

УДК 574:539.1.04:599.323:575.224.4

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОПУЛЯЦИИ ГРЫЗУНОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА

© 2010 г. Л. Э. Ялковская¹, Е. Б. Григоркина¹, О. В. Тарасов²

¹ Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

² ФГУП ПО “Маяк”, Озерск

Поступила в редакцию 19.11.2009 г.

У малых лесных (*Apodemus (Sylvaemus) uralensis* Pall., 1811) и полевых (*Apodemus agrarius* Pall., 1771)** мышей, населяющих зону влияния Восточно-Уральского радиоактивного следа (Кыштымская радиационная авария 1957 г.), проведено сопряженное изучение хромосомной нестабильности в клетках костного мозга и удельной активности ⁹⁰Sr в костной ткани. Уровень и характер мутационных эффектов у животных обоих видов из головной части радиоактивного следа (плотность загрязнения почвы ⁹⁰Sr 2322–16690 кБк/м²) свидетельствует об интенсивном мутационном процессе. Установлена значимая положительная корреляция частоты клеток с хромосомными aberrациями и удельной активностью ⁹⁰Sr в костной ткани мышей. Обсуждаются причины отсутствия устойчивости популяций грызунов к столь длительному влиянию (за 50 лет, прошедших со дня аварии, в популяциях грызунов сменилось свыше 100 поколений) мутагенного фактора, в том числе миграционные процессы и специфика конфигурации зоны загрязнения (узкая протяженная территория с резко падающим градиентом радионуклидного загрязнения), которые снижают возможность закрепления тех или иных изменений в ряду поколений у грызунов подвижных видов.

Хромосомная нестабильность, ВУРС, ⁹⁰Sr, грызуны, популяция, миграция, конфигурация зоны загрязнения, мутационный груз.

В последние десятилетия в системе обеспечения радиационной безопасности происходит смена парадигм: антропоцентрический принцип защиты окружающей среды от ионизирующих излучений заменяется экоцентрическим. Это предполагает проведение широкомасштабных исследований по радиоэкологии индикаторных видов растений и животных, углубленный анализ биологических эффектов радиационного воздействия в их популяциях, определение допустимого уровня облучения с учетом особенностей конкретной радиоэкологической ситуации [2]. Не менее важным направлением в радиобиологических исследованиях является изучение отдаленных генетических последствий радиоактивного загрязнения среды для биоты и человека. Несмотря на общность многих механизмов ответной реакции организма на облучение с механизмами стресс-реакции на другие воздействия, биологические эффекты ионизирующей радиации связаны, прежде всего, с повреждением генетических структур [3, 4]. Загрязнение обширных террито-

рий искусственными радионуклидами, а особенно катастрофа на Чернобыльской АЭС, способствовали выходу на первый план исследований, посвященных проблеме адаптации природных популяций к хроническому влиянию радиоактивного загрязнения. В этой связи уникальными по продолжительности для отечественной биологии являются исследования, проводимые в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа), образовавшегося в 1957 г. в результате аварии на ПО “Маяк” (Челябинская обл.). Начиная с 60-х г. прошлого века на территории ВУРСа проводили систематические работы по изучению закономерностей аккумуляции радионуклидов в биоценозах, путей и скорости их миграции, оценке биологического воздействия повышенного фона радиации на природные популяции растений и животных. Материалы, полученные на популяциях мышевидных грызунов, наиболее полно представлены в обобщающей двадцатилетние исследования монографии, опубликованной в 1993 г. [5]. В частности, в этой работе, а также другими авторами [6, 7] было отмечено значительное увеличение интенсивности мутационного процесса в соматических клетках грызунов из головной части ВУРСа, обусловленное мутаген-

* Адресат для корреспонденции: 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, Институт экологии растений и животных УрО РАН; тел.: (343) 260-82-55; факс: (343) 260-82-56; mail: lida@ipae.uran.ru.

** Латинские названия животных даны по [1].

ным влиянием ^{90}Sr — основным дозообразующим радионуклидом на исследуемой территории.

К настоящему времени прошло более 50 лет с момента аварии и можно полагать, что при столь длительном радиационном воздействии (в популяциях грызунов сменилось свыше 100 поколений) у животных могла сформироваться устойчивость к мутагенному влиянию повышенного радиационного фона. В этой связи в 2006–2008 гг. нами были проведены цитогенетические исследования грызунов, населяющих зону ВУРСа.

Цель работы — анализ хромосомной нестабильности и удельной активности ^{90}Sr в костной ткани малой лесной мыши (*Apodemus (Sylvaemus) uralensis* Pall., 1811) и полевой мыши (*Apodemus agrarius* Pall., 1771) — видов, доминирующих на территории ВУРСа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Грызуны были отловлены на двух участках в головной части ВУРСа с разным уровнем радиоактивного загрязнения. Участок Бердениш ($55^{\circ}46'$ с.ш., $60^{\circ}53'$ в.д.) находится в 13 км от эпицентра аварии, плотность загрязнения почвы ^{90}Sr составляет $6740\text{--}16690$ кБк/ м^2 ($182\text{--}451$ Ки/ км^2); участок Урускуль ($55^{\circ}49'$ с.ш., $60^{\circ}55'$ в.д.) — в 16 км от эпицентра аварии, плотность загрязнения почвы ^{90}Sr — 2322 кБк/ м^2 (62.8 Ки/ км^2) [8]. γ -Фон на уровне почвы загрязненных участков в 2–6 раз выше, чем на фоновой территории, а уровень β -загрязнения поверхности почвы превышает фоновый в 8–79 раз. Сопредельный фоновый участок Метлино расположен в 10–15 км от загрязненных участков в окрестностях оз. Кожакуль ($55^{\circ}48'$ с.ш., $61^{\circ}00'$ в.д.), плотность загрязнения почвы ^{90}Sr — 44 кБк/ м^2 (1.2 Ки/ м^2). Географически удаленным контролем служили выборки из популяции лесных мышей, обитающей в окрестностях с. Уецкое (Талицкий р-н, Свердловская обл., $57^{\circ}02'$ с.ш., $63^{\circ}47'$ в.д.), и полевых мышей — в окрестностях с. Шигаево (Шалинский р-н, Свердловская обл., $57^{\circ}20'$ с.ш., $58^{\circ}40'$ в.д.), где радиоактивное загрязнение находится в пределах регионального фона.

Отловы мышей проводили в августе–сентябре. Выборки животных были представлены сеголетками (возраст 2–4 мес) преимущественно половозрелыми (второй тип онтогенеза [9]) обоих полов (половой состав выборок значимо не различался $p > 0.05$). Препараты метафазных хромосом были приготовлены из костного мозга стандартным методом [10]. Для каждого животного анализировали по 50 клеток, регистрируя структурные aberrации хромосом, анеуплоидные и полиплоидные клетки и пробелы. Истинные разрывы хромосом отличали от пробелов по общепринятым критериям (смещение по отношению к

оси хроматиды и/или наличие просвета, превышающего ширину хроматиды). Радиометрические исследования костного материала (бедренные кости) выполнены в ЦЗЛ ПО “Маяк” по сертифицированной методике. Пробы для радиометрии готовили 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}Sr выполнены β -спектрометрическим методом на приборе БС-1, ошибка измерений для проб составляла не более 8%. Удельную активность радионуклидов в костной ткани рассчитывали на грамм воздушно-сухой массы вещества (Бк/г).

Значимость различий между выборками по цитогенетическим показателям оценивали с использованием критерия χ^2 , по накоплению ^{90}Sr — на основании критерия Крускала–Уоллиса (H). Оценка зависимости уровня хромосомных нарушений от депонированного радионуклида была проведена как на индивидуальном уровне с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена (R_s), так и с разбиением животных на группы по степени отличий удельной активности ^{90}Sr от фоновых значений. Были выделены следующие группы: I — удельная активность ^{90}Sr 0.5 Бк/г (фон); II — $4\text{--}50$ Бк/г (превышение фона в $8\text{--}100$ раз); III — $50\text{--}100$ Бк/г (превышение фона в $100\text{--}200$ раз); IV — более 100 Бк/г (превышение фона в 200 и более раз). Статистическая обработка результатов проведена в пакете программ Statistica 5.5 для Windows. При проверке статистических гипотез был принят 5%-ный уровень значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Удельные активности ^{90}Sr в костной ткани лесных мышей из выборок с загрязненных участков значимо превышали показатели для животных с сопредельной контрольной территории — Метлино (табл. 1), что свидетельствует о различиях в испытываемой дозовой нагрузке от внутреннего облучения. Ионизирующее излучение индуцирует в первую очередь структурные нарушения хромосом и хроматид (хромосомные aberrации). Именно по этому показателю обнаружены значимые различия между выборками: средняя частота клеточ с хромосомными aberrациями у лесной мыши с участков из головной части ВУРСа была в 7–12 раз выше, чем у контрольных животных. Доля носителей aberrантных клеток в выборках с участка Бердениш составила 80%, Урускуль —

Таблица 1. Удельная активность ^{90}Sr в костной ткани и частота хромосомных нарушений у *A. (S.) uralensis* из зоны ВУРСа и фоновых участков

| Участки отлова | Число животных (клеток) | Активность ^{90}Sr (Бк/г) | Доля клеток (%) | | |
|--|-------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| | | | с хромосомными aberrациями | анеуплоидных и полиплоидных | с пробелами |
| Бердениш | 10 (500) | 75.7 ± 15.9 | 4.20 ± 1.25 | 0.60 ± 0.31 | 5.00 ± 1.20 |
| Урускуль | 7 (350) | 88.8 ± 27.3 | 3.14 ± 1.14 | 1.14 ± 0.59 | 2.86 ± 0.86 |
| Метлино | 11 (550) | 1.7 ± 0.8 | 0.55 ± 0.28 | 0.36 ± 0.24 | 1.09 ± 0.41 |
| Уецкое | 18 (900) | — | 0.33 ± 0.18 | 1.11 ± 0.33 | 0.44 ± 0.20 |
| <i>H</i> (критерий Крускала–Уоллеса); <i>p</i> | | | | χ^2 ; <i>p</i> | |
| 17.40; 0.0002 | | | 38.541; <0.0001 | 3.069; 0.358 | 38.499; <0.0001 |

Таблица 2. Типы хромосомных aberrаций у *A. (S.) uralensis* из зоны ВУРСа и фоновых участков

| Участок отлова | Число aberrаций | | | | Среднее число нарушений на aberrантную клетку |
|----------------|---------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|---|
| | хроматидного типа | | хромосомного типа | | |
| | одиночные фрагменты | хроматидные транслокации | парные фрагменты | хромосомные транслокации | |
| Бердениш | 31 | 1 | 8 | 1 | 1.95 |
| Урускуль | 10 | 1 | 4 | 1 | 1.45 |
| Метлино | 3 | — | — | — | 1.00 |
| Уецкое | 3 | — | — | — | 1.00 |

71.5%, на контрольной территории (Метлино) – 27%, на географически удаленном участке (Уецкое) – 16%. Значимые отличия от фоновых уровней (в 5–11 раз) выявлены также по частоте встречаемости клеток с пробелами, значение которых, как индикаторов мутагенного воздействия, остается спорным, хотя часть из них, вероятно, относится к истинным разрывам хромосом [11, 12].

В качестве индикаторов мутагенного воздействия радиационной природы принято рассматривать возникновение значительного числа клеток с нарушениями хромосомного типа, а также клеток с множественными повреждениями хромосом [13]. Детальный анализ встречаемости разных типов aberrаций показал, что у лесных мышей (табл. 2), отловленных в зоне ВУРСа, нарушения хромосомного типа от общего числа aberrаций составляют от 22% (Бердениш) до 45% (Урускуль). Обнаружены также клетки с множественными, в том числе обменного типа, нарушениями хромосом – среднее число повреждений на aberrантную клетку у животных из зоны ВУРСа больше единицы (табл. 2). У мышей с контрольных участков aberrации были представлены только одиночными фрагментами (нарушения хроматидного типа), что является характерным

для спонтанного мутагенеза [14], а среднее число повреждений на aberrантную клетку не превышало единицу.

Сходная картина цитогенетического поражения получена для полевых мышей. У этих грызунов с загрязненных участков, для которых удельная активность ^{90}Sr в костной ткани была достоверно выше, чем в сопредельном контроле, наблюдается значимое увеличение частоты хромосомных aberrаций (табл. 3). Доля носителей aberrантных клеток на участке Бердениш составила 78%, на участке Урускуль – 58%, в Метлино – 50%, на географически удаленной территории (Шигаево) – 40%.

Aberrации хромосомного типа зафиксированы только у животных с загрязненных участков (табл. 4), их доля составила 33 и 15% (Бердениш и Урускуль соответственно) от общего числа нарушений. Кроме того, у полевых мышей с участка Бердениш выявлены мультиaberrантные клетки. Следует отметить, что у одного самца из этой выборки обнаружен мозаицизм. Среди 50 проанализированных клеток 2% имели нормальный кариотип ($2n = 48$, $NFa = 56$), в 19% клеток регистрировалось 47 хромосом (отсутствовал один из мелких акроцентриков), а 79% метафаз имели наряду с 47 нормальными хромосомами одну мор-

Таблица 3. Удельная активность ^{90}Sr в костной ткани и частота хромосомных нарушений у *A. agrarius* из зоны ВУРСа и фоновых участков

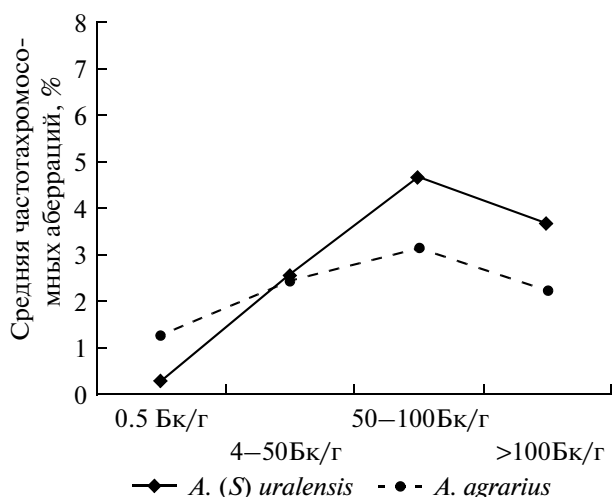
| Участки отлова | Число животных (клеток) | Активность ^{90}Sr (Бк/г) | Доля клеток, % | | |
|--|-------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | | | с хромосомными aberrациями | анеуплоидных и полиплоидных | с пробелами |
| Бердениш | 39 (1950) | 69.6 ± 9.7 | 2.87 ± 0.37 | 0.62 ± 0.18 | 2.67 ± 0.33 |
| Урукуль | 12 (600) | 12.0 ± 5.6 | 2.17 ± 0.63 | 0.33 ± 0.22 | 2.67 ± 0.51 |
| Метлино | 18 (900) | 2.62 ± 1.1 | 1.33 ± 0.39 | 0.33 ± 0.18 | 2.88 ± 0.54 |
| Шигаево | 10 (500) | — | 1.40 ± 0.67 | 0.40 ± 0.26 | 1.80 ± 0.47 |
| <i>H</i> (критерий Крускала–Уоллеса); <i>p</i> | | | χ^2 ; <i>p</i> | | |
| 36.046; <0.0001 | | | 8.602 0.035 | 1.487; 0.685 | 1.600; 0.660 |

Таблица 4. Типы хромосомных aberrаций у *A. agrarius* из зоны ВУРСа и фоновых участков

| Участок отлова | Число aberrаций | | | | Среднее число нарушений на aberrантную клетку |
|----------------|---------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|---|
| | хроматидного типа | | хромосомного типа | | |
| | одиночные фрагменты | хроматидные транслокации | парн фрагменты | хромосомные транслокации | |
| Бердениш | 35 | — | 16 | 1 | 1.09 |
| Урукуль | 11 | — | 2 | — | 1 |
| Метлино | 12 | — | — | — | 1 |
| Шигаево | 7 | — | — | — | 1 |

фологически измененную, имеющую крайне малые размеры.

Оценка связи наблюдаемого кластогенного эффекта с удельной активностью ^{90}Sr в костной ткани лесных мышей с помощью коэффициента



Средняя частота хромосомных aberrаций у *A. (S) uralensis* и *A. agrarius* в зависимости от удельной активности ^{90}Sr в костной ткани

ранговой корреляции Спирмена (*Rs*) показала высоко достоверную положительную связь ($R_s = 0.514$; $p = 0.007$). Сходный результат, хотя и с меньшим уровнем значимости, получен и для полевых мышей ($R_s = 0.245$; $p = 0.042$).

У обоих видов различия по частоте хромосомных aberrаций между группами животных, ранжированными по удельной активности ^{90}Sr в костной ткани, были высоко достоверны ($\chi^2 = 14.8–27.4$, $p < 0.002$). На рисунке видно, что уже при 8–100-кратном превышении фоновой удельной активности ^{90}Sr наблюдается увеличение хромосомной нестабильности. При попарных сравнениях выявлены значимые различия между животными с фоновыми удельными активностями (группа I) и остальными группами ($\chi^2 = 4.3–28.2$, $p < 0.038$), в то время как группы II–IV по величине цитогенетического поражения достоверно не различались ($\chi^2 = 0.1–3.7$, $p > 0.060$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, у лесных и полевых мышей из головной части ВУРСа, отловленных на двух участках с разной плотностью радиоактивного загрязнения почвы ^{90}Sr , обнаружено увеличение

хромосомной нестабильности, проявляющееся в повышении частоты клеток с хромосомными aberrациями в костном мозге. Несмотря на то, что с момента образования радиоактивного следа прошло более 50 лет, наблюдаемые величины цитогенетических нарушений сопоставимы с частотами, зарегистрированными у грызунов на данной территории в первые десятилетия после аварии [7]. Об интенсивном мутационном процессе, идущем в популяциях грызунов в зоне ВУРСа, свидетельствует также обнаружение мозаицизма в выборке полевых мышей с участка Бердениш. Такой эффект радиационного воздействия был показан и для грызунов из 30-километровой зоны аварии на Чернобыльской АЭС, когда у одной полевки-экономки 30% исследуемых клеток имели морфологически измененную хромосому первой пары [15].

Вероятнее всего, интенсификация мутационного процесса связана с повышенным содержанием ^{90}Sr в среде обитания и значительной аккумуляцией его в костной ткани животных. Согласно нашим данным, несмотря на значительную изменчивость индивидуальных удельных активностей ^{90}Sr и цитогенетических параметров, превышение фоновых значений аккумуляции радионуклида в 8 и более раз приводит к значимому увеличению хромосомной нестабильности на популяционном уровне.

Однако отметим, что по результатам многолетних комплексных исследований был сделан вывод о радиоадаптации в популяции лесных мышей, населяющих зону ВУРСа, по важнейшим жизненным показателям (численность, структура популяции, смертность, интенсивность размножения, морфофизиологические показатели, общая и специфическая резистентность) [16]. Радиоэкологические исследования в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (мощность дозы достигала 86.96 мГр/сут), проведенные через 10 лет с момента аварии на другом виде грызунов рыжей полевке (*Clethrionomys glareolus* Schreber 1780), не выявили интенсификации мутационного процесса, как на хромосомном, так и на молекулярном уровне [17].

Отсутствие устойчивости к хронически действующему мутагенному фактору, которая, как ожидалось, могла бы сформироваться в чреде более чем 100 поколений полевых и лесных мышей в зоне ВУРСа, вероятно, обусловлено несколькими взаимосвязанными причинами. Прежде всего, следует отметить уникальность этого территориального образования антропогенного происхождения, заключающуюся, как и отмечали ранее [18, 19], в его специфической конфигурации — узкой и протяженной территории с быстропадающим градиентом загрязнения. Вследствие малого поперечного размера радиоактивного облака, ра-

диоактивные выпадения сконцентрировались вдоль оси его движения, поэтому максимальная ширина следа с плотностью загрязнения почвы ^{90}Sr , равной 0.037 МБк/м², составляет около 10 км [20]. В районе проводимых исследований ширина зоны с плотностью загрязнения почвы ^{90}Sr , равной 37 МБк/м² составляет 800 м, 18.5 МБк/м² — 1400 м, 9.25 МБк/м² — 1580 м, 1.85 МБк/м² — 1800 м. Изучаемые виды грызунов обладают большой подвижностью, совершая сезонные межбиотопические миграции как в репродуктивный период, так и вне сезона размножения [21]. Отсутствие изоляции способствует свободному перемещению животных из загрязненных локалитетов на сопредельные фоновые территории и наоборот. Согласно нашим данным по индивидуальному накоплению ^{90}Sr (пожизненный маркер) доля мигрантов в обоих направлениях составляет от 8 до 20%. Миграционные процессы, как мы предполагали [19], снижают возможность закрепления тех или иных изменений в ряду поколений и препятствуют развитию радиоадаптации у грызунов подвижных видов.

Нельзя исключить проявления у части животных из популяций лесных и полевых мышей, испытывающих длительное радиационное воздействие, наследуемой хромосомной нестабильности (трансгенерационная нестабильность генома). Носители такой нестабильности генома были обнаружены в зоне ВУРСа в популяциях обыкновенной полевки (*Microtus arvalis* Pall. 1779) [6], что в дальнейшем было подтверждено экспериментальными данными [22]. О возможности трансгенерационной передачи радиационно-индуцированных хромосомных повреждений и накопления их в популяции свидетельствуют данные, полученные на грызунах, обитающих в чреде поколений (22 поколения в течение 10 лет) на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС [23].

Отсутствие устойчивости на хромосомном уровне к хроническому мутагенному воздействию радиационного фактора не означает отсутствия общей радиорезистентности грызунов. В выборках полевых мышей с загрязненных участков наблюдали меньшую степень выраженности мутационных эффектов, чем у лесных мышей, что, возможно, связано с межвидовыми различиями в радиоустойчивости, известными для этих видов [18]. Однако наши данные свидетельствуют о повышенном уровне хромосомной нестабильности у обоих изучаемых видов грызунов в зоне влияния ВУРСа. Полученные в работе результаты приводят к заключению о сложности формирования адаптивных механизмов у мелких млекопитающих в зоне локального радиоактивного загрязнения, имеющей специфическую конфигурацию, и о необходимости проведения дальнейших комплексных исследований микроэволюционных

процессов в популяциях, находящихся под постоянным воздействием радиационного фактора.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 07-04-96091, № 10-04-96101, № 08-04-00638) и программой ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (02.740.11.0279).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов И.М., Ербаева М.А. Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий (зайцеобразные, грызуны). СПб.: Наука, 1995. 641 с.
2. Алексахин Р.М. // Мед. радиология и радиац. Безопасность. 2006. Т. 51. № 1. С. 28–33.
3. Моссэ И.Б. // Радиационный мутагенез и его роль в эволюции и селекции / Под ред. В.А. Шевченко. М.: Наука, 1987. С. 73–83.
4. Москалев А.А., Шапошников М.В. Генетические механизмы воздействия ионизирующих излучений в малых дозах. СПб.: Наука, 2009. 137 с.
5. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале / Под ред. В.Е. Соколова, Д.А. Криволицкого. М.: Наука, 1993. 336 с.
6. Гилева Э.А., Любашевский Н.М., Стариченко В.И. и др. // Генетика. 1996. Т. 32. № 1. С. 114–119.
7. Дубинин Н.П., Шевченко В.А., Алексеенко А.Я. и др. // Успехи совр. генетики. 1972. № 4. С. 170–206.
8. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Михайловская Л.Н., Ульянова Е.В. // Экология. 2005. № 5. С. 353–361.
9. Оленев Г.В. // Экология. 2002. № 5. С. 341–350.
10. Макгрегор Г., Варли Дж. Методы работы с хромосомами животных. М.: Мир, 1986. 268 с.
11. Brogger A. // Cytogenetics and Cell Genetics. 1982. V. 33. № 1–2. P. 14–19.
12. Gileva E.A. // Цитология и генетика. 2002. Т. 36. № 4. С. 17–23.
13. Бочков Н.П. // Мед. радиология. 1993. Т. 38. № 2. С. 32–35.
14. Smith K.C. // Mutat. Res. 1992. V. 277. P. 139–162.
15. Зайнуллин В.Г. Генетические эффекты хронического облучения в малых дозах ионизирующего излучения. СПб.: Наука, 1998. 100 с.
16. Ильенко А.И., Крапивко Т.П. // Зоол. журн. 1998. Т. 77. № 1. С. 108–116.
17. Wickliffe J.K., Chesser R.K., Rodgers B.E., Baker R.J. // Environ. Toxicol. Chem. 2002. V. 21. P. 1249–1254.
18. Григоркина Е.Б., Пашина И.А. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 3. С. 371–378.
19. Grigorkina E.B., Olenov G.V. // Radioprotection. 2009. V. 44. № 5. P. 129–134.
20. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В. и др. Радиоактивные беды Урала. Екатеринбург, 2000. 93 с.
21. Громов В.С. Пространственно – этологическая структура популяций грызунов. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2008. 581 с.
22. Гилева Э.А., Нохрин Д.Ю., Стариченко В.И. // Генетика. 2000. Т. 36. № 5. С. 714–717.
23. Ryabokon N.I., Goncharova R.I. // Radiat. Environ. Biophys. 2006. V. 45. P. 167–177.

CYTOGENETIC CONSEQUENCES OF CHRONIC IRRADIATION IN RODENT POPULATIONS INHABITING THE EASTERN URALS RADIOACTIVE TRACE ZONE

L. E. Yalkovskaya¹, E. B. Grigorkina¹, O. V. Tarasov²

¹ Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620144 Russia; e-mail: lida@ipae.uran.ru

² Mayak Production Association, Ozersk, Chelyabinsk Region, 456780 Russia

In bone marrow cells of rodents (*Apodemus (Sylvaemus) uralensis* Pall., 1811, *Apodemus agrarius* Pall., 1771) inhabiting the Eastern Urals Radioactive Trace (EURT) zone (Kyshtym radiation accident 1957) and adjacent areas of Urals, the chromosome instability and ⁹⁰Sr accumulation in bones were investigated. Intensive mutagenic process in both species from impact plots (the soil pollution by ⁹⁰Sr 2322-16690 kBq/m²) was found. Significant positive correlation of aberrant cells frequencies and ⁹⁰Sr was shown. Possible causes of the lack of resistance to long-term mutagenic factor (over 100 generations since 50 years from the accident) such as migration of animals and specific configuration of the EURT zone (narrow extended territory with sharply falling gradient of radionuclide pollution), which considerably decrease the probability that certain changes will be fixed and inherited in a series of generations of rodents, are discussed.