатором наследуемой геномной нестабильности. Такие клетки неоднократно наблюдали при обследовании населения, пострадавшего после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки, у жителей территорий, загрязненных радионуклидами в результате техногенных катастроф в России и за рубежом, а также у людей, профессионально контактирующих с источниками ионизирующего излучения. Оценка связи наблюдаемого мутагенного эффекта с удельной активностью <sup>90</sup>Sr в костной ткани лесных мышей с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена ( $R_s$ ) показала высоко достоверную положительную связь ( $R_s=0,514$ ;  $p=0,007$ ) (рис. 4).

Сходный результат, хотя и с меньшим уровнем значимости, был получен для полевых мышей ( $R_s=0,245$ ;  $p=0,042$ ). У обоих видов различия по частоте хромосомных aberrаций

Таблица 1

Удельная активность <sup>90</sup>Sr в костной ткани и частота хромосомных нарушений у *A. (S.) uralensis* из зоны ВУРСа и фоновых участков [14]

Участки отлова	Число животных (клеток)	Активность <sup>90</sup> Sr, Бк/г	Доля клеток (%)		
			с хромосомными aberrациями	анеуплоидных и полиплоидных	с пробелами
оз. Бердениш	10 (500)	75,7±15,9	4,20±1,25	0,60±0,31	5,00±1,20
оз. Урускуль	7 (350)	88,8±27,3	3,14±1,14	1,14±0,59	2,86±0,86
пос. Метлино	11 (550)	1,7±0,8	0,55±0,28	0,36±0,24	1,09±0,41
пос. Уецкое	18 (900)	–	0,33±0,18	1,11±0,33	0,44±0,20
H (критерий Крускала-Уоллеса); p			$\chi^2$ ; p		
		17,40 0,0002	38,541; <0,0001	3,069; 0,358	38,499; <0,0001



между группами животных, ранжированные по удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани, были высоко достоверны ( $\chi^2=14,8-27,4$ ,  $p<0,002$ ). На рис. 4 видно, что уже при 8–100 кратном превышении фоновой удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  наблюдается увеличение хромосомной нестабильности. Парные сравнения выявили значимые различия между животными с фоновыми удельными активностями (I группа) и остальными группами ( $\chi^2=4,3-28,2$ ,  $p<0,038$ ), в то время как группы со II по IV по величине цитогенетического эффекта достоверно не различались ( $\chi^2=0,1-3,7$ ,  $p>0,060$ ).

Отметим, что данное цитогенетическое исследование выполнено на несозревающих в год рождения сеголетках (второй тип онтогенеза), которые весной будущего года перейдут в категорию зимовавших и станут основой для возобновления популяции, в которую и перенесут имеющийся мутационный груз в виде целого спектра генетических и эпигенетических нарушений. Трансгенерационное наследование радиационно-индуцированных хромосомных повреждений продемонстрировано в экспериментах на рыжих полевках, доставленных из зоны Чернобыльской АЭС [30]. У беременных самок, выведенных из зоны действия радиационного фактора и содержащихся на чистых кормах, а также их потомков, рожденных в виварии, отсутствовало значимое снижение частоты хромосомных aberrаций в соматических клетках. Длительное сохранение хромосомной нестабильности (свыше 24 мес.), вызванной дозами высокой и низкой интенсивности, описано в поколениях репопулирующих стволовых гемопоэтических клеток мышей [31].

### *Миграции грызунов*

Особый интерес связан с изучением миграционной активности грызунов в зоне ВУРСа – узкая протяженная территория с резко падающим градиентом радиоактивного загрязнения. Результаты массового мечения животного населения антибиотиками тетрациклинового ряда свидетельствуют о высокой миграционной подвижности грызунов, о наличии активных перемещений животных, как в зоне загрязнения, так и за пределы радиационного заповедника, т.е. о проточном населении – населении с постоянно

меняющимся составом [32]. Доля мигрантов с ВУРСа на фоновый участок в разные годы и сезоны варьировала от 5 до 30 % [17]. Отметим, что в случае наличия обширных однородных сплошных биотопов (в зоне ВУРСа таковые отсутствуют, наблюдается мозаичность), процент поимок меченых животных был бы существенно ниже за счет равновероятных разнонаправленных перемещений. По данным радиоактивного мечения ( $^{90}\text{Sr}$ ) доля мигрантов в выборках разных лет и сезонов отловов варьировала от 17 до 40 % [33]. Особь, побывавшая в зоне ВУРСа, уносит в себе последствия радиационного воздействия, в том числе, и на значительно удаленные сопредельные территории. Таким образом, получены доказательства того, что население мышевидных грызунов в зоне ВУРСа не является изолированным.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность изложенных материалов свидетельствует о сложности микроэволюционных процессов, происходящих в населении мелких грызунов в зоне локального радиоактивного загрязнения и существенной модифицирующей роли экологических факторов. Эколого-генетические показатели грызунов вагильных видов свидетельствуют об интенсивном мутационном процессе и положительной корреляции частоты клеток с хромосомными aberrациями с удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани.

Известно, что миграции обеспечивают животным возможность выбора оптимальных условий существования в тот или иной момент времени. С участием этого механизма регулируется численность особей в популяции и происходит заселение новых местообитаний, следовательно, миграции тесно связаны с отбором. Нельзя недооценивать роль миграций в микроэволюционных преобразованиях у грызунов даже временно побывавших в зоне радиоактивного загрязнения. За счет дальних перемещений животных на сопредельных территориях можно ожидать увеличения генетического разнообразия, индуцированного мутациями *de novo*. Проведенные исследования охватили широкий спектр задач на разных уровнях биологической организации. Сделанные выводы и умозаключе-

чения позволяют наметить будущие перспективы. Выбраны модельные объекты и обоснованы параметры для целей успешного мониторинга. Показана непреходящая ценность сочетания природных и лабораторных экспериментов. Экстраполяция полученных данных и установленных закономерностей, отработанных методических подходов и приемов незаменимы при изучении животного населения иных техногенных территорий, подвергшихся повреждающему действию поллютантов различной природы. Корректная экстраполяция ряда результатов на популяции других млекопитающих и, в перспективе, на человека имеет под собой четкую научную основу и не выглядит фантазией. В перспективе возможно успешное прогнозирование ситуаций на любые другие загрязненные территории – прорисовка сценариев реакций биоты в ответ на неизбежные новые техногенные инциденты, которые происходят и будут происходить в связи интенсивным развитием мировой ядерной промышленности, увеличивающей загрязнение биосферы техногенными радионуклидами, примером чему является выброс в биосферу радиоактивных веществ в результате аварии на АЭС Фукусима-1 (Япония) в 2011 г.

**Работа частично поддержана РФФИ (проект 10-04-01657) и Программой ОФИ между Институтами УрО РАН и госкорпорациями РФ (проект № 12-4-002-ЯЦ).**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексахин Р.М. Радиоэкология XXI // Вестник РАН. – 2010. – Т. 80. – № 4. – С. 321–328.
2. Ильенко А.И. Концентрирование животными радиоизотопов и их влияние на популяцию. – М.: Наука, 1974. – 169 с.
3. Ильенко А.И., Крапивко Т.П. Экология животных в радиационном биогеоценозе. – М.: Наука, 1989. – 223 с.
4. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. – М.: Наука, 1993. – С. 258–302.
5. Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. Радиоэкологическое исследование почвенного покрова Восточно-Уральского государственного заповедника и сопредельных территорий // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2011. – Т. 51. – № 4. – С. 476–482.
6. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. – Екатеринбург: Гощицкий, 2008. – 203 с.
7. Тарасов О.В. Радиоэкология наземных позвоночных головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. – Озерск, 2000.
8. Бетенев Н.Д., Ипатов Е.Г., Баушева О.П., Любашевский Н.М. Идентификация бета-излучателей биопроб с территории ВУРСа // Проблемы экологии и охраны окружающей среды. – Екатеринбург, 1996. – С. 193–194.
9. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В., Модоров М.В. Анализ населения грызунов в районах техногенного неблагополучия (на примере *Apodemus (S.) uralensis* из зоны ВУРСа) // Экология. – 2008. – № 4. – С. 299–306.
10. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В. Гетерогенность группировки зимовавших – основа трансгенерационной трансмиссии радиационно-индуцированных эффектов у грызунов // Доклады РАН. – 2012. – Т. 443. – № 1. – С. 136–138.
11. Оленев Г.В. Альтернативные типы онтогенеза цикломорфных грызунов и их роль в популяционной динамике (экологический анализ) // Экология. – 2002. – № 5. – С. 341–350.
12. Оленев Г.В. Функционально-онтогенетический подход в изучении популяций цикломорфных млекопитающих: Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. – Екатеринбург, 2004.
13. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В., Модоров М.В., Тарасов О.В. Мелкие млекопитающие в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа: 50 лет спустя // Вопросы радиац. безопасности. – 2007. – Спецвыпуск. – С. 68–78.
14. Ялковская Л.Э., Григоркина Е.Б., Тарасов О.В. Цитогенетические последствия хронического радиационного воздействия на популяции грызунов в зоне влияния Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2010. – Т. 50. – № 4. – С. 466–471.
15. Макгрегор Г., Варли Дж. Методы работы

- с хромосомами животных. – М.: Мир, 1986. – 268 с.
16. Клевезаль Г.А., Мина М.В. Методика группового мечения грызунов с помощью тетрациклина и возможности ее использования в экологических исследованиях // Зоол. журн. – 1980. – Т. LIX. – Вып. 6. – С. 937–941.
17. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В. Миграции грызунов. Проточное население в зоне локального техногенного загрязнения // Вестник Оренбургского гос. ун-та. – 2011. – № 12. – С. 56–58.
18. Григоркина Е.Б. Репродуктивная стратегия и иммунный статус грызунов в техногенной среде // Доклады Академии Наук. – 2007. – Т. 412. – № 1. – С. 129–131.
19. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В., Пашнина И.А. и др. Репродуктивная стратегия мышевидных грызунов в радиоактивно загрязненном биогеоценозе // Известия Челябинского науч. центра. – 2006. – вып. 4 (34). – С. 101–105.
20. Пашнина И.А. Анализ иммунологических и гематологических особенностей грызунов, обитающих в радиоактивной среде: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. – Екатеринбург, 2003.
21. Григоркина Е.Б., Пашнина И.А. К проблеме радиоадаптации мелких млекопитающих (экологическая специализация вида, радиорезистентность, гемопоэз, иммунитет) // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2007. – Т. 47. – № 3. – С. 371–378.
22. Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. Радиоэкология и авария на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – вып. 4. – С. 267–276.
23. Geras'kin S., Oudalova A., Dicareva N. et al. Effects of radioactive contamination on Scots pines in the remote period after the Chernobyl accident // *Ecotoxicology*. – 2011. – V. 20. – P. 1195–1208.
24. Шилов И.А. Структура популяций млекопитающих. – М.: Наука, 1991. – 151 с.
25. Gliwicz J. Why do some young voles growing? // *Polish Ecological Studies*. – 1995. – V. 20. – No.3–4. – P. 335–341.
26. Kendall B.E., Fox G.A., Fujiwara M., Nogueira T.M. Demographic heterogeneity, cohort selection and population growth // *Ecology*. – 2011. – V. 92. – No.10. – P. 1985–1993.
27. Колчева Н.Е. Стертость зубов как критерий возраста малой лесной мыши при анализе возрастной структуры популяций // Вестник Оренбургского ун-та. – 2009. – Спецвыпуск. – Ч. I. – С. 77–80.
28. Оленев Г.В., Григоркина Е.Б. Динамическое соотношение полов в популяциях цикломорфных млекопитающих (Rodentia, Cricetidae, Muridae) // Зоол. журн. – 2011. – Т. 90. – № 1. – С. 45–58.
29. Алтухов Ю.П., Москалейчик Ф.Ф. Аллозимная гетерозиготность, интенсивность метаболизма, скорость полового созревания и продолжительность жизни // ДАН. – 2006. – Т. 410. – № 6. – С. 842–846.
30. Ryabokon N.I., Goncharova R.I. Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout // *Radiat. Environ. Biophys.* – 2006. – V. 45. – P. 167–177.
31. Watson G.E., Pocock D.A., Parworth D. et al. In vivo chromosomal instability and transmissible aberrations in the progeny of haemopoietic stem cells induced by high- and low-LET radiations // *Int. J. Radiat. Biol.* – 2001. – V. 77. – P. 409–417.
32. Grigorkina E.B., Olenov G.V. Radioadaptation of rodents in the zone of local radioactive contamination (Kyshtim Accident, RUSSIA): 50 years on // *Radioprotection*. – 2009. – V. 44. – No.5. – P. 129–134.
33. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В., Тарасов О.В. Миграционная активность грызунов в зоне влияния Восточно-Уральского радиоактивного следа // Териофауна России и сопредельных территорий: Матер. Междунар. совещ. – Москва: Т-во научных изданий КМК, 2011. – С. 125.