

Биологические последствия радиоактивного загрязнения для мышевидных грызунов в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС

© 2016. **А. И. Таскаев**¹, к.б.н., директор, **Л. Д. Материй**¹, к.б.н., с.н.с.,
А. Г. Кудяшева¹, д.б.н., зав. лабораторией, **О. В. Ермакова**¹, д.б.н., в.н.с.,
Л. А. Башлыкова¹, к.б.н., с.н.с., **Н. Г. Загорская**¹, н.с.,
Л. Н. Шишкина², д.х.н., профессор, зав. лабораторией,
¹Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,
²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,
119334, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4,
e-mail: kud@ib.komisc.ru

Проведены мониторинговые исследования влияния радиоактивного загрязнения в 30-километровой зоне аварии на Чернобыльской АЭС на организм мышевидных грызунов разных видов в течение 1986–1993 гг. и 2007 г. с использованием экологических, радиохимических, морфофизиологических, гематологических, гистоморфологических, цитогенетических, биохимических и биофизических методов. Прослежены этапы формирования и развития изменений в основных системах организма и изучены процессы их регуляции у нескольких поколений мышевидных грызунов, обитающих в аварийной зоне ЧАЭС. Несмотря на их внешнее благополучие, обнаружены многочисленные структурные, морфологические, биохимические, биофизические, цитогенетические изменения в клетках и тканях обследованных зверьков. Нарушение корреляционных взаимосвязей между различными показателями позволяет сделать вывод о качественных изменениях состояния популяций мышевидных грызунов в результате длительного обитания на радиоактивно загрязнённых территориях. Нарушения в системе регуляции перекисного окисления липидов и дезинтеграция энергетического обмена, процессов кроветворения, дисбаланс органов эндокринной системы, цитогенетические нарушения в половых и соматических клетках могут являться следствием срыва стабилизирующих механизмов либо ускоренного истощения резервных возможностей исследуемых систем.

Ключевые слова: мониторинг, 30-километровая зона, авария на Чернобыльской АЭС, мышевидные грызуны, биологические последствия.

Biological consequences of radioactive contamination for rodents in the exclusion zone of the Chernobyl NPP

A. I. Taskaev¹, **L. D. Materiy**¹, **A. G. Kudyasheva**¹,
O. V. Ermakova¹, **L. A. Baschlikova**¹, **N. G. Zagorskaya**¹, **L. N. Shishkina**²,
¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28 Kommunisticheskaya st., 167982, Syktyvkar, Russia,
²N. M. Emanuel Science Institute of Biochemical Physics RAS,
4 Kosygin st., 119334, Moscow,
e-mail: kud@ib.komisc.ru

Monitoring of the radioactive contamination effects on the organism of different species of rodents was carried out in a 30-km zone of the Chernobyl accident in 1986–1993 and 2007 using ecological, radiochemical, morphophysiological, hematological, histomorphological, cytogenetic, biochemical and biophysical methods. The stages of forming and developing changes in the major systems of the organism were observed and the regulation processes in several generations of rodents inhabiting in the Chernobyl accident zone were studied. Despite the external well-being numerous structural, morphological, biochemical, biophysical, cytogenetic changes in cells and tissues of animals were found. Disturbances in correlation between different indices allow us to conclude that qualitative changes in the state of the rodent populations took place as a result of their inhabiting the radioactively contaminated areas for a long time. Disturbances in the lipid peroxidation regulatory system and disruption of energy exchange, blood formation

processes, imbalance in the organs of the endocrine system, cytogenetic disturbances in germinal and somatic cells should be the result of the failure in stabilizing mechanisms or the accelerated exhaustion of the reserve capabilities of the systems under investigation.

Keywords: monitoring, 30-km zone, the Chernobyl accident, mouse-like rodents, biological consequences.

26 апреля 2016 г. исполнилось тридцать лет со дня катастрофы на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС). Она стала самой крупной в истории атомной энергетики и сопоставима лишь с катастрофой на АЭС «Фукусима-1» в Японии в марте 2011 г. Весь мир вспоминает сегодня одну из самых страшных техногенных катастроф XX века, ставшей трагической вехой в истории Советского Союза и затронувшей жизни миллионов людей. Она изменила судьбы более 600 тысяч людей – ликвидаторов последствий катастрофы. Безусловно, через 30 лет после аварии наш взгляд на чернобыльские события значительно отличается от того, что был в первые дни и месяцы, но и сегодня с уверенностью можно сказать, что ни одного равнодушного к чернобыльской трагедии не было.

Многолетний опыт радиоэкологических исследований в экстремальных условиях позволил сотрудникам отдела радиоэкологии и отдела лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН одним из первых среди академических учреждений по поручению правительственной комиссии приступить к цитогенетическому обследованию лиц, подвергавшихся облучению после аварии, для определения индивидуальных поглощённых доз. Сотрудники Института биологии Коми НЦ УрО РАН под руководством и личным участии директора института Анатолия Ивановича Таскаева проводили комплексные научные исследования в 30-километровой зоне отчуждения ЧАЭС по 13 разделам общеакадемической темы «Влияние радиоактивного загрязнения на флору и фауну», научным руководителем которой был академик В. Е. Соколов. За 1986–1992 гг. в район аварии выезжали 25 экспедиционных отрядов, отработавших в общей сложности 4862 человеко-дня. Главный итог деятельности участников этих экспедиций и научных исследований – это спасение жизни людей и оздоровление радиационной обстановки в зоне отчуждения ЧАЭС. По итогам этих работ сделаны научные прогнозы, подготовлены и опубликованы девять монографий, шесть сборников, девять научных сообщений (препринтов) и более 160 статей в отечественных и международных изданиях, в которых раскрыты для всего научного сообщества уроки Чернобыля.

Авария на Чернобыльской АЭС выявила целый ряд сложных малоизученных в радиоэкологии проблем, среди которых – прогнозирование ранних и отдалённых последствий существования популяций животных в условиях длительного воздействия радиации с низкой мощностью дозы и возможности их адаптации к техногенному радиоактивному загрязнению среды обитания. Более десяти лет после аварии усилиями коллективов сотрудников нескольких Институты АН СССР было проведено комплексное изучение влияния радиоактивного загрязнения на биоту. Основная цель развёрнутых радиоэкологических исследований в 30-километровой зоне аварии на ЧАЭС заключалась в определении степени тяжести биологических последствий для отдельных представителей биоты в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения. В качестве тест-объектов для анализа последствий радиоактивного загрязнения среды обитания нами были выбраны мышевидные грызуны как наиболее тесно контактирующие с почвенным и растительным покровом. Исследования проводили в первый период с 1986 по 1993 г. и спустя 21 год в 2007 г. в 30-километровой зоне аварии на ЧАЭС на семи биотопах, отличающихся разным уровнем радиоактивного загрязнения. Для сравнения были использованы данные по мышевидным грызунам, отловленным также на фоновых территориях в окрестностях г. Киева в 1991–1993 гг. Были изучены грызуны пяти видов: полёвка-экономка (*Microtus oeconomus* Pall.), полевая мышь (*Apodemus agrarius* Pall), европейская рыжая полёвка (*Clethrionomys glareolus* Schreb.), обыкновенная полёвка (*Microtus arvalis* Pall.), желтогорлая мышь (*Apodemus flavicollis* Melchior) общей численностью – более 4000 животных. Оценка состояния популяций и организма грызунов была проведена с использованием экологических, радиохимических, морфофизиологических, гематологических, гистоморфологических, цитогенетических, биохимических и биофизических методов [1–3]. Сопоставление доз облучения грызунов, обитающих в зоне аварии в 1986–1988 гг., указывает на постепенное снижение вклада в суммарную поглощённую дозу внешнего β- и γ-излучения на фоне уве-

личения дозы от инкорпорированных радионуклидов [1].

Результаты и обсуждение

У грызунов из аварийной зоны установлены существенные изменения популяционных характеристик и морфофизиологических параметров. В 1986–1989 гг. обнаружено нарушение закономерной смены фаз популяционного цикла, что проявилось в длительной задержке популяций полёвки-экономки на стадии низкой численности, обусловленной повышенной смертностью более радиочувствительных особей грызунов в первый момент после аварии в связи с резким ростом радиационного фона в местах их обитания (рис. 1). Такие популяции животных приобретают черты, характерные для краевых популяций, находящихся в пессимальных условиях, что было особенно характерно для полёвки-экономки. В разные фазы численности возрастная структура черномыльских полёвок сильно варьирует: в фазе пика численности меньше доля неполовозрелых полёвок, а в фазе подъёма численности когорта половозрелых перезимовавших зверьков, наоборот, уменьшается, что приводит к изменению радиочувствительности популяции и может в дальнейшем сказаться на структуре популяции [4].

Проведённые ранее мониторинговые исследования популяций мелких грызунов, обитающих на территориях с повышенным уровнем естественной радиоактивности (Республика Коми), выявили сложный комплекс морфофизиологических нарушений и измене-

ние реактивного состояния различных систем, организма и популяций [5]. Гистоморфологический анализ органов и тканей жизненно важных систем (эндокринной, кроветворной) и печени на разных этапах онтогенеза мышевидных грызунов из аварийной зоны свидетельствуют о наличии заметных морфологических отклонений от нормы в изученных тканях [3]. Гистоморфологические исследования органов эндокринной системы показали, что одним из характерных изменений в коре надпочечников полёвок с радиоактивных участков из зоны аварии явилось её значительное расширение, причем гипертрофия коры происходила за счёт увеличения размеров пучковой зоны, вырабатывающей гормоны глюкокортикоидного типа и прослеживалась у полёвок в течение пяти лет (у 10–15 поколений) после аварии. Обнаружены также различные дистрофические и деструктивные процессы в исследуемых органах (рис. 2). Выявленные нами изменения надпочечников полёвок-экономок, обитающих в зонах с повышенной радиоактивностью, во многом сходны с таковыми у старых животных, а также у животных, подвергающихся экстремальным воздействиям.

Реакция щитовидной железы полёвок на хроническое облучение была далеко не однозначна, но общие закономерности морфологических изменений, отмеченные для надпочечника, оказались присущи и щитовидной железе: эффективность радиоактивного загрязнения была тесно связана с функциональной активностью органа, выраженность изменений в значительной степени зависела

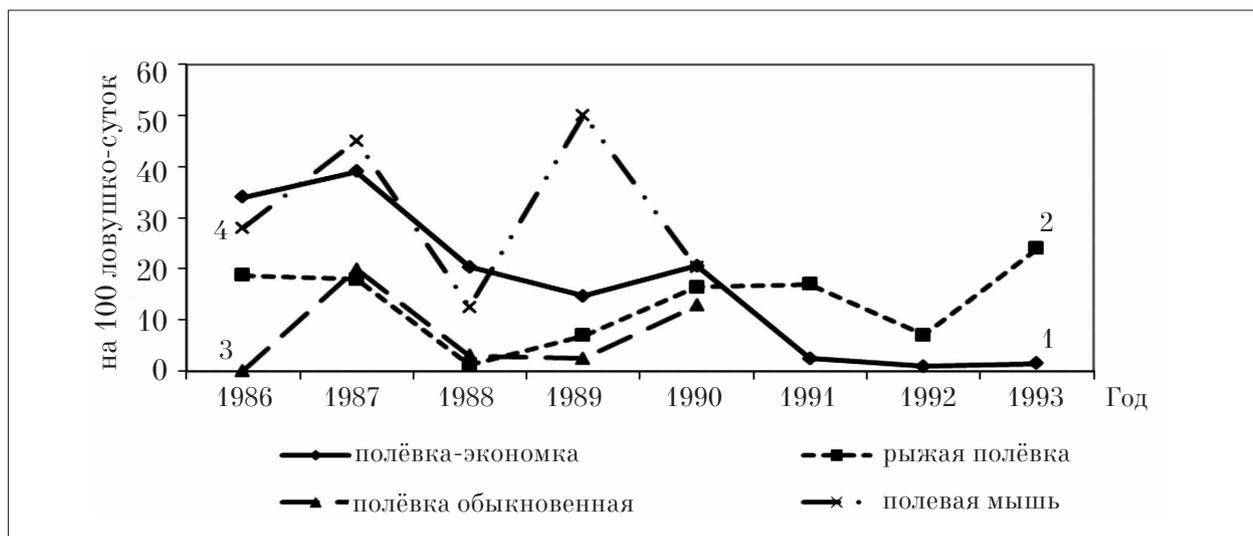


Рис. 1. Динамика общей относительной численности мышевидных грызунов (на 100 ловушко-суток) в 30-километровой зоне ЧАЭС.

Примечание: 1 – полёвка-экономка, 2 – рыжая полёвка, 3 – полёвка обыкновенная, 4 – полевая мышь.

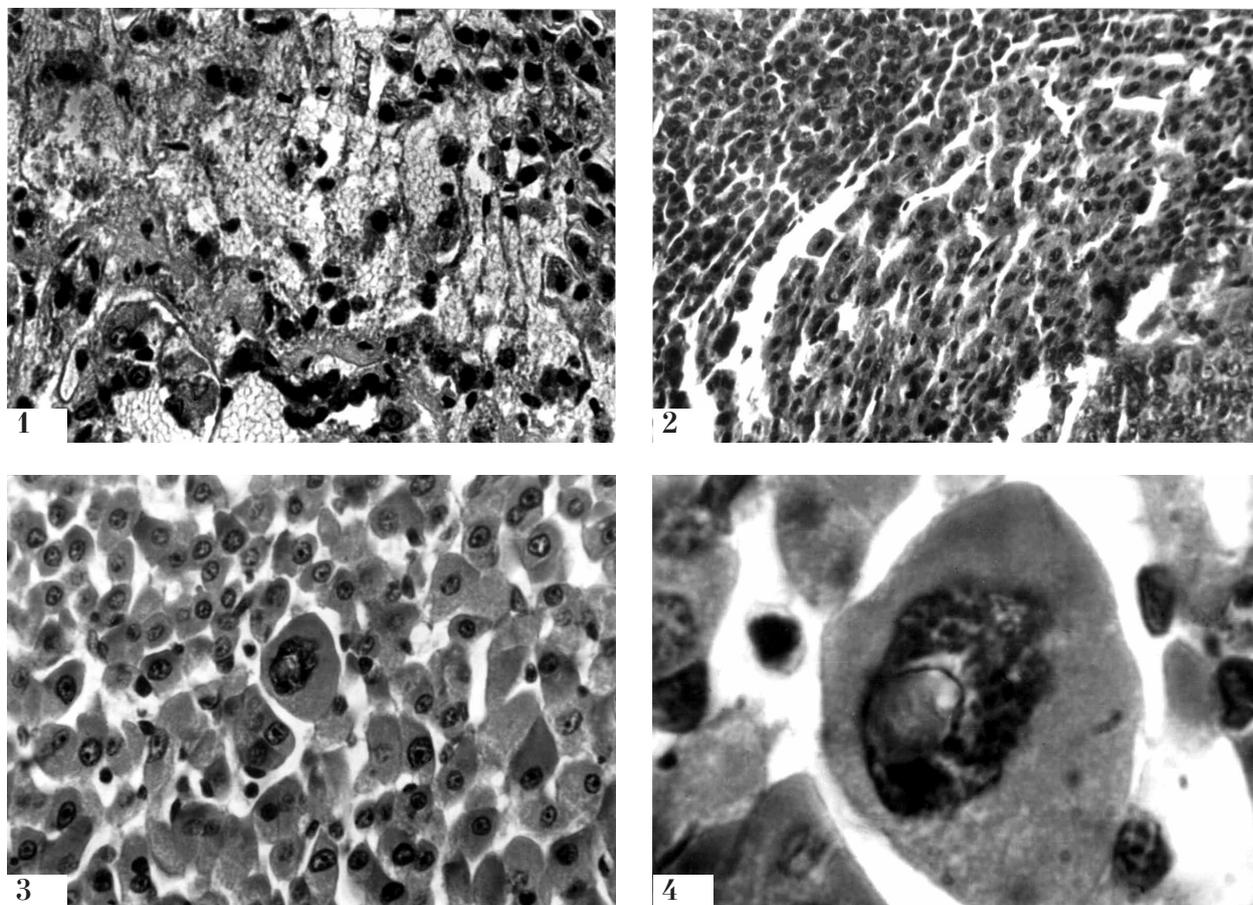


Рис. 2. Надпочечник половозрелой полёвки-экономки из 30-километровой зоны ЧАЭС.
 Примечание: 1 – васкуляризация паренхимы; гематоксилин-эозин; об.х 12,5, ок.х16. 2 – очаговая гиперплазия клеток коры; гематоксилин-эозин; об.х 12,5, ок.х16. 3 – гипертрофия клеток пучковой зоны коры, гигантская клетка, вакуолизация ядра; гематоксилин-эозин; об.х 12,5, ок.х16. 4 – деталь; гематоксилин-эозин; об.х 100, ок.х16.

от пола, возраста зверьков и времени, прошедшего после аварии. В щитовидной железе наблюдали дистрофические процессы (вакуолизация цитоплазмы), стаз эритроцитов (расширение сосудов), появление дегенирирующих фолликулов. В первые годы после аварии отмечали микрофолликулярную структуру железы, в последующие годы (1988–1991 гг.) – высокую степень гетерогенности фолликулов. Наиболее общим признаком морфологических изменений щитовидной железы и надпочечников у полёвок из аварийной зоны является сочетание признаков альтерации и проявлений реакций компенсаторно-приспособительного характера (рис. 3) [6].

Хроническое функциональное напряжение коры надпочечников сопровождалось деструктивными и дистрофическими процессами в железистой ткани, проявлением разных типов анемий и морфологических признаков снижения естественного иммунитета, обильным выходом в периферическую кровь юных и бластных форм красного и белого

ростков, качественными изменениями клеточного состава кроветворной ткани, появлением мегалобластов. Все эти изменения можно квалифицировать как начальные признаки возможного развития необратимой патологии. Морфологические исследования эндокринной и кровеносной систем позволяют отметить, что сдвиги в этих системах обусловлены не только деструктивными, но и активно протекающими компенсаторно-восстановительными процессами. Деструктивные изменения проявлялись в виде сосудистых расстройств, дистрофических нарушений клеток, локальной их гибели, переходящей в ряде случаев в очаги некроза тканей. При этом выявлено появление атипичных клеточных форм, воспалительных инфильтратов, признаков преждевременного старения тканей и т. д. Параллельно протекающие компенсаторно-восстановительные процессы (активизация физиологической и репаративной регенерации тканей, развитие гиперплазии и гипертрофии клеток), с одной стороны, направлены на поддержание

клеточного и функционального гомеостаза исследуемых систем, а с другой – создают напряжённое, неустойчивое их состояние, ведущее к дезорганизации всей системы. На таком напряжённом фоне чаще, чем обычно, случаются срывы, нарушение баланса, формируются необратимые патологические процессы. В системе кроветворения компенсаторные процессы проявляются в высоком количестве кариоцитов, усилении пролиферативной активности клеточных пулов костного мозга. Особый интерес вызывает синхронное нарастание в системе крови таких клеточных форм, как микролимфоциты, плазматические клетки, моноциты и мегакарициты. Это свидетельствует о напряжении защитных механизмов органа путём вовлечения системы

крови в иммунный ответ на действие повреждающего фактора [3]. В эндокринной системе компенсаторно-восстановительные процессы выражаются в гиперплазии и гипертрофии на клеточном («добавочная» кора надпочечников и пролиферация фолликулярного эпителия щитовидной железы) и внутриклеточном уровнях. Например, в структуре ядра тироцитов развиваются изменения, свидетельствующие, с одной стороны, о снижении интенсивности белкового синтеза (гиперхроматизация, появление внутриядерных включений), с другой стороны – о компенсаторных процессах, направленных на поддержание функции ядра (увеличение объёма ядер, площади ядерных мембран). Однако необходимо подчеркнуть, что взаимообусловленный напряжённый

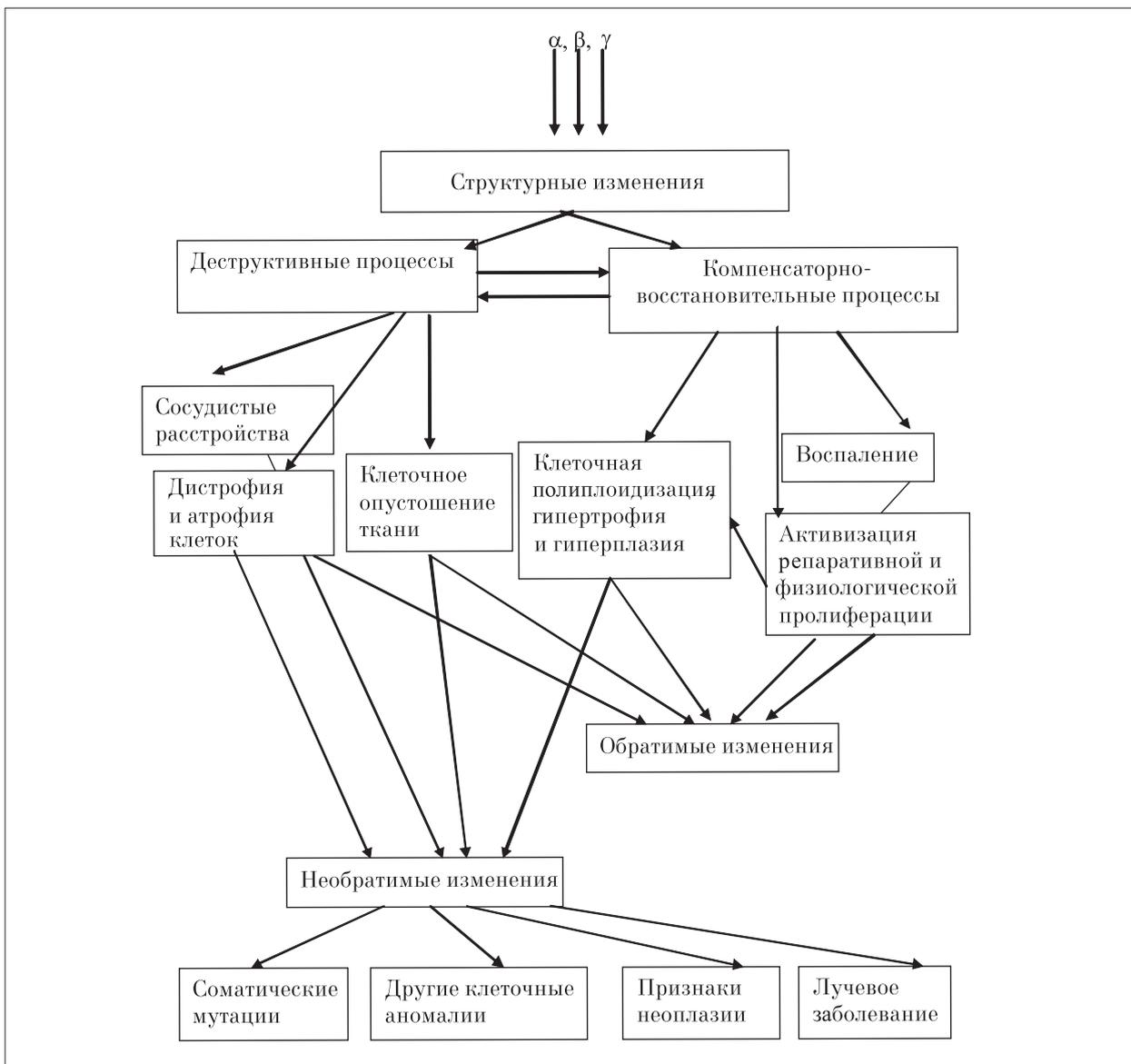


Рис. 3. Схема структурных морфологических изменений в ткани надпочечника и щитовидной железы у мышевидных грызунов из районов с радиоактивным загрязнением

режим функционирования важнейших систем жизнеобеспечения, ярко выраженный у полёвок из 30-километровой зоны аварии, можно рассматривать лишь как положительную приспособительную реакцию организма, направленную на структурную и функциональную нормализацию исследуемых тканей. Выявленные морфологические сдвиги нельзя считать показателями истинной физиологической адаптации организма к сложившимся радиоэкологическим условиям среды обитания полёвок [3, 6].

Цитогенетические исследования мышевидных грызунов в первые годы после аварии обнаружили повышенную частоту аномальных головок спермиев. В течение трёх-пяти лет после аварии частота клеток костного мозга с микроядрами была на порядок выше спонтанного уровня. Радиоактивное загрязнение в зоне аварии привело к повышению частоты хромосомных aberrаций, при этом значительные изменения отмечены на участках со средним уровнем загрязнения, особенно в костном мозге полёвки-экономки, для которой Южное Полесье является краевой зоной ареала [7]. Тем не менее у более резистентных полевых мышей и через 21 год после аварии сохраняется повышенный уровень цитогенетических повреждений на участках с сильным и средним уровнем радиоактивного загрязнения (табл. 1).

Одним из универсальных процессов, протекающих во всех клетках и типах мембран и играющих важную роль в регуляции клеточного метаболизма в норме и при действии различных повреждающих факторов, является перекисное окисление липидов (ПОЛ), обуславливающее функциональную активность ферментов цикла Кребса и гликолиза в том числе. Одним из важных параметров системы регуляции ПОЛ является величина

антиокислительной активности (АОА) липидов, характеризующая их обеспеченность антиоксидантами. По уменьшению величин АОА липидов органов зверьков одного возраста, отловленных на контрольных территориях, органы грызунов располагаются в следующей последовательности: печень > головной мозг > селезёнка; а исследуемые виды образуют ряд: желтогорлые мыши > рыжие полёвки > обыкновенные полёвки > полевые мыши > полёвки-экономки. В зависимости от года отлова изменяется только масштаб различий АОА липидов печени у мышевидных грызунов разных видов [1, 8]. Однако в органах грызунов, отловленных в зоне отчуждения ЧАЭС, обнаружена сложная картина нарушений в системе регуляции процессов ПОЛ и энергетического обмена, сохраняющиеся в течение длительного времени после аварии и имеющих радиационную природу [1, 4, 8, 9]. Выявлены фазные изменения уровня АОА липидов печени, селезёнки и головного мозга, однако времена наступления экстремумов значений АОА зависят от вида животных, исследуемого органа, времени анализа после аварии, участка их отлова и в ряде случаев от возраста и пола зверьков. Следует отметить значительную обеднённость липидов органов антиоксидантами в первые годы после аварии у наиболее радиочувствительного вида (полёвки-экономки), независимо от уровня внешнего γ -фона на участках отлова (рис. 4). У остальных исследуемых видов грызунов в первый год анализа отмечен довольно высокий уровень АОА липидов печени и головного мозга, независимо от возраста зверьков и участка обитания, что, возможно, является защитной реакцией. Это обуславливает изменение последовательности расположения органов грызунов из зоны отчуждения по уменьшению АОА липидов их органов [8].

Таблица 1

Частота микроядер в клетках костного мозга полевых мышей, обитающих на участках с различным уровнем радиоактивного загрязнения в 30-километровой зоне аварии на ЧАЭС в 2007 г.

Участки	Мощность внешнего γ -фона на участках (мкР/ч)	Число животных	Содержание радионуклидов в тушке мышей (Бк/г)		Частота микроядер, %
			^{137}Cs	^{90}Sr	
Разъезжа	16	14	0,37-4,4	0,001-1,86	6,79±0,72
Стечанка	15	15	0,14-8,16	0,05-1,3	9,13±0,77*
Изумрудный	120-140	24	0,30-82,3	0,76-13,3	15,79±0,81*
Янов	300-800	18	8,03-758	5,61-198	16,22±0,93*
Копачи	1180-1750	14	5,53-180	1,42-147	9,21±0,79*
Шепеличи	2100-2300	10	1,13-1513	0,182-3,56	10,4±1,0*

Примечание: * – достоверность различий от условного контроля (Разъезжа) при $p < 0,05$.

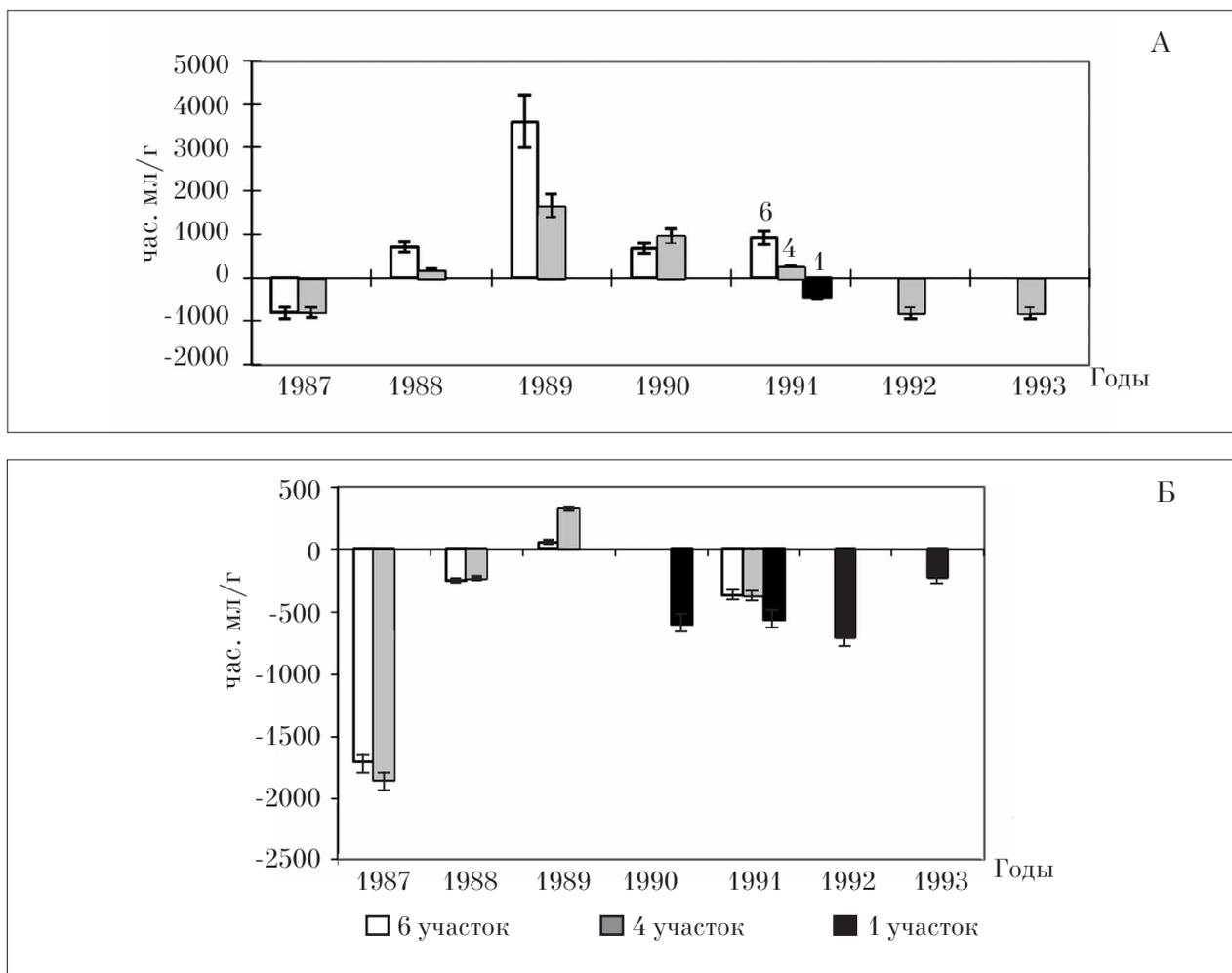


Рис. 4. Динамика антиокислительной активности липидов в печени (А) и головном мозге (Б) полёвок-экономок из зоны отчуждения ЧАЭС в 1987–1991 гг.

Примечание: 1 – сильнозагрязнённый, 4 – среднезагрязнённый, 6 – слабозагрязнённый участки.

В тканях диких грызунов из зоны отчуждения ЧАЭС найдены значительные изменения в содержании фосфолипидов (ФЛ) в составе общих липидов, а также в количественном соотношении отдельных фракций ФЛ и обобщённых показателей липидного обмена, наиболее выраженные в первые годы после аварии и сохраняющиеся длительное время, что указывает на структурные нарушения в мембранной системе органов [8]. Спустя 21 год после аварии в составе ФЛ печени полевых мышей, отловленных на участках со слабым и средним уровнем радиоактивного загрязнения, происходит некоторая стабилизация относительного содержания основных фракций фосфолипидов (рис. 5). Однако полной нормализации состава ФЛ по многим показателям у обследованных групп грызунов в указанные сроки не обнаружено, о чём свидетельствуют нарушения коррелятивных связей между обобщёнными показателями липидного обмена в печени полевых мышей [9].

Безусловно, столь существенные изменения параметров системы регуляции ПОЛ способствуют возникновению и функциональных нарушений в тканях этих животных. Динамика изменений и характер сдвигов активности ферментов энергетического обмена (сукцинат-, пируват- и лактатдегидрогеназ) в исследуемых тканях (печень, сердечная мышца, головной мозг) мышевидных грызунов из зоны аварии в период 1987–1990 гг. свидетельствуют о значительном снижении активности ферментов в 1988 и 1989 гг. (фазы депрессии и незначительного подъёма численности животных). Сохранение существенных изменений АОА липидов, состава ФЛ и активности ферментов цикла Кребса и гликолиза в тканях диких грызунов, отловленных в зоне аварии, приводит к нарушению коррелятивных связей между антиоксидантным статусом липидов и активностью дегидрогеназ, отмеченных у полёвок через 1–4 года после аварии (табл. 2) [1].

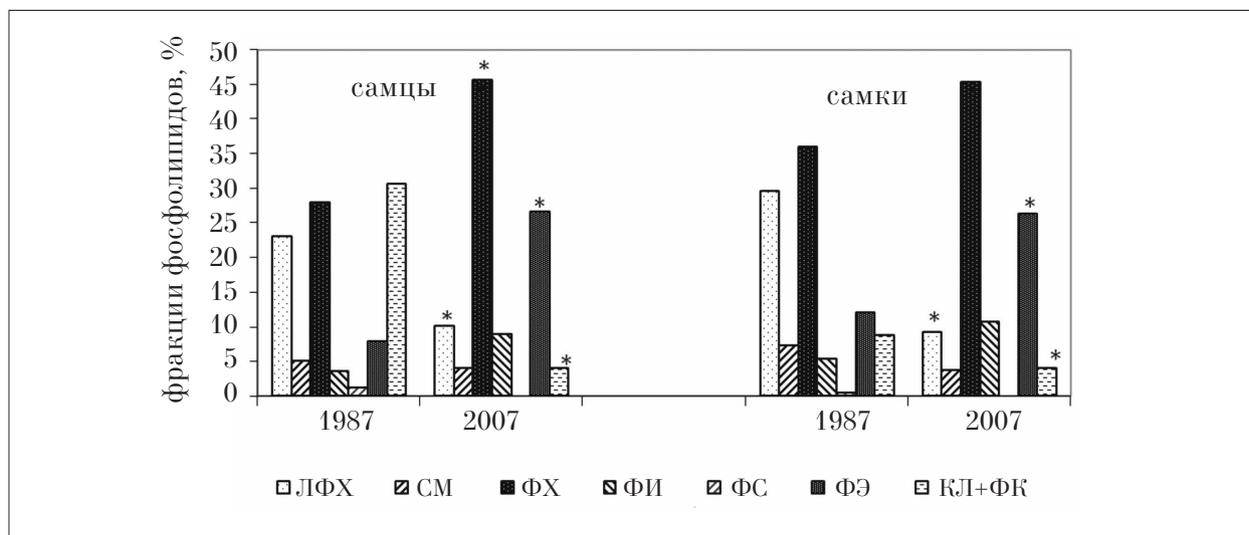


Рис. 5. Состав фосфолипидов в печени неполовозрелых полевых мышей (самцы, самки) со слабозагрязнённого участка 6 в первый год и спустя 21 год после аварии на ЧАЭС.
 Примечания: фракции фосфолипидов – ЛФХ – лизофосфатидилхолин, СМ – сфингомиелин, ФХ – фосфатидилхолин, ФИ – фосфатидилинозит, ФС – фосфатидилсерин, ФЭ – фосфатидилэтанолламин, КЛ+ФК – кардиолипин + фосфатидная кислота; * – достоверные различия по сравнению с 1987 г. при $p \leq 0,05$.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между активностью ферментов дегидрирования и показателями перекисного окисления липидов в печени полёвок-экономок из зоны аварии на ЧАЭС

Сравниваемые показатели	Осень 1987 г.		Весна 1988 г.		Осень 1988 г.		Осень 1989 г.		Осень 1990 г.	
	№ 6	№ 4	№ 6	№ 4	№ 6	№ 4	№ 6	№ 4	№ 6	№ 4
АОА-СДГ	0,53 0,93*	0,58* -0,49	-0,04	-0,18	0,03	0,08 -0,61* -0,19	0,29	1,0*	0,31 0,28	0,22
АОА-ПДГ	0,70* 1,0* -0,82	0,52 -0,05	-0,13	-0,12	0,14	0,02 -0,39 0,39	0,33	1,0*	0,52	0,76*
АОА-ЛДГ	-0,46 1,0*	1,0* 0,61* 0,21	-0,35	-0,14	0,04	0,10 -0,43 0,02	-0,25	1,0*	-0,35	-0,08
АПА-СДГ	0,73* 1,0* -0,93*	0,11 -0,48 0,46	-0,35	0,32	-0,12	0,02 0,61* 0,30	0,29	1,0*	0,12	-0,19
АПА-ПДГ	-0,53 1,0* -0,82*	0,41 -0,31 -0,45	0,06	0,07	-0,31	-0,09 0,95* 0,41	0,33	1,0*	0,36	-0,66*
АПА-ЛДГ	0,68* 1,0	0,08 -0,52	-0,22	0,18	-0,26	-0,06 0,43	-0,25	1,0*	-0,29	0,07
СТО-СДГ	0,63* 1,0* 0,93*	1,0* 0,98* -0,49	-0,04	-0,18	0,22	0,09 -0,61* 0,33	0,29	1,0*	0,25	0,20
СТО-ПДГ	0,70* 1,0* -0,82*	1,0* 0,91* -0,05	-0,13	-0,12	0,43	0,19 -0,39 -0,40	0,33	1,0*	0,50	0,68*
СТО-ЛДГ	-0,55* 1,0*	0,90* 0,21	-0,35	-0,14	0,14	0,16 -0,43 0,02	-0,25	1,0*	-0,15	-0,07

Примечание: №№ 4, 6 – номера участков, сокращения: АОА – антиокислительная активность, СДГ – сукцинатдегидрогеназа, ПДГ – пируватдегидрогеназа, ЛДГ – лактатдегидрогеназа, АПА – антипероксидная активность, СТО – способность тормозить окисление; * – высокая коррелятивная связь между сравниваемыми показателями.

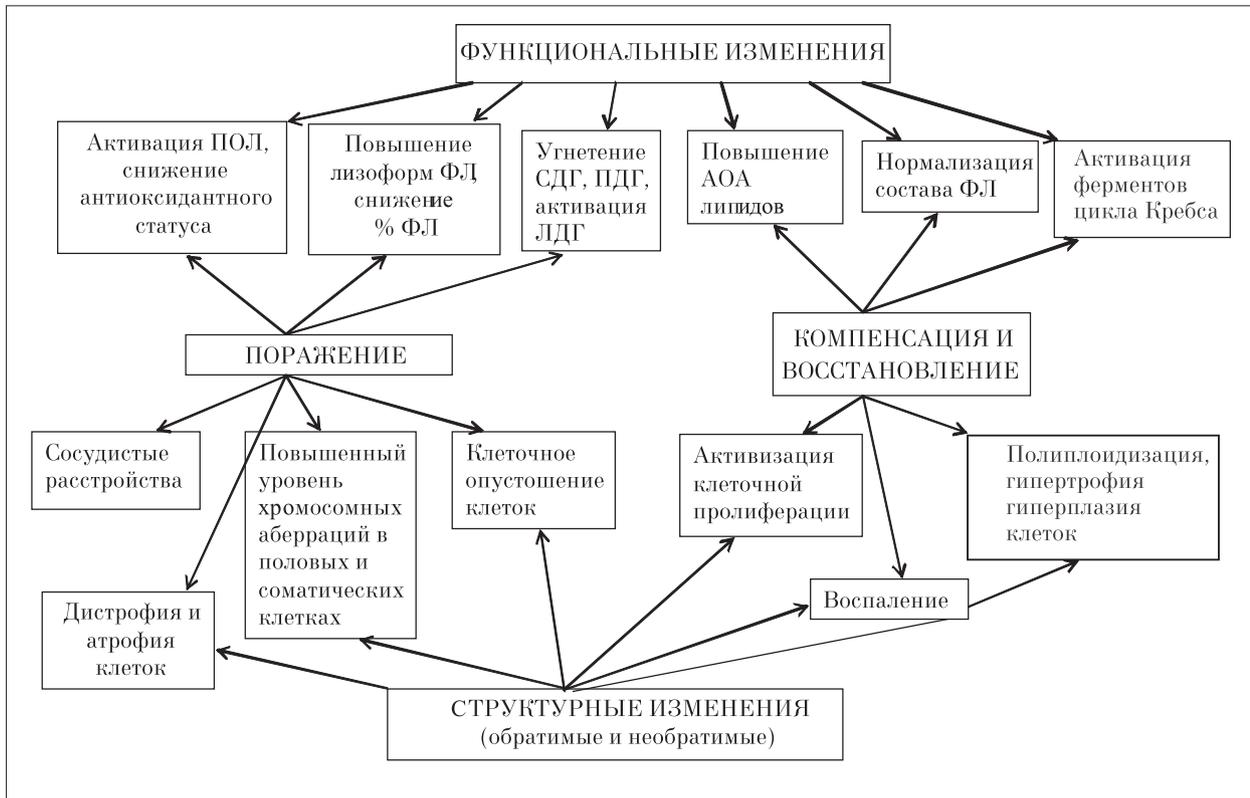


Рис. 6. Схема функциональных и структурных изменений в клетках тканей животных из зоны отчуждения ЧАЭС, обусловленные процессами поражения и восстановления

Совокупность полученных данных свидетельствует о дисбалансе клеточных систем регуляции в организме и позволяет предположить, что процесс адаптации мышевидных грызунов к резко изменившимся радиоэкологическим условиям среды их обитания обусловлен переходом систем регуляции ПОЛ и энергетических процессов на новый уровень функционирования [9]. Комплексные многолетние исследования позволили проследить основные этапы формирования и развития изменений в основных системах организма и процессы их регуляции у нескольких поколений мышевидных грызунов, обитающих в аварийной зоне ЧАЭС. Следует отметить, что были обследованы животные, которые в какой-то степени прошли своеобразный фильтр естественного отбора и представляли собой наиболее жизнеспособных особей в условиях непрекращающегося воздействия радиационного фактора. Тем не менее у обследованных зверьков, несмотря на их внешнее благополучие, были обнаружены многочисленные и многообразные структурные, морфологические, биохимические, биофизические, цитогенетические изменения в клетках и тканях, характеризующие про-

исходящие как процессы поражения, так и восстановления (рис. 6), что позволяет сделать вывод о качественных изменениях состояния самих популяций мышевидных грызунов в результате длительного обитания на территориях с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения.

Это подтверждается и наблюдающейся в течение 1986–1993 г. и 2007 г. в 30-километровой зоне аварии на ЧАЭС сменой наиболее распространенных видов мышевидных грызунов (исчезновение полёвки-экономки и повсеместное распространение более резистентных полевых и желтогорлых мышей), возрастанием изменчивости исследуемых параметров, ростом гетерогенности ответных реакций, наблюдаемых на клеточном и тканевом уровнях. Необходимо подчеркнуть, что в условиях радиоактивного загрязнения среды обитания глубина нарушений липидного обмена, обеспеченности тканей энергией, морфологические изменения в тканях и генетические последствия для природных популяций грызунов оказались значительно больше, чем в лабораторных экспериментах с хроническим внешним γ -облучением животных. Это свидетельствует о необходимости как учёта

действия всего комплекса факторов среды, так и осторожного подхода при экстраполяции результатов, полученных в экспериментальных условиях, для прогнозирования биологических последствий воздействия техногенного загрязнения биоты. Возникающие патологические процессы (нарушения в системе регуляции ПОЛ и дезинтеграция энергетического обмена, процессов кроветворения, дисбаланс органов эндокринной системы, цитогенетические нарушения в половых и соматических клетках) могут являться следствием срыва стабилизирующих механизмов либо ускоренного истощения резервных возможностей исследуемых систем.

Работа частично выполнена при поддержке программы Президиума УрО РАН (№ 15-4-4-20).

Литература

1. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Загорская Н.Г., Таскаев А.И. Биохимические механизмы радиационного поражения природных популяций мышевидных грызунов. СПб.: Наука, 1997. 156 с.
2. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Шевченко О.Г., Башлыкова Л.А., Загорская Н.Г. Биологические эффекты радиоактивного загрязнения в популяциях мышевидных грызунов. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 214 с.
3. Материй Л.Д., Ермакова О.В., Таскаев А.И. Морфофункциональная оценка состояния организма мелких млекопитающих в радиоэкологических исследованиях (на примере полёвки-экономки). Сыктывкар, 2003. 164 с.
4. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Шевченко О.Г., Башлыкова Л.А., Загорская Н.Г. Мониторинг популяций полёвок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall), обитающих в условиях повышенного радиационного фона // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 3. С. 262–268.
5. Маслова К.И., Материй Л.Д., Ермакова О.В., Таскаев А.И. Атлас патоморфологических изменений у полёвок-экономок из очагов локального радиоактивного загрязнения. СПб.: Наука, 1994. 192 с.
6. Ermakova O.V. Comparative morphological analysis of peripheral endocrine glands of small mammals inhabiting areas with high levels of radioactivity and exposed to chronic irradiation in model experiments // Biophysics. 2011. Т. 56. № 1. P. 135–139.
7. Таскаев А.И., Башлыкова Л.А., Зайнуллин В.Г. Эколого-генетический мониторинг мышевидных грызунов из популяций, подвергшихся хроническому облучению // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50. № 5. С. 560–571.
8. Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Zagorskaya N.G., Taskaev A.I. Biochemical consequences of radioactive contamination in the exclusion zone of the Chernobyl accident in populations of wild rodent / 20 years after the Chernobyl accident:

past, present and future / Eds. E.B. Burlakova and V.I. Naidich. Nova Science Publishers: New York, 2006. P. 303–329.

9. Shishkina L.N., Kudyasheva A.G., Zagorskaya N.G., Shevchenko O.G., Taskaev A.I. Participation of the lipid peroxidation processes in mechanism of the wild rodent adaptation to radioactive contamination of the Chernobyl NPP zone / The lessons of Chernobyl: 25 years later / Eds. E.B. Burlakova and V.I. Naidich. Nova Science Publishers: New York, 2012. P. 187–208.

References

1. Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Zagorskaya N.G., Taskaev A.I. Biochemical Mechanisms of Radiation Damage in the Natural Populations of Rodents. SPb.: Nauka, 1997. 156 p. (in Russian).
2. Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Shevchenko O.G., Bashlykova L.A., Zagorskaya N.G. Biological Effects of Radioactive Contamination in Populations of Rodents. Ekaterinburg: UrO RAN, 2004. 214 p. (in Russian).
3. Materiy L.D., Ermakova O.V., Taskaev A.I. Morphofunctional Assessment of the State of Organisms of Small Mammals in Radioecological Research (by the example of root vole). Syktyvkar, 2003. 164 p. (in Russian).
4. Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Shevchenko O.G., Bashlykova L.A., Zagorskaya N.G. Monitoring of populations of tundra vole (*Microtus oeconomus* Pall.) inhabiting the areas with the increased radiation background // Radiats. biologiya. Radioecologiya. 2004. Т. 44. № 3. P. 262–268 (in Russian).
5. Maslova K.I., Materiy L.D., Ermakova O.V., Taskaev A.I. Atlas of pathomorphological changes in voles from the areas of local radioactive contamination. SPb.: Nauka, 1994. 192 p. (in Russian).
6. Ermakova O.V. Comparative morphological analysis of peripheral endocrine glands of small mammals inhabiting areas with high levels of radioactivity and exposed to chronic irradiation in model experiments // Biophysics. 2011. Т. 56. № 1. P. 135–139 (in Russian).
7. Taskaev A.I., Bashlykova L.A., Zainullin V.G. Ecological and genetic monitoring of Muridae from the populations which have been suffering from chronic radiation // Radiats. biologiya. Radioecologiya. 2010. Т. 50. № 5. P. 560–571 (in Russian).
8. Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Zagorskaya N.G., Taskaev A.I. Biochemical consequences of radioactive contamination in the exclusion zone of the Chernobyl accident in populations of wild rodent / 20 years after the Chernobyl Accident: past, present and future / Eds. E.B. Burlakova and V.I. Naidich. Nova Science Publishers: New York, 2006. P. 303–329.
9. Shishkina L.N., Kudyasheva A.G., Zagorskaya N.G., Shevchenko O.G., Taskaev A.I. Participation of the lipid peroxidation processes in mechanism of the wild rodent adaptation to radioactive contamination of the Chernobyl NPP zone / The Lessons of Chernobyl: 25 Years Later / Eds. E.B. Burlakova and V.I. Naidich. Nova Science Publishers: New York, 2012. P. 187–208.