

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность И.Л. Гольдберг (ИЭРиЖ УрО РАН) и А.Г. Пакову (УрГУ) за помощь в проведении геоботанических описаний, Е.Л. Воробейчику (ИЭРиЖ УрО РАН) — за предоставление данных по индексам токсической нагрузки.

Исследования выполнены при финансовой поддержке ИНТАС грант № 93–1645 и РФФИ грант № 01–04–96418; № 01–04–49543 и № 01–05–65258.

## ЛИТЕРАТУРА

- Биоиндикация загрязнений наземных экосистем. Под ред. Р. Шуберга. М.: Мир. 1988. 350 с.
- Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург. 1994. 279 с.
- Дончева А.В. Ландшафт в зоне воздействия промышленности. М.: Лесная промышленность. 1978. 96 с.
- Давыдова М.В. Воздействие заводских дымов на травяные сосняки Южного Урала. Биол. Науки. 1982. № 11. С. 71–74.
- Загрязнение воздуха и жизнь растений. Под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 535 с.
- Лесные экосистемы и атмосферные загрязнения. Под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 197 с.
- Махнев А.К., Трубина М.Р., Прямоносова С.А. Лесная растительность в окрестностях предприятий цветной металлургии. Естественная растительность промышленных и урбанизированных территорий Урала. Свердловск: УрО АН СССР. 1990. С. 3–40.
- Смит. У. Х. Лес и атмосфера. Взаимодействие между лесными экосистемами и примесями атмосферного воздуха. М.: Прогресс. 1985. 429 с.
- Трубина М.Р., Махнев А.К. Динамика напочвенного покрова лесных фитоценозов в условиях хронического загрязнения фтором // Экология. 1997. № 2. С. 90–95.
- Freedman B., Hutchinson T.C. Long-term effects of smelter pollution on forest sylvan composition // Can. J. Bot. 1980. V.55. № 19. P.2123 — 2140.
- Weinstein L.N. Fluoride and plant life // J. Occup. Medicine. 1977. № 19. P.49–78.

### НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ПОПУЛЯЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКОЙ РАДИОАДАПТАЦИИ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ НА ВУРСе

**Н.М. Любашевский, В.И. Стариченко, Э.А. Гилева, Н.Г. Евдокимов, Н.А. Орехова, М.А. Пашнина, Л.Н. Расина, Н.В. Синева, О.В. Тарасов, Л.Э. Ялковская**

*Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Вопрос о возможности генетической радиоадаптации к загрязненной среде тесно связан с рядом проблем эволюции, экологического прогноза и экстраполяции на человека. Исследования его начались в середине прошлого века после появле-

ния обширных ядерных полигонов и к настоящему времени в той или иной мере положительно оценивается в десятках работ. При этом противоположная точка зрения также серьезно обосновывается. Один из главных аргументов к отрицанию возможности генетической радиоадаптации — невозможность в лабораторных условиях добиться ее воплощения. Так, хроническое поступление стронция-90 в различных дозировках на протяжении многих поколений не сопровождалось признаками радиоадаптации у подопытных крыс (Шведов, Голошапов, 1972). В других экспериментах (Индык и др., 2001) экспонировали мышей в Чернобыльской радиоактивной зоне на протяжении нескольких поколений и отмечали нарастание патологических проявлений, но также и появление некоторых сдвигов, которые были интерпретированы как признаки адаптации. К сожалению, в обоих вариантах описанных экспериментов исключены все факторы эволюции, «работающие» в природной среде. Наиболее значительный итог этих экспериментов — доказательство увеличения патологического груза в ряду облучаемых поколений. В ряде работ (Ильенко, Крапивко, 1974, 1989; Григоркина, Любашевский, 1996) показана более высокая толерантность животных из импактных выборок по сравнению с контролем к добавочному летальному облучению. Однако в других экспериментах (Дубинин и др., 1964) толерантность к добавочному облучению грызунов из радиационной среды не только не возрастала, но даже резко снижалась. Наконец, в новом эксперименте с хронической заправкой лесных мышей из ВУРСа и контроля стронцием-90 мы получили полное совпадение сроков отмирания животных. То есть радиочувствительность зрелых животных из импактной зоны не отличалась от радиочувствительности контрольных. Мы считаем, что результаты, полученные различными авторами при добавочном облучении, объясняются особенностями действия хронического и острого облучения. В специальном исследовании (Любашевский и др., 2001) оказалось, что при хроническом облучении более устойчивы аутбредные мыши, в то время как при остром — мыши линии СВА. Очевидно, что степень «хроничности» облучения отражается на результате. Даже однократное поступление радионуклида дает хроническое облучение (что сказалось в результатах эксперимента Дубинина и др., 1964) Тест «добавочное облучение» как показатель радиостойчивости у млекопитающих, таким образом, совершенно не информативен. Радиостойчивость импактной популяции зависит не от толерантности зрелых животных к летальному облучению, а от комплекса других, более тонких приспособительных механизмов, например, от способности успешного воспроизводства в радиоактивной среде, от способности к выживанию в условиях повышенного генетического груза, от селективных преимуществ перед мигрантами с «чистых» территорий.

Существенным аргументом против возможности радиоадаптации служат признаки глубокой патологии. Так, Богатов и Мартышов (1999), интерпретируя гематологическую картину, считали, что почти треть мелких млекопитающих на импактной территории поражена лейкозом. Материй и Таскаев (1999) такое же заключение делают на основании исследований на Чернобыльском полигоне. Эти авторы, отдельно друг от друга, предсказывали гибель радиогенных популяций.

Важнейшим контраргументом к утверждениям о наличии радиоадаптации стало также доказательство обратимости некоторых симптомов поражения.

Э.А. Гилева совместно с нами наблюдала нормализацию первоначально повышенного уровня цитогенетических нарушений на протяжении трех поколений. Рябинин и др. (1996) отметили нормализацию системы перикисного окисления липидов и антиоксидантной системы менее чем через год от начала разобочения отловленных нами на импактной территории животных при содержании их в виварии.

Обратимость симптомов поражения не может служить опровержением феномена радиоадаптации, она лишь показывает наличие эффектов актуальных доз облучения, но не опровергает существование значительного числа других, существенно более важных изменений в состоянии организма и популяции.

Таким образом, обзор почерпнутых из научной литературы аргументов против возможности генетической радиоадаптации млекопитающих не подтвердил их весомость. К сожалению, данные литературы о наличии радиоадаптации также недостаточно полны. В наших публикациях 1992–2002 гг. рассмотрены опорные положения в пользу радиоадаптации мелких млекопитающих, которые были выработаны на базе анализа литературы и собственных исследований. Материалом их были главным образом малая лесная мышь, полевая мышь и обыкновенная слепушонка, обитающие на ВУРСе на участках загрязнения почвы 500 и 1000 Ки/км<sup>2</sup> по стронцию-90, использованы также результаты, полученные ранее на других видах грызунов. Контролем служили животные, отловленные вблизи поселка Метлино (0,2 Ки/км<sup>2</sup>), из Кунашакского района Челябинской обл. (загрязнение менее 0,2 Ки/км<sup>2</sup>), из Ильменского Государственного заповедника (уровень загрязнения фоновый для Урала 0,04 Ки/км<sup>2</sup>). Геоботанические условия на импактных и контрольных участках близки. Пробы готовили принятыми в лаборатории методами. Радиометрию проводили на счетчике RFT 1 MHz-Zähler-VA-G-120.

Поглощенная доза на красный костный мозг рассчитана по методу, предложенному Е.А. Шишкиной (1998) на базе ЭПР-дозиметрических измерений, и дублирована общепринятыми методами (Моисеев, Иванов, 1990).

Показано поддержание численности популяционных группировок в импактной зоне на уровне прилежащих контрольных территорий на протяжении трех десятилетий наблюдения (Ильенко, Крапивко — Тарасов — Любашевский и сотрудники, Тарасов). Исключение составил летний сезон 2001 года, когда наблюдалось изменение видового состава выборки, но не общей плотности населения мелких млекопитающих на импактной и контрольной территориях.

Низкая миграционная активность регулярно наблюдалась в работах указанных авторов в течение всех сезонов исследования и составляла от 3-х до 12% мигрантов у разных видов в разные годы. Низкая миграционная активность считается признаком комфортности биотоков, высокая — их пессимальности (Лукьянов, 1997). Косвенным подтверждением низкой миграционной активности и слабого обмена особями контрольной и импактной территорий может служить тот факт, что резкое различие в их видовом составе, обнаруженное нами в 2001 году, не нивелировалось к концу сезона.

Низкая дисперсия (миграция) указывает на постоянство населения импактной зоны, т.е. на поддержание численности за счет размножения внутри радиогенной популяционной группировки, а не за счет мигрантов.

Действительно, показатели воспроизводства не нарушены (Ильенко, Крапивко, 1989; Тестов, Таскаев, 1999). В отдельных наблюдениях отмечено увеличение эмбриональной гибели, потенциальная плодовитость регулярно увеличена. Не произошло и не наблюдается катастрофической элиминации радиогенных популяций мелких млекопитающих, как предсказывали независимо друг от друга Л.В. Богатов и Л.Д. Материй в разных работах.

Обращают на себя внимание очень близкие гематологические и цитогенетические сдвиги, обнаруживаемые на загрязненных территориях, дозовые нагрузки на которых различаются в десятки-тысячи раз, например, на Тоцком полигоне, в эпицентре ВУРСа, в Беларуси.

В некоторых исследованиях (Гончарова, Рябоконь, 1998; Шевченко и др., 1993) применили добавочное облучение в умеренных дозах (1–3 Гр) и показали снижение цитогенетического эффекта у животных из импактных популяций.

Ряд гематологических показателей, находимых у животных из техногенной среды с поглощенной дозой 5–50 сГр, в лабораторных опытах при хроническом облучении изначально интактных животных возникают лишь при дозах выше 2000 сГр. Это хорошо согласуется с представлениями о наследуемости нарушений, индуцированных ионизирующим излучением в предыдущих поколениях.

Найдены достоверные различия между исследованными выборками по морфо-физиологическим индикаторам селезенки, почки, печени, что в определенной степени подтверждает их изолированность друг от друга.

Умеренным снижением иммунитета можно объяснить поддержание плодовитости за счет уменьшения внутриутробного иммунного контроля антигенной совместимости потомства, что приводит к увеличению отягощения генетическим грузом.

Существенный вклад в поддержку концепции радиоадаптации внесли исследования, выполненные коллегами по Институту с нашим участием в последние годы. В работе И.А. Васильевой с соавторами (в наст. сборнике) показано достоверное различие частот неметрических признаков черепа у мышей из импактной и контрольной популяционных группировок. Это может быть косвенно интерпретировано как подтверждение изолированности импактных группировок и как указание на определенную степень их генетической обособленности, а некоторые фены расцениваются как мелкие и крупные врожденные уродства, расширяя тем самым спектр радиогенных нарушений.

Чрезвычайный интерес представляют результаты исследования обыкновенной слепушонки из импактной зоны с загрязнением территории 1000 Ки/км по стронцию-90. У этих животных наблюдается увеличение массы тела, индексов сердца и печени, что косвенно указывает на активацию метаболизма, показатели системы кроветворения у них находятся в пределах контрольных значений.

Показатели естественной резистентности организма также близки к контрольным, нет свидетельств развития иммунодефицита. Не было найдено значимых изменений цитогенетических показателей по сравнению с контрольной выборкой. Общее состояние слепушонки на импактной территории следует признать удовлетворительным.

Сравнение лучевых доз и их эффектов приводит к заключениям, которые не могут быть объяснены без привлечения концепции радиоадаптации. У малой лесной мыши с участка загрязнения по стронцию-90 500 Ки/км<sup>2</sup>, с поглощенной дозой на костный мозг от 7 до 50 сГр в течение жизни (максимальная поглощенная доза у перезимовавших особей — 65 сГр), найдены существенные количественные и даже качественные нарушения гемопоэза, достоверные цитогенетические сдвиги, глубокие изменения системы иммунитета, метаболические нарушения, у полёвок из этого же района — повышенный уровень хромосомных aberrаций и мутации (Гилева и др., 1996). При этом у обыкновенной слепушонки, обитающей на участке с загрязнением по стронцию-90 1000 Ки/км<sup>2</sup>, с поглощенной дозой на костный мозг от 720 до 4300 сГр за жизнь и максимальной — 5000 сГр, отличающейся от контрольных животных по ряду показателей, — всё-таки ни одна из систем организма не может быть признана патологически измененной. Т.е. если грызуны из пятисоткюриной зоны радиоадаптированы, то радиоадаптация слепушонки из тысячекюриной зоны должна быть признана гораздо более полной и успешной. Главное различие между этими группами, имеющее решающее значение в развитии той или иной степени радиоадаптации — почти полное отсутствие миграционной активности у слепушонки при заметной (около 10% мигрантов в выборке) степени дисперсии у мышей и полевок.

В реконструкции событий радиоадаптации, которая представляется нам необходимой частью анализа, мы опирались на общую схему акклиматизации, разработанную С.С. Шварцем (1969). После радиационной аварии 1957 года, когда дозовые нагрузки в подстилке составляли десятки тысяч сГр, выжили и заселили загрязненные территории преадаптированные особи, значительно увеличился также приток мигрантов с «чистых» территорий. В течение первых десятков поколений резко возросла внутривидовая гетерогенность, обеспечившая материал для естественного отбора на адаптированность к малоподвижности и предпочтению прохладных и затененных местообитаний, обеспечивающих меньшие энергзатраты и меньшую радиопоражённость, а также на успешную репродукцию в условиях повышенного радиационного фона. Без ограничения миграционной активности не могло бы быть успеха в адаптации. Снижение иммунного контроля привело к увеличению продуктивности воспроизводства потомства, наследующего ряд совместимых с жизнью повреждений, однако в свою очередь адаптированного к радиоактивной среде. Это обеспечивает селективные преимущества аборигенов перед «чистыми» мигрантами, тем более, что вселившиеся на радиоактивную территорию неадаптированные особи, даже успешно обитая на ней, медленнее растут и значительно хуже размножаются (Бигон и др., 1989). У слепушонки в условиях высокой изоляции процесс радиоадаптации происходил значительно быстрее и с большей полнотой. К настоящему времени, очевидно, этап морфо-физиологической адаптации у неё завершен или почти завершен и мы наблюдаем тканевую уровень адаптации (Шварц, 1969), который должен быть зафиксирован на уровне ДНК. У активно мигрирующих видов процессы радиоадаптации задерживаются на этапе морфо-физиологических сдвигов именно вследствие постоянного притока генов неадаптированных животных.

Таким образом, в настоящее время радиоадаптация мелких млекопитающих, обитающих на интенсивно загрязнённой радионуклидами территориях ВУРСа, не может быть подвергнута сомнению. Среди многих недостаточно еще проясненных аспектов радиоадаптации млекопитающих важнейшим представляется нам вопрос о минимальных дозовых нагрузках, которые способны инициировать этот процесс, что имеет прямое отношение к проблеме экстраполяции данных от животных из радиоактивной среды к человеку.

Авторы приносят благодарность коллегам, участвовавшим в отлове животных и обсуждении материалов работы, в частности, с.н.с., к.б.н. Е.Б. Григоркиной, н.с., к.б.н. М.В. Чибиряку и н.с., к.б.н. Е.Ю. Захаровой.

Работа поддержана РФФИ (№№ 00-05-65066, 01-05-96445).

## ФЕНОГЕНЕТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОПУЛЯЦИЙ МАЛОЙ ЛЕСНОЙ МЫШИ (*APODEMUS URALENSIS* PALL.) В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА

И.А. Васильева\*, А.Г. Васильев\*, Н.М. Любашевский\*, М.В. Чибиряк\*, Е.Ю. Захарова\*, О.В. Тарасов\*\*

\* Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия; \*\* Восточно-Уральский государственный заповедник, ПО «Маяк», Озерск, Россия

Цель данной работы состояла в проведении сравнительного фенетического исследования поселений малой лесной мыши (*Apodemus uralensis* Pall.) в различных зонах Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) с разной степенью техногенного радиоактивного загрязнения для оценки вероятных отдаленных морфогенетических эффектов хронического облучения, выражающихся в проявлении характерных aberrаций и уродств в строении черепа животных.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнивали зверьков из загрязненных (импактных) и контрольных участков ВУРС. Исследования проводили в головной (южной) части следа в 2000–2001 гг., а также в его хвостовой (северной) части в 1992, 1993 и 2001 гг.

Импактные территории: ВУРС1 — участок в головной части ВУРС, расположенный в разреженном березовом лесу в 12 км к западу от пос. Метлино Каслинского района Челябинской области, с плотностью радиоактивного загрязнения по стронцию-90 400–540 Ки/км<sup>2</sup> (Тарасов, 2000); ВУРС2 — участок в северной части ВУРС в березово-осиновом лесу вблизи оз. Тыгиш в 4,5 км. от пос. Рыбниковское Каменского района Свердловской области с исходным уровнем загрязнения около 5 Ки/км<sup>2</sup> (Юшков и др., 1993).