

УДК [57+61]::539.1.04:599.323:591.525/526:591.044

## АДАПТИВНАЯ СТРАТЕГИЯ ПОПУЛЯЦИЙ ГРЫЗУНОВ ПРИ РАДИОАКТИВНОМ И ХИМИЧЕСКОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ СРЕДЫ

© 2010 г. Н. М. Любашевский<sup>1\*</sup>, В. И. Стариченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mental Activity IIAPS, Ashdod, Israel

<sup>2</sup> Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

Проведен сравнительный анализ демографических и морфофизиологических процессов у мышевидных грызунов из зон загрязнения ( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) и ( $\text{Cu} + \text{Cd} + \text{Pb} + \text{Zn} + \text{SO}_2$ ) в районе медеплавильного завода. Прямое (неопосредованное) поражение животных при облучении приводит к наследуемой адаптации (сохранение численности, повышение толерантности к поллютанту, снижение миграции и пр.). Опосредованное поражение при загрязнении металлами влияет на животных в результате деградации растительного покрова, сокращения кормовой базы, мест укрытия и размножения, на фоне снижения численности миграция возрастает. Таким образом, популяция реагирует на прямое поражение особей или на деградацию среды их обитания, т.е. неспецифически, вне зависимости от физико-химической природы поллютанта.

*Загрязнение среды, грызуны,  $^{90}\text{Sr}$ , Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), тяжелые металлы, медеплавильный комбинат.*

Механизмы приспособления сообществ животных и растений к изменениям внешней среды выработаны в течение миллионов лет эволюции в условиях сезонных и чрезвычайных природных катаклизмов (засухи, наводнения, пожары и т.д.), и потому неспецифичны. Следствием этого является утверждение о преобладании в экотоксикологической картине поражения популяций животных, обитающих в природной среде, общих черт при действии любых вредоносных факторов. Такой взгляд приводит к снижению интереса к многообразию поллютантов или к некритичному переносу закономерностей, полученных на полигонах, загрязненных радионуклидами, на иные экотоксикологические ситуации, например, в работе [1].

Цель данной работы – переоценка представлений о единообразии реакций популяций мелких млекопитающих (на примере грызунов) на хроническое воздействие различных поллютантов путем экологического анализа биологических эффектов, появляющихся при обитании животных на территориях, загрязненных радионуклидами или тяжелыми металлами и  $\text{SO}_2$ .

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В работе использованы собственные и литературные данные, полученные при исследовании популяций грызунов, обитающих на ВУРСе

( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ), в зоне Чернобыльской аварии ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ), вблизи алюминиевых заводов (F) Урала, Сибири и Таджикистана и в окрестностях медеплавильного завода ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{SO}_2$ ) на Среднем Урале [1–13].

В порядке убывания вклада результатов в научную информацию, полученную при их использовании, видовой состав грызунов на ВУРСе можно расположить в следующий ряд: малая лесная мышь (*Apodemus uralensis* Pall., 1778), слепушонка обыкновенная (*Ellobius talpinus* Pall., 1770), полевка обыкновенная (*Microtus arvalis* Pall., 1779), красная полевка (*Clethrionomys rutilus* Pall., 1779), мышь полевая (*Apodemus agrarius* Pall., 1771), полевка узкочерепная (*Microtus agrestis* L., 1761), полевка-экономка (*Microtus oeconomus* Pall., 1776), пашенная полевка (*Microtus agrestis* L., 1761), водяная полевка (*Arvicola terrestris* L., 1758) (всего  $n = 411$ ). Участки, на которых отлавливали грызунов, были сходны по биотопическим характеристикам и кормовой базе, но резко различались по плотности загрязнения  $^{90}\text{Sr}$ : 18.5 и 37 МБк/м<sup>2</sup> в основании следа, 74–370 кБк/м<sup>2</sup> – на его периферии, контрольные территории – 18.5–7.4 кБк/м<sup>2</sup> (рис. 1).

У пойманных зверьков измеряли массу и линейные размеры тела, рассчитывали относительную массу органов, определяли параметры репродуктивных органов, гематологические и цитогенетические показатели, иммунный статус (клеточный и гуморальный иммунитет, систему естественной резистентности). Методики исследования приведены в публикациях [4, 5, 18–20].

\* Адресат для корреспонденции: 77572 Ashdod, Israel, 8b/11 Shabassy Str., Institute of Mental Activity, Israeli Independent Academy for Progress of Sciences; Phone/Fax: (9728) 8540815; e-mail: nahum.nema@mail.ru.

Обратимость нарушений при разобщении с радиационным воздействием использована как тест на физиологическую адаптацию к облучению в онтогенезе.

Численность грызунов оценивали стандартными методами. Показателем миграционной активности служит доля мигрантов в популяции. Мигрантами считали животных, у которых удельная активность или концентрация токсикантов в скелете <10% или >1000%, чем средние значения в выборке, принимаемые за 100%. Этот критерий опирается на статистическое исследование принадлежности животных к данной выборке и был применен в работах [2, 4, 5]. Для тяжелых металлов миграция и обилие оседлой части населения оценена методом многосуточного вылова [3].

Основными дозообразующими радионуклидами на ВУРСе являются  $\beta$ -излучатели  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  и  $\beta$ - $\gamma$ -излучатель  $^{137}\text{Cs}$  (его удельная активность в почве на два порядка ниже, чем  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ). 90–95%  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  депонировано в костной ткани животных, поэтому мы подразумеваем под удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$  в скелете суммарную  $\beta$ -активность, обусловленную  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ .

Определение суммарной  $\beta$ -активности  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  в пробах костной ткани животных проводили на приборе “RFT 10 MHz – Zahler VAG-120” [21].

Мощность дозы внутреннего облучения на костный мозг рассчитывали по формуле [22]:  $DR = 7.0 C_{\text{Sr}}^{\text{кость}}$ , где  $DR$  – мощность дозы (мГр/сут);  $C_{\text{Sr}}^{\text{кость}}$  – удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в сырой кости (кБк/г).

Статистическая обработка данных выполнена с помощью пакета лицензионных программ Microsoft Excel 2002 и Statistica 6.0 (StatSoft Inc.).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

У грызунов, обитающих на территории ВУРСа, обнаружены множественные демографические и морфофизиологические отклонения от аналогичных показателей в выборках зверьков из контрольных популяций [2, 5, 10–13, 17–20, 23–29, 33]. Нет сомнения в том, что это последствия их полувеккового обитания в среде, загрязненной радионуклидами.

Индивидуальная поглощенная доза за год у разных видов из головной части ВУРСа: на участке “37000” – 2–4.9 Гр, “Бердениш” – 0.3–1.5 Гр, в контроле (пос. Метлино) –  $5.0 \times 10^{-4}$  Гр.

У малых лесных мышей, отловленных на участках, загрязненных радионуклидами, обнаружена более высокая относительная масса печени, почек и селезенки. Выявлено снижение количества эритроцитов и ретикулоцитов и признаки задержки созревания эритроидных клеток в кост-

ном мозге. Снижена доля сегментоядерных нейтрофилов и малых лимфоцитов, найдены атипичные формы белой крови, изменения миеограммы. Снижена доля Т-хелперов, регуляторный индекс (Т-хелперы/Т-цитотоксические) ниже 1.0, значимы и другие иммунологические сдвиги. Титр антител при антигенной стимуляции вакциной достоверно снижен. Явно преобладает комплекс умеренных нарушений иммунитета [5].

Регулярны свидетельства нестабильности генома (повышение частоты хромосомных aberrаций, анеуплоидии и полиплоидии, пробелов, микроядер [5, 13, 17–19, 23–26, 29, 33], изменение частот альтернативных неметрических признаков, флуктуирующей асимметрии [20, 28], нагрузочных реакций [2]. Те или иные нарушения найдены у всех грызунов – абorigенов ВУРСа.

Значительная часть отклонений от нормы обратима и оценена как физиологическая реакция организма. Пример – изменения антиоксидантного статуса и перекисного окисления липидов у обыкновенных полевок из наших выборок, отловленных на участке с плотностью загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  18.5 МБк/м<sup>2</sup> [10]. Через полгода пребывания зверьков в виварии указанные показатели стали соответствовать контрольным. Другой пример – постепенная нормализация высокого уровня хромосомных aberrаций у потомков (до F3) обыкновенной полевки, полученных в нашей виварии [26].

Ряд нарушений нельзя не расценить как выраженную наследуемую патологию. К ним относятся, в частности, появление самок – структурных мутантов 45, X0 [19]. Их кариотипы – индикаторы мутагенеза в предшествующих поколениях. Ряд случаев нарушения в строении костей черепа, обнаруженных у грызунов на различных участках, загрязненных радионуклидами, грубая патология, уродства [28]. Аномальные формы белой крови также относятся к патологии. Следует отметить относительно высокую частоту этих находок у зрелых жизнеспособных особей.

Близкий уровень изменения частот альтернативных неметрических признаков в течение многих лет в локальных популяциях грызунов на ВУРСе [28] и сходная гематологическая, цитогенетическая и фенетическая реакция на дозовые нагрузки, отличающиеся в десятки – тысячи раз в ряду поколений (ВУРС, Тоцк, Чернобыль, Семипалатинск), это свидетельства ведущей роли наследуемых нарушений (генетического груза). Изменение частот фенотипов у обыкновенной полевки и малой лесной мыши на участках с плотностью загрязнения 148 кБк/м<sup>2</sup> и 27750 кБк/м<sup>2</sup> сходное, однонаправленное [20]. Похожая закономерность найдена и у обыкновенных слепушонок, отловленных в головной части ВУРСа, в пойме р. Теча и на Тоцком полигоне при различии плотности

загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  до трех порядков величин [30]. Атипичные лимфоциты, лейкоциты и микроядра, обычные для грызунов, населяющих территорию ВУРСа и получающих дозу облучения 50–150 мГр [5, 18], в эксперименте с хроническим облучением проявляются при дозах около 86 000 мГр [31].

Многие рассмотренные особенности реакции популяций были и ранее отмечены на ВУРСе [2, 13, 23, 25, 29, 32] и расценены как признаки адаптации к радиоактивному фактору (повышенные по сравнению с контролем численность населения, плодовитость, уменьшение поглощения кислорода и т.д.). В работах [5, 12, 18, 20] приведены важнейшие дополнительные признаки радиоадаптации. К ним отнесена, в частности, повышенная толерантность к *хроническому облучению в загрязненной среде*. Мощности дозы хронического облучения, переносимые животными без ущерба для репродукции – до 10 мГр/сут, для жизнеспособности – до 100 мГр/сут [6, 11]. На ВУРСе в настоящее время облучение только обыкновенной полевки на участке с плотностью загрязнения 37 000 кБк/м<sup>2</sup> превышает толерантность для репродукции (13.4 мГр/сут). Но в 1969 г. дозы здесь превышали летальные 100 мГр/сут (для расчета доз использованы данные по депонированию  $^{90}\text{Sr}$  из [2]). Снижение численности и признаков угнетения жизнедеятельности животных в этой работе не отмечено. Дозы в Чернобыльской зоне в настоящее время у значительной части грызунов превышают толерантные по репродукции и у некоторых – по жизнеспособности [6, 11].

Следующее исключительное по значению свидетельство радиоадаптации – обнаружение в 37 000 кБк/м<sup>2</sup> зоне ВУРСА [18] колонии *совершенно адаптированной* (т.е. адаптация не сопровождается отклонениями от контрольных показателей) обыкновенной слепушонки. Следует указать на важную роль пониженной миграции в адаптации к токсичной, но богатой пищевыми ресурсами и укрытиями территории, как способствующее стабилизации населения и сохранению адаптированного генофонда. Так, слепушонка почти не мигрирует (поглощенная доза облучения за жизнь – более 1000 сГр). При этом ее радиостойчивость – одна из самых низких среди грызунов ( $\text{ЛД}_{50/30} = 5 \text{ Гр}$ ) [33]. У мышей и полевок ( $\text{ЛД}_{50/30} = 7\text{--}13 \text{ Гр}$ , поглощенная доза облучения около 100 сГр) – адаптация *несовершенная* (т.е. сопровождается описанными выше сдвигами, которые можно расценить как плату за адаптацию), вероятно, из-за того, что обмен генным материалом с неадаптированными животными с “чистых” территорий даже при пониженной миграции препятствует завершению адаптации.

Наличие животных с совершенной и несовершенной адаптацией к техногенному загрязнению

– это проявление общебиологической закономерности. Животные-аборигены обладают “тканевой” (т.е. без видимого напряжения физиологических функций) адаптацией к экстремальным условиям севера, к высокогорью [34]. Напротив, виды на краю ареала, пришлые, имеют множественные адаптивные сдвиги – массы тела, запасов питательных веществ, густоты шерстного покрова, частоты дыхания, кислородной емкости крови и т.д. Полагаем, что понятия “*совершенная и несовершенная адаптация*” [5, 12, 18] научно обоснованны и адекватно отображают описанные явления.

Ключевыми для оценки состояния популяционных группировок наземных подвижных видов являются взаимосвязанные вопросы о развитии у них радиоадаптации и о снижении их миграционной активности. Наличие именно этих процессов подвергается сомнению, например, в работах [17, 33, 35]. Этими авторами не найдены признаки генетического своеобразия облучаемых группировок и отягощения их генетическим грузом. Утверждается, что генетическая адаптация у наземных подвижных грызунов на ВУРСе *не может возникнуть*, поскольку конфигурация ВУРСа – узкая (6–7 км шириной) полоса, и грызуны легко пересекают ее, образуя в основном “проточное” население. Лишь кратковременно обитая в среде, загрязненной радионуклидами, они не успевают *генетически адаптироваться*. Наследуемая радиоадаптация осуществлена только у подземного малоподвижного вида – обыкновенной слепушонки.

Материалы, из которых вытекают эти выводы, интересны тем, что получены на животных тех же видов, отловленных в те же сезоны года, на тех же участках ВУРСа, что и в работах, обосновывающих закономерное развитие радиоадаптации у наземных мелких млекопитающих. Это предполагает наличие в данных работах *важных и новых* аргументов, способных изменить представление о судьбе грызунов на ВУРСе. Камень преткновения – доля мигрантов, которая в работах [2] и наших [4, 5, 8, 12, 18] оценена в 0–18%, у авторов указанных работ – более чем в 30% (для “проточного населения” можно подразумевать величину, близкую к 100% [3]). В популяциях грызунов на незагрязненной территории миграции на расстояние ширины ВУРСа действительно обычное событие: суточный ход у лесной мыши и у красной полевки – от сотен метров до 1.5 км [36, 37]. Хотя суточный ход не предполагает передвижения в одном направлении, но указывает на возможность перемещения на значительные расстояния.

О высокой миграционной способности лесной мыши на ВУРСе, по мнению авторов работы [17], могут свидетельствовать следующие материалы. У мышей с участков отлова “оз. Бердениш”

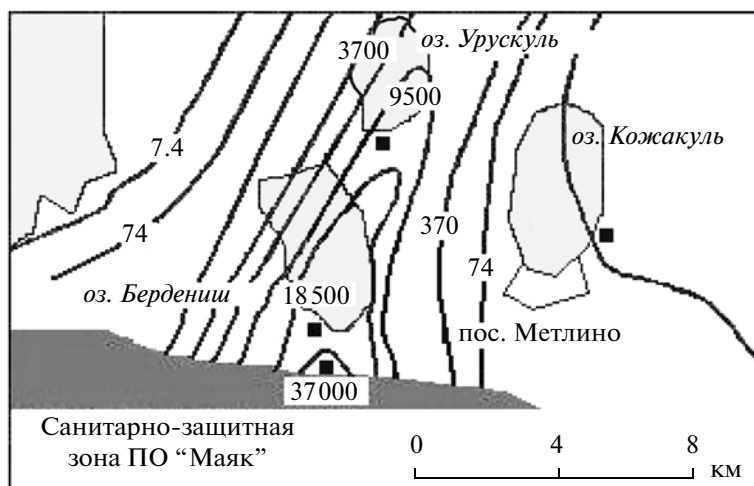


Рис. 1. Схема головной части ВУРСа, изолинии загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  – в  $\text{кБк}/\text{м}^2$  ( $1 \text{ кБк}/\text{м}^2 = 2.7 \times 10^{-2} \text{ Ки}/\text{км}^2$ ) [2, 5, 14–16]. ■ – площадки отлова мелких млекопитающих. Координаты участков отлова [17]: оз. Бердениш ( $55^\circ 46'$  с.ш.,  $60^\circ 53'$  в.д.); оз. Урускуль ( $55^\circ 49'$  с.ш.,  $60^\circ 55'$  в.д.); пос. Метлино ( $55^\circ 48'$  с.ш.,  $61^\circ 00'$  в.д.).

( $n = 11$ ) и “оз. Урускуль” ( $n = 7$ ) при различии плотности загрязнения почвы  $^{90}\text{Sr}$  в 7.3 раза ( $451 \text{ Ки}/\text{км}^2$  и  $62 \text{ Ки}/\text{км}^2$  соответственно) почти одинаковая удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в скелете ( $88.6$  и  $59 \text{ Бк}/\text{г}$ ). При этом отсутствуют различия в показателях хромосомной нестабильности (клетки с хромосомными aberrациями, анеуп- и полиплоидные, с пробелами). По мнению авторов, это – свидетельства высокой подвижности мышей. Всего *четыре* особи, у которых, несмотря на высокий уровень  $^{90}\text{Sr}$  в скелете, нет цитогенетических сдвигов, оценены как резиденты. У животных имеются выраженные индивидуальные различия в накоплении радионуклида. К мигрантам отнесены особи, депонировавшие  $^{90}\text{Sr}$  в 15–19 раз меньше, чем накопившие максимально; они составляют 20–30%. Среди животных с контрольной территории авторы определяют 18% мигрантов.

Однако если по координатам, указанным авторами [17], на схему ВУРСа нанести точки отлова (с помощью [16]), то как изолинии (мы сознаем, что изолинии – понятие условное, на самом деле плотность радиоактивного загрязнения мозаична и различается даже на небольшом расстоянии в десятки раз, как, например, в работе [11]), так и данные о локальном загрязнении (рис. 1) свидетельствуют о не более чем 2-кратных различиях в его интенсивности. По [14], на участках “Бердениш” и “Южный Урускуль” запас  $^{90}\text{Sr}$  оценен в  $9.7 \text{ МБк}/\text{м}^2$  и  $7.5 \text{ МБк}/\text{м}^2$  соответственно, т.е. различия отношений удельных активностей  $^{90}\text{Sr}$  в скелете мышей в 1.5 и в почве в 1.3–2 раза противоречат предположению об активном перемещении животных. Отсутствие различий в цитогенетических нарушениях при незначительной разнице в дозовой нагрузке также не подтверждает

позицию авторов. Наличие особей, у которых при высокой удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в скелете нет цитогенетических сдвигов, свидетельствует, что адаптивная компенсация нарушений выражена неравномерно, а также указывает на проявление радиоадаптации на клеточном уровне. Анализ индивидуальных данных, приведенных в работе графически, показывает, что только одна мышь из 18 (оз. Бердениш) депонировала менее 10% от среднего – 5.6% мигрантов. При этом на участке “оз. Урускуль”, где авторы предполагают “постоянное перемещение”, нами не найден ни один мигрант. На контрольном участке только одно животное отвечает критерию  $>1000\%$  от среднего ( $4.75 < 5.0$ , а  $6.58 > 5.0$ ) – т.е. 9.1% мигрантов.

Авторы считают, что значительные различия удельных активностей  $^{90}\text{Sr}$  в скелете животных являются свидетельством миграции. Однако известно, что даже в лабораторном эксперименте на линейных мышах в группах одновозрастных животных индивидуальные различия кинетики  $^{90}\text{Sr}$  и стабильного фтора могут достигать 2–8 раз [38]. В природной среде диапазон изменчивости гораздо шире. К тому же, если среди “чистых” животных встречаются особи с повышенной удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$ , можно предполагать: а) эти животные являются мигрантами с “грязной” территории и обитание на чистых кормах привело к выведению основной массы излучателя из их организма; б) это потомки “грязных” матерей, переселившихся на “чистую” территорию еще до их рождения, что представляется маловероятным (кроме того, известно, что при переводе беременных самок с природного рациона на виварный уже в первом помете наличие  $^{90}\text{Sr}$  радиометрическими методами не обнаруживают [2]); в) возможно, что индивидуальный участок грызуна

располагается на “пятне” с более высокой плотностью загрязнения, тогда и удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в его скелете будет выше, чем у соседей; г) также нельзя исключать и непродолжительное обитание “чистых” животных на сопредельной территории, загрязненной радионуклидами. Так, в лабораторном эксперименте на лесных мышах, отловленных на контрольной территории, показано, что при пероральном поступлении количеств  $^{90}\text{Sr}$ , сопоставимых с периферией и эпицентром ВУРСа, в костях животных уже через сутки фиксируется легко радиометрируемое количество  $^{90}\text{Sr}$  [39]. Интерпретация различий в аккумуляции  $^{90}\text{Sr}$  на “грязной” территории еще сложнее. Однако авторы не обсуждают ни одну из возможных причин возникновения индивидуальных различий. К тому же, как нам кажется, количественно оценивать миграцию по столь небольшому материалу не совсем корректно.

Рассмотренные материалы позволяют утверждать, что в указанных выше работах не приведены данные, свидетельствующие о роли конфигурации ВУРСа в “проточности населения” грызунов и, как следствие, о плохих условиях для их адаптации. Очевидно, что рассуждения авторов о перемещении животных с места на место по ВУРСу, за его пределы и обратно, не имеют серьезных обоснований.

Известно также [11], что в Чернобыльской зоне имеются резко различающиеся по депонированию  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  микрогруппировки грызунов, обитающие на близко расположенных (около 100 м) участках мозаичного загрязнения, что свидетельствует о малой подвижности животных, т.е. снижение миграционной активности грызунов в Чернобыле наблюдается при полном несхождении в конфигурации загрязнения с ВУРСом.

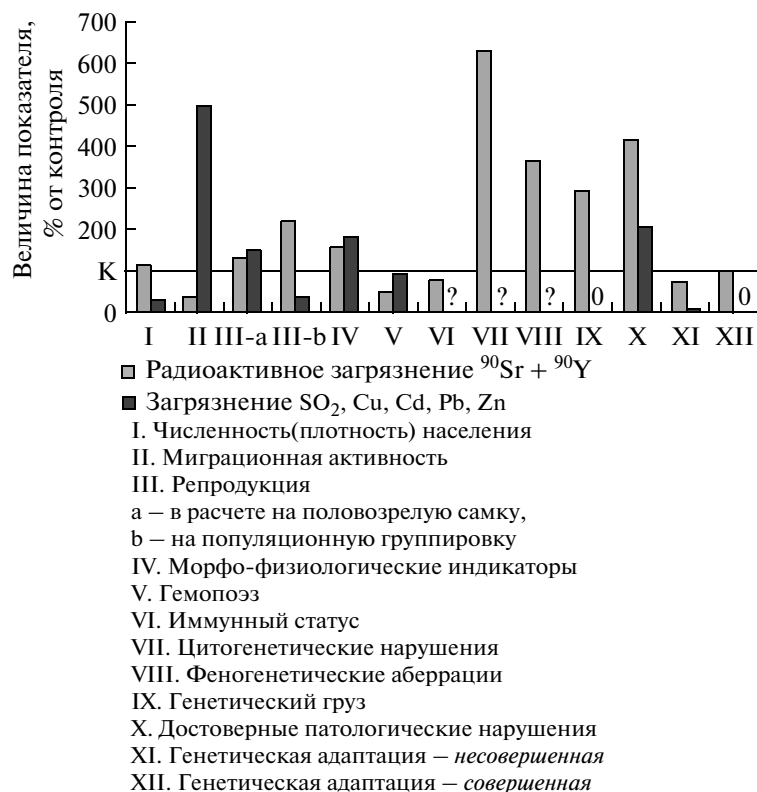
И еще. На карте ВУРСа с изолиниями (рис. 1) видно, насколько узки полосы относительно одинакового загрязнения. Но на них уже столетия практически рядом обитают грызуны, различающиеся по удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  [2, 5, 8, 24, 27].

Наконец, мы получили расчетные данные, подтверждающие относительную изоляцию облучаемых популяций грызунов ВУРСа. Использовано отношение удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в организме грызунов к плотности загрязнения почвенного покрова как показателя постоянства населения территории. Для плотности загрязнения почвы 37000 и 18500 кБк/м<sup>2</sup> оно равно в среднем 0.75, в контрольной выборке (7.4 кБк/м<sup>2</sup>) — 2.8. По данным работы [27], проведенной в 1986–1993 гг., это отношение на интенсивно загрязненных участках (37000, 18500 и 12210 кБк/м<sup>2</sup>) и в контроле — такого же порядка (0.5 и 3.1 соответственно). В то же время в буферной зоне (74–370 кБк/м<sup>2</sup>) оно равно 18.8, что в 25 раз превышает аналогичные показатели для территории ин-

тенсивного загрязнения. Этот феномен означает повышение удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в организме грызунов, населяющих данную зону. Он может обозначать реальную границу токсической зоны, на которой скапливаются радиоадаптированные животные-радиофоры. Попытаемся предложить пару спекулятивных объяснений. Действительно, доля грызунов-пришельцев из более загрязненных зон составляет здесь 31% (при 2% в интенсивно загрязненных зонах и 1.5% — в контроле) [8]. Можно предположить некоторые механизмы “изоляции токсичностью” островного типа, например, поведенческую базу ограничения миграции радиоадаптированных, отягощенных генетическим грузом, со сниженной мобильностью животных с ВУРСа на “чистую” территорию, где селективное преимущество “чистых” соперников представляется предрешенным. Возможно также, что это участок с особо благоприятными для грызунов условиями обитания, чему, однако, противоречат одинаковые на протяжении сотен метров геоботанические условия. Мы считаем, что этот факт в любом случае интересен и к тому же легко доступен для проверки.

Определенная аналогия “изоляции токсичностью” наблюдается на морском дне в зоне воздействия “черных и белых курильщиков” (горы с жерлом на вершине диаметром около метра, через которые из недр океанической коры непрерывно изливается горячий раствор). Здесь формируются новые биоценозы, богатые новыми формами и видами [40]. Они отграничены от окружающего водного пространства токсичной и теплой средой вокруг “курильщиков”, существующих тысячелетия.

Аргументом для отрицания генетической радиоадаптации и увеличения генетического груза в работе [35] служат данные по отсутствию особенностей аллозимной структуры популяций с ВУРСа, принципиально выделяющей их из ряда других популяций Урала. Автор указывает на такие же результаты с другим маркером (мтДНК) на грызунах в Чернобыле. Ранее при пересадке кожи от мышей из зоны ВУРСа к контрольным и, наоборот (по примеру [34]), нам не удалось установить различий, которые свидетельствовали бы о возрастании изоляции популяций, т.е. этот, казалось бы, неудачный опыт показал то же, что позже — ферментативные маркеры. Наличие генетического груза, конечно, не связано непосредственно с феноменом радиоадаптации. Однако его широкая распространенность в популяции — достоверное свидетельство воздействия токсичного поллютанта в ряду поколений. Именно такого рода воздействие является необходимым условием развития наследуемой адаптации [2, 12, 18, 23–25, 32]. Результатам анализа генетических маркеров следует дать другую интерпретацию. Наследуемая адаптация как на уровне организма,



**Рис. 2.** Диаграмма популяционных процессов и морфофизиологических сдвигов у грызунов на ВУРСе [2, 5, 8, 12, 18–20, 26–28] и вблизи медеплавильного завода, Средний Урал [1, 3, 7, 9]: К – контроль; ? – нет данных; 0 – нет признаков явления.

так и на популяционном уровне, по современным воззрениям [28], – это результат эпигенетических процессов. Следовательно, неудачность попыток выявить рутинными генетическими маркерами признаки адаптации закономерна. Они неинформативны, поскольку эпигенетические процессы обеспечиваются особыми механизмами, например, механизмами альтернативного сплайсинга. Направленный синтез измененных белков приводит к адаптивным сдвигам. Дефектное функционирование других белков может быть молекулярной базой генетического груза.

Таким образом, совокупность рассмотренных материалов не дает основания считать опровергнутым представление о развитии у всех видов мелких млекопитающих, обитающих на территориях, загрязненных радионуклидами (ВУРС, Чернобыль), наследуемой радиоадаптации.

Обобщенные в ряде работ [1, 3, 7, 9] результаты наблюдений за грызунами в районе, загрязненном выбросами медеплавильного комбината на Среднем Урале, создают достаточно ясную картину состояния природной среды, особенностей демографии популяций и поражения грызунов ряда видов родов *Apodemus*, *Clethrionomys* и *Microtus*. Максимальные концентрации поллютантов в ра-

ционе превышали фоновые: Cu – до 16 раз, Pb – до 11, Cd – до 4.3, Zn – до 2.4 раз. Узловые пункты сопоставления этих данных с эффектами хронического радиационного воздействия показаны на рис. 2. Представляется, что у грызунов с ВУРСа все рассматриваемые показатели в той или иной мере связаны с радиоадаптацией. Так, репродукция (в расчете на популяционную группировку) на ВУРСе обеспечивает ее воспроизводство. В зоне действия медеплавильного завода (далее – Су 3-д) – на порядок меньше рожающих самок и выше отход молодняка. На ВУРСе резко повышена частота патологии как проявление генетического груза; Су 3-д – повышена смертность в раннем возрасте в результате комплексного воздействия неблагоприятной среды и техногенных токсикантов.

Выраженные различия биологических эффектов у грызунов при действии тяжелых металлов по сравнению с эффектами хронического облучения ионизирующей радиации хорошо объясняются различиями их воздействия на биогеоценозы. Так, растительный покров участков отлова грызунов на ВУРСе сохраняет тот же видовой состав и проективное покрытие, что и в контроле, т.е. кормовая база и места укрытий грызунов не страдают

и действие поллютантов может быть расценено как преимущественно *прямое*. Напротив, растительный покров в районе медеплавильного комбината подвергается выраженной деградации, зависящей от степени загрязнения (удаления от завода); популяции грызунов в значительной мере утратили кормовую базу; количество мест, представляющих укрытие, тоже сократилось (сохранившиеся годные для жизни, иногда и для размножения небольшие участки правомерно называть станциями переживания); действие поллютантов в данном случае расценивается как преимущественно *опосредованное*.

В зоне *прямого* действия на ВУРСе у грызунов развивается популяционно-генетическая адаптация, снижение миграционной активности и формирование импактной условно изолированной группировки с плотностью населения, сравнимой с контролем. Численность поддерживается главным образом за счет повышенной репродукции. И как цена адаптации в ряду поколений — генетический груз, проявляющийся множественными патологическими признаками (совместимыми с жизнеспособностью и репродукцией). В зоне *опосредованного* действия тяжелых металлов миграционные потоки возрастают пропорционально градиенту концентрации поллютантов (60–100% при 20–40% в контроле), формируется проточное население, концентрирующееся в станциях переживания, количество которых сокращается. Количество оседлых животных и общая плотность населения сокращаются, в онтогенезе вселившихся особей развивается физиологическая адаптация не столько к токсическим факторам, сколько к измененной под их влиянием природной среде. Масса тела снижена, высокая смертность в раннем возрасте, население восполняется за счет мигрантов. Нет признаков, характеризующих наследственную адаптацию популяций к измененной среде при дозовых нагрузках, превышающих толерантные. В частности, поддержание высокой, близкой к контролю, численности главным образом за счет интенсификации воспроизводства и снижения миграции, но не за счет увеличения миграции с “чистых” территорий. Конечно, формирование временных группировок в деградированных биогеоценозах — это также проявление адаптивной экспансии вида. Оказалось, что временные поселения в загрязненной зоне более успешны у полевой мыши и обыкновенной полевки, частично заменяющие рыжую полевку (*Clethrionomys glareolus* Schreber, 1780) и исчезающую красно-серую полевку (*Clethrionomys rufocanus* Sundervall, 1846–1847) [3]. Но формирование оседлого населения из генетически адаптированных особей — качественно другой способ освоения территории видом, т.е. адаптивной стратегии.

Наиболее контрастно рассмотренные воздействия различаются по трем пунктам, которые могут служить *критериями* прямого или опосредованного влияния поллютантов: сохранение (повышение) *численности* или ее сокращение при дозовых нагрузках, превышающих толерантные; *интенсивность миграции*, снижающаяся в первом случае и резко увеличивающаяся во втором; отягощенность генетическим грузом, проявляющаяся *множественной патологией* (при несовершенной адаптации). Указанные критерии могут быть полезны в оценке других поллютантов. При поражении фтором грызунов, обитающих в биоценозах, загрязненных выбросами алюминиевых заводов, найдены изменения, близкие к описанным на территориях, загрязненных радионуклидами [4], т.е. фтор — поллютант прямого действия. Опосредованно влияет на грызунов загрязнение нефтью, механическое разрушение почвенно-растительного покрова. Возможен сочетанный эффект.

Описанная картина демографических и морфофизиологических различий состояния популяционных группировок грызунов, обитающих в среде, загрязненной радионуклидами или тяжелыми металлами с сернистым ангидридом, представляет принципиальный интерес. Она противоречит унификации всех поллютантов на основании того, что их воздействие на грызунов неспецифично. Неспецифичность, т.е. независимость действия различных поллютантов от их химической и физической природы, не связана с особенностями реактивности животных на измененном уровне. Неспецифичность воздействия заключается в различной, выработанной и закрепленной в эволюции защитной популяционной реакции грызунов. Различная *адаптивная стратегия* к загрязнению осуществляется в ответ на *прямое* поражение особей или в ответ на нарушение *среды* их обитания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бездель В.С. Экологическая токсикология: популяционный и биоценологический аспекты. Екатеринбург: Гошицкий, 2006. 280 с.
2. Ильенко А.И., Крапивко Т.П. Экология животных в радиационном биогеоценозе. М.: Наука, 1989. 224 с.
3. Лукьянов О.А., Лукьянова Л.Е. // Зоол. журн. 2002. Т. 81. № 9. С. 1107–1134.
4. Любашевский Н.М., Токарь В.И., Шербаков С.В. Техногенное загрязнение окружающей среды фтором (экологические и медико-социальные аспекты). Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 237 с.
5. Любашевский Н.М., Пашина И.А., Тарасов О.В. // ВУРС-45: Регион. науч.-практ. конф., Озёрск Челябин. обл., 26–27 сент. 2002 г.: Тр. и матер. Озёрск: ИЦ ВРБ, 2002. С. 167–187.

6. Маклюк Ю.А., Гащак С.П., Максименко А.М. и др. // Ядерная физика та энергетика. 2007. № 3 (21). С. 81–91.
7. Садыков О.Ф., Бененсон И.Е. Динамика численности мелких млекопитающих: концепции, гипотезы, модели. М.: Наука, 1992. 191 с.
8. Стариченко В.И. // Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды: Матер. II регион. науч. конф., 2–5 дек. 2002 г. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2002. С. 41–48.
9. Тарахтий Э.А., Мухачева С.В. // Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды. Матер. II Междунар. науч.-практ. конф., 8–11 октября 2008 г. Т. 1. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2008. С. 241–245.
10. Устинова А.А. Процессы перекисного окисления липидов в условиях хронического действия малых доз радиации: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа: Башкир. гос. мед. ун-т, 1999. 20 с.
11. Chesser R.K., Sugg D.W., Lomakin M.D. et al. // Environ. Toxicol. Chem. 2000. V. 19. № 2. P. 305–312.
12. Lyubashevskiy N. // Scientific Researches in the Field of the Control and Diagnostics. Arad: Publ. IASA, 2006. P. 83–89.
13. Lyubashevsky N., Bolshakov V., Gileva E. et al. // Radiation Research 1895–1995: Congr. Proc.: Proc. of the Tenth Intern. Congr. of Radiation research, Würzburg, Germany, Aug. 27–Sept. 1, 1995. V. 1. Würzburg, 1995. P. 30–27 (426).
14. 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. 204 с.
15. Смагин А.И. Экология водоемов зоны техногенной радиационной аномалии на Южном Урале: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пермь: Госуниверситет, 2008. 50 с.
16. Google Earth Free 5.0.11337 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.softportal.com/software-3943-google-earth-free.html>.
17. Григоркина Е.Б., Ялковская Л.Э., Тарасов О.В. // БИОРАД-2009. Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Матер. Междунар. конф., Сыктывкар, 28 сент.–1 окт. 2009 г. Сыктывкар, 2009. С. 394–396.
18. Любашевский Н.М., Стариченко В.И., Гилёва Э.А. и др. // Экологические проблемы горных территорий: Международный год гор на Среднем Урале. Екатеринбург: Академкнига, 2002. С. 244–249.
19. Гилёва Э.А., Любашевский Н.М., Стариченко В.И. и др. // Генетика. 1996. Т. 32. № 1. С. 114–119.
20. Васильева И.А., Васильев А.Г., Любашевский Н.М. и др. // Экология. 2003. № 6. С. 445–453.
21. Стариченко В.И., Любашевский Н.М. // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38. Вып. 3. С. 375–383.
22. Шишкина Е.А., Любашевский Н.М. // Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды: Матер. II Междунар. науч.-практ. конф., 8–11 октября 2008 г. Т. 1. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2008. С. 25–30.
23. Дубинин Н.П., Шевченко В.А., Алексеенок А.Я. и др. // Успехи современной генетики. Вып. 4. М.: Наука, 1972. С. 170–205.
24. Ильенко А.И., Крапивко Т.П., Мажейките Р.Б., Смирнова О.В. // Проблемы и задачи радиоэкологии животных. М.: Наука, 1980. С. 97–120.
25. Шевченко В.А., Абрамов В.И., Печуренков В.Л. // Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. М.: Наука, 1993. С. 258–303.
26. Гилева Э.А., Нохрин Д.Ю., Стариченко В.И. // Генетика. 2000. Т. 36. № 5. С. 714–717.
27. Тарасов О.В. Радиоэкология наземных позвоночных головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Озёрск: ЦЗЛ-ОНИС ПО “Маяк”, 2000. 16 с.
28. Васильев А.Г. Эпигенетические основы фенетики: на пути к популяционной мерономии. Екатеринбург: Академкнига, 2005. 640 с.
29. Алексахин Р.М. Проблемы радиоэкологии: Эволюция идей. Итоги. М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2006. 880 с.
30. Синева Н.В. Популяционная структура и внутривидовая изменчивость обыкновенной слепушонки (*Ellobius talpinus* Pall.) на южном Урале и в Приуралье: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург: ИЭРЖ УрО РАН, 2007. 22 с.
31. Шибкова Д.З., Андреева О.Г., Шведов В.Л., Аклеев А.В. // Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин / Под ред. А.В. Трапезникова и С.М. Вовка. Вып. 3. Заречный, 2000. С. 234–277.
32. Раушенбах Ю.О., Монастырский О.А. // Влияние ионизирующих излучений на наследственность. М.: Наука, 1966. С. 165–176.
33. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В., Тарасов О.В. и др. // XXXVI Радиоэкологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Ключковскому, Обнинск, 28 нояб. 2007 г. / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Россельхозакадемия, 2008. С. 87–109.
34. Шварц С.С. Эволюционная экология животных. Свердловск, 1969. 200 с.
35. Модоров М.В. Эколого-генетические особенности *Apodemus uralensis* из зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург: ИЭРЖ УрО РАН, 2009. 18 с.
36. Карулин Б.Е., Никитина Н.А., Хляп Л.А. и др. // Зоол. журн. 1976. Т. LV. Вып. 1. С. 112–121.
37. Большаков В.Н., Баженов А.В. Радионуклидные методы мечения в популяционной экологии млекопитающих. М.: Наука, 1988. 156 с.



38. *Стариченко В.И.* Индивидуальные особенности кинетики остеотропных веществ: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Челябинск: ЧГПУ, 2007. 50 с.
39. *Стариченко В.И.* // БИОРАД-2006. Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Междунар. конф., Сыктывкар, 28 февр.–3 марта 2006 г. Сыктывкар, 2006. С. 29–30.
40. *Короновский Н.В.* // Соросов. образоват. журн. 1999. № 10. С. 55–62.
- Поступила в редакцию  
15.12.2009

## The Adaptive Strategy of Rodents Populations at Radioactive and Chemical Environmental Pollution

N. M. Lyubashevskiy<sup>1</sup>, V.I. Starichenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Mental Activity, Israel Independent Academy for Progress of Sciences, Ashdod, 77572 Israel; e-mail: nahum.nema@mail.ru*

<sup>2</sup>*Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, Ural Division, Ekaterinburg, Russia*

The comparative analysis of demographic, morphological and physiological processes in mouselike rodents in pollution zones (<sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y, <sup>137</sup>Cs) on East-Ural radioactive track (EURT) and (Cu + Cd + Pb + Zn + SO<sub>2</sub>) on a site near copper-smelting factory is carried out. The direct (not mediated) defeat of animals by an irradiation leads to inherited adaptation (density preservation, tolerance increase to pollution, migration decrease and so forth). The mediated defeat of animals at pollution by metals influences animals as a result of degradation of a vegetative cover, reducing a forage reserve, shelters and reproduction places. Population is decreasing, migration is increasing. Hence, population reacts onto direct defeat of animals or on inhabitancy locuses degradation, id est unspecifically, without dependence from the physical and chemical nature of pollution.