

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Уральское отделение  
Коми научный центр  
Институт биологии  
Научный совет по проблемам радиобиологии  
Радиобиологическое общество  
Международный союз радиэкологов

**Международная конференция**

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ МАЛЫХ ДОЗ  
ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ  
И РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ СРЕДЫ**

*Сыктывкар,  
17–21 марта 2014 г.*

**Материалы**



**Proceedings**

*March 17–21, 2014  
Syktyvkar*

**BIOLOGICAL EFFECTS  
OF LOW DOSE IONIZING RADIATION  
AND RADIOACTIVE POLLUTION ON ENVIRONMENT**

**International conference**

**Сыктывкар, 2014**

УДК 577.3:539.16.04:504.054 (063)

**Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды:** Материалы Международной конференции (Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 17–21 марта 2014 г.). Сыктывкар, 2014. 360 с. (Коми научный центр УрО РАН).

В сборник включены материалы конференции, организованной ФГБУН Институтом биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, посвященной 70-летию и памяти директора института и заведующего отделом радиоэкологии Анатолия Ивановича Таскаева (1944-2010 гг.). Материалы представлены в соответствии с тематическими секциями: «Эффекты действия малых доз ионизирующей радиации», «Миграция радионуклидов в почвенно-растительном покрове. Водные экосистемы», «Биологические последствия радиоактивного загрязнения среды», «Совместное действие факторов радиационной и нерадиационной природы».

Книга представляет интерес для экологов, радиобиологов, генетиков и биологов различного профиля.

Редакционная коллегия

С.В. Дёгтева (отв. редактор), А.Г. Кудяшева (зам. отв. редактора),  
О.В. Раскоша

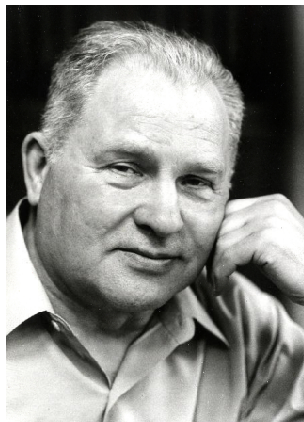
*Издано при поддержке гранта РФФИ № 13-04-06204*

ISBN 978-5-89606-510-4

© Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2014  
© Коми научный центр УрО РАН, 2014

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Международная конференция «Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды» (БИОРАД-2014) приурочена и посвящена 70-летию со дня рождения и памяти Анатолия Ивановича Таскаева (1944-2010), руководившего 22 года Институтом биологии Коми НЦ УрО РАН и 26 лет отделом радиоэкологии. Научная деятельность А.И. Таскаева в стенах института началась первого февраля 1968 г. Здесь он сформировался как ученый и организатор науки, прошел все ступени карьерной лестницы: от младшего научного сотрудника до директора крупного института. Поступив на работу в лабораторию радиохимических и радиофизических исследований, А.И. Таскаев первоначально занимался изучением миграции тяжелых естественных радионуклидов в биогеоценозах с повышенным радиационным фоном. Уже выполненные им работы отличались системностью, комплексностью, высоким методическим уровнем и охватом большого объема экспериментального и теоретического материала. Разработанный и введенный им в практику радиоэкологических исследований картографостатистический метод позволил наиболее полно определить и оценить пространственные и временные связи наблюдаемых явлений в экосистемах с повышенным фоном радиации. Впервые в практике радиоэкологических исследований изучен полный изотопный состав урана, тория и радона в почвах, растениях и организмах мышевидных грызунов с территорий, отличающихся повышенным естественным фоном радиации. Уникальный фактический материал был собран учеными в процессе сложных, продолжительных по времени экспедиций, в которых А.И. Таскаев был неизменным участником, неоднократно возглавлял экспедиционные отряды. Коллеги отмечали, что в самых непростых ситуациях, которые нередко случались во время экспедиционных выездов, он умел вселять в них уверенность, бодрость и спокойствие. Материалы этих исследований легли в основу его кандидатской диссертации «Закономерности распределения и миграции урана, тория, радия и радона в почвенно-растительном покрове района повышенной естественной радиации», выполненной под руководством Р.М. Алексахина и Н.А.

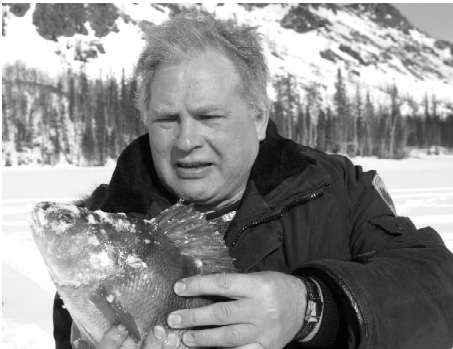


**Анатолий Иванович  
Таскаев  
1944–2010**

Титаевой. Квалификационная работа была блестяще защищена им в 1979 г. Через несколько лет увидела свет монография «Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны» (Л.: Наука, 1984), написанная А.И. Таскаевым в соавторстве с Н.А. Титаевой. С 1977 по 1979 г. А.И. Таскаев исполнял обязанности заведующего лабораторией радиохимических и радиофизических исследований, в 1979-1980 гг. успешно руководил лабораторией экологической дозиметрии и радиохимии, а с 1984 по 2010 г. заведовал отделом радиоэкологии, приняв эстафету от В.И. Маслова, первого руководителя данного структурного подразделения Института. Именно в этот период особенно ярко проявились всегда присущие Анатолию Ивановичу трудолюбие, инициативность и прекрасные способности организатора. Он способствовал развитию в отделе как в 1980-е, так и 2000-е гг. перспективных научных направлений, включая генетику животных и растений, гистоморфологию, биохимию, геронтологию, молекулярно-клеточную биологию. В 1980-е гг. специалисты отдела уделяли большое внимание изучению влияния повышенного фона ионизирующих излучений на природные популяции растений и животных. Впервые была получена информация о биологической эффективности повышенного естественного и техногенно обусловленного фона радиации, которая впоследствии вошла в монографию «Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере. Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы», изданную под редакцией академика ВАСХНИЛ Р.М. Алексахина (М.: Наука, 1990). Полученные результаты послужили отправной точкой для развертывания исследований по двум актуальным и на сегодняшний день направлениям: изучение биологического действия малых доз ионизирующих излучений и исследование сочетанного действия факторов физической и химической природы на организмы и природные экосистемы. Способности организатора, творческая активность, высокая работоспособность, умение использовать комплекс различных методов исследований, присущие А. И. Таскаеву, обеспечивали согласованную работу структурных подразделений отдела. Он мог мобилизовать коллектив на успешное выполнение поставленных задач фундаментального и прикладного характера.

Материалы многолетних комплексных радиоэкологических исследований, проводимых в Институте биологии, приобрели особую значимость в

1986 г. С первых дней после аварии на Чернобыльской АЭС группа сотрудников Института биологии, которую возглавил А.И. Таскаев, развернула в зоне поражения широкомасштабные исследования. С 1986 по 1993 г. было совершено более 20 экспедиционных выездов, в которых участвовали около 60 сотрудников Института биологии и других институтов Коми НЦ УрО РАН. Выполняя опасную работу дозиметриста-разведчика в зоне аварии,



Анатолий Иванович собрал материал, на основе которого были выбраны участки для многолетних стационарных наблюдений за популяциями растений и животных. По материалам изысканий, выполненных за этот период, опубликовано восемь монографий, четыре сборника трудов Института биологии и более 300 статей в разных научных изданиях. Во многом это стало возможным благодаря усилиям А. И. Таскаева, который координировал исследова-



ния, выполняемые специалистами различных подразделений института и других научных учреждений страны. Высокая результативность комплексных научных исследований и личное активное участие А.И. Таскаева в работах по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС отмечены медалью «За трудовую доблесть» и орденом Мужества, в 1996 г. ему была присуждена премия правительства Российской Федерации в области науки и техники, в 2007 г. А.И. Таскаев удостоен премии им. Н.В. Тимофеева-Ресовского. В 1988 г. научный коллектив единогласно избрал А.И. Таскаева директором Института биологии. Все последующие годы он совмещал эти сложные обязанности и руководство отделом радиоэкологии.

Круг научных интересов А.И. Таскаева в период работы в должности директора Института биологии постоянно расширялся. Он был инициатором комплексных исследований в районах с различной радиоэкологической обстановкой, по изучению сочетанного действия факторов на организмы и природные экосистемы, по разработке методологических основ мониторинга и экспертной оценки воздействия техногенных загрязнений на окружающую среду. Под его руководством была осуществлена разработка республиканских целевых программ «Экология 2005», «Чистая Печора», «Радон», «Автоматизированная геоинформационная кадастровая система Республики Коми», «Защита окружающей природной среды и населения от диоксиноподобных токсикантов» и проводилась реализация мероприятий в области охраны окружающей среды. А.И. Таскаев уделял постоянное внимание организации и развитию исследований, направленных на инвентаризацию биологического разнообразия особо охраняемых природных территорий Республики Коми. Многие годы А.И. Таскаев координировал работу по ведению Красной книги Республики Коми. Он постоянно поддерживал тесные деловые контакты со специалистами законодательных и исполнительных органов Республики Коми и Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Российской Федерации, а также с активистами общественных природоохранительных организаций. Главным итогом исследований в области охраны и рационального использования природных ресурсов, проведенных коллективом Института биологии под руководством А.И. Таскаева, стал выход в свет многочисленных научных и научно-популярных изданий: «Кадастр особо охраняемых территорий

Республики Коми», «Леса Республики Коми», «Земля девственных лесов», «Атлас Республики Коми», «Национальный парк Югыд ва», «Девственные леса Коми», серий книг «Фауна европейского Северо-Востока», «Биологическое разнообразие особо охраняемых природных территорий Республики Коми». А.И. Таскаев был не только идейным вдохновителем, но и ответственным редактором многих из них. Плодами его незаурядного интеллекта стали более 400 научных работ, в том числе 15 монографий. В составе авторских коллективов А.И. Таскаев дважды был удостоен Государственных премий в области науки – в 2000 г. правительством Республики Коми, а в 2008 г. – правительством Российской Федерации. В 1992 г. ему присвоено Почетное звание «Заслуженный деятель науки Коми АССР», а в 2005 г. – «Заслуженный эколог Российской Федерации».

Закономерно, что коллектив Института биологии неоднократно избирал А.И. Таскаева директором. Он обладал всеми качествами, необходимыми руководителю большого научного коллектива. В сложных экономических условиях, неоднократно складывавшихся в России с конца 80-х гг. XX столетия, он сумел не только сохранить, но и значительно укрепить научный и технический потенциал Института биологии. Во время работы на посту директора А.И. Таскаев планомерно осуществлял деятельность по подготовке кадров высшей квалификации: стабильно работала аспирантура, в которой одновременно обучались до 30 молодых специалистов, был создан совет по защите докторских диссертаций, открыта докторантура по специальностям «ботаника», «экология» и «почвоведение». По его инициативе основаны лаборатории беспозвоночных животных, биохимии и биотехнологии, биомониторинга (г. Киров), отделы экологии животных, компьютерных систем, технологий и моделирования. Вторую жизнь получили Ляльский лесоэкологический стационар, гербарий (СЫКО), Ботанический сад. В Институте был создан Научный музей, в коллекционных фондах которого наряду с типичными представителями флоры и фауны республики представлены редкие виды. Важной заслугой А.И. Таскаева как организатора науки можно считать и то, что научный потенциал Института биологии востребован предприятиями Республики Коми и государством. Он умело нацеливал коллектив на проведение не только фундаментальных, но и прикладных исследований. Заказчиками последних стабильно выступают как федеральные и республиканские ведомства, так и предприятия различных форм собственности. Отличительной чертой последних лет его работы в должности директора института стал рост числа крупных и социально-ориентированных международных проектов Европейской комиссии, выполняемых с участием Института. За годы работы А.И. Таскаева существенно расширилось сотрудничество Института биологии с отечественными и международными научно-исследовательскими институтами и ВУЗами. По инициативе А.И. Таскаева были учреждены три стипендии для студентов старших курсов Сыктывкарского государственного университета и Сыктывкарского лесного института, проявивших способности к научной работе. А.И. Таскаев вел большую научно-организационную работу, являясь членом Научного совета по радиационной биологии РАН, Объединенного ученого совета по биологическим наукам Уральского отделения РАН, коллегии Министерства природных ресурсов и ох-

раны окружающей среды Республики Коми, Международного союза радиозкологов и других научных организаций. Активно работал в редакционных коллегиях журналов «Радиационная биология. Радиозкология», «Теоретическая и прикладная экология», «Известия Коми научного центра Уральского отделения РАН». В 2006 г. он был назначен первым заместителем председателя Президиума Коми НЦ УрО РАН.

В 2009 г. Анатолий Иванович в пятый раз был избран директором Института биологии. Выступая с отчетным докладом по итогам работы за предшествующие пять лет, А.И. Таскаев очертил основные приоритеты исследований коллектива Института биологии на перспективу. Он планировал уделять внимание наиболее острым вопросам и проблемам в сложный период перестройки и реформы Российской академии наук. Все запланированное А.И. Таскаев начал реализовывать с присущими ему целеустремленностью и энергией. Сложный комплекс задач, который ему пришлось решать, совмещая должности заведующего отделом радиозкологии и директора Института биологии, первого заместителя председателя Президиума Коми НЦ УрО РАН, требовал огромных душевных и физических сил. Анатолий Иванович привык думать прежде всего о людях, о деле и лишь потом о своем здоровье. Сердце не выдержало, он скоропостижно скончался 17 ноября 2010 г., не закончив свое выступление на собрании молодых ученых института.

Отдел радиозкологии, имея большой научный опыт работы в области радиобиологии и радиозкологии, по инициативе сотрудников отдела и при поддержке А.И. Таскаева в 2001 г. организовал первую конференцию, посвященную биологическим эффектам малых доз ионизирующей радиации и радиоактивному загрязнению среды. «БИОРАД-2014» является логическим продолжением трех предыдущих. На ней будут рассмотрены и обсуждены современные проблемы радиобиологии и радиозкологии малых доз ионизирующей радиации. Исследования в этой области были начаты и получили развитие в период руководства отделом радиозкологии А.И. Таскаевым. В настоящее время они проводятся во многих научных учреждениях России, стран СНГ и за рубежом.

Минувший век был ознаменован не только интенсивным развитием ядерных технологий, но и крупными радиационными авариями в разных странах мира, вследствие чего глобальная радиозкологическая ситуация претерпела существенные изменения. Появились и расширились зоны повышенного содержания радионуклидов, усилились потоки их миграции по пищевым цепям. Все это предопределяет приоритетные задачи радиобиологии и радиозкологии в XXI в. и акцентирует внимание на качестве окружающей природной среды, охране биоты и здоровья человека от ионизирующих излучений.

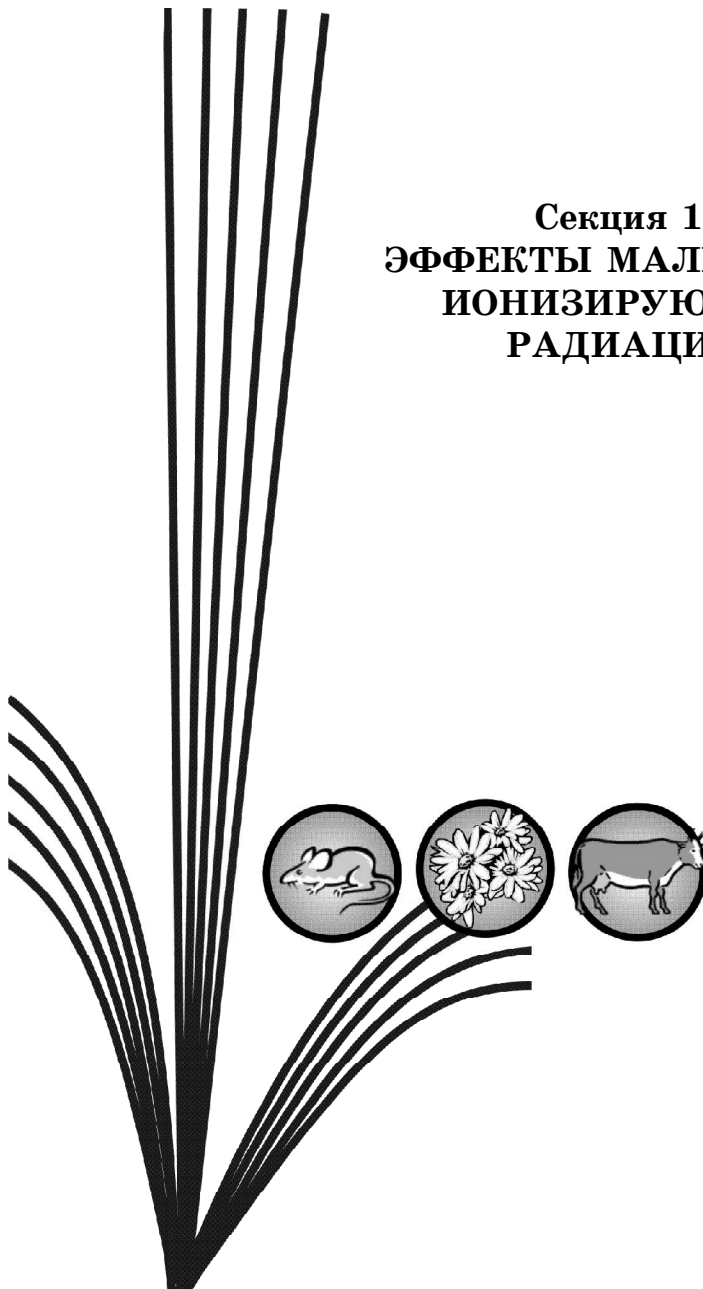
В сборнике освещены результаты исследований авторских коллективов из разных научных учреждений России, Украины, Беларуси и Казахстана. В первую очередь внимание уделено анализу механизмов действия малых доз ионизирующих излучений, итоги которого представлены в первой секции научного мероприятия «Эффекты действия малых доз ионизирующей радиации». Сведения об основных процессах и механизмах, влияющих на перенос, биоаккумуляцию и метаболизм естественных и искус-

ственных радионуклидов в различных экосистемах представлены в материалах второй секции «Миграция радионуклидов в почвенно-растительном покрове. Водные экосистемы». Материалы, представленные для обсуждения на секции «Биологические последствия радиоактивного загрязнения среды», имеют важное значение при решении проблем, связанных с оценкой радиационного воздействия на представителей флоры и фауны, наблюдаемого при действии ионизирующего излучения низкой интенсивности на разных уровнях организации. В материалах секции «Совместное действие факторов радиационной и нерадиационной природы на биологические системы» представлены итоги исследований ученых, выполненных на разных объектах, как в природных условиях, так и в модельных экспериментах. Рассматриваются разные подходы к оценке риска совместного действия факторов радиационной и нерадиационной природы на человека и биоту.

Материалы конференции публикуются в авторской научной редакции. Редакционная коллегия сборника позволила себе внести лишь незначительную правку, не изменяющую суть авторских текстов.



**Секция 1.  
ЭФФЕКТЫ МАЛЫХ ДОЗ  
ИОНИЗИРУЮЩЕЙ  
РАДИАЦИИ**





## ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ИНДУКЦИЮ И РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОГРАММИРОВАННОЙ КЛЕТочНОЙ ГИБЕЛИ

**Т.Р. Андрийчук, Н.Г. Ракша, С.Л. Луговая, С.Я. Мандрык,  
Л.И. Остапченко**

Учебно-научный центр «Институт биологии»  
Киевского национального университета им. Тараса Шевченко,  
Киев, Украина, [tatosha62@mail.ru](mailto:tatosha62@mail.ru)

Исследование влияния ионизирующей радиации на живые организмы тесно связано с оценкой состояния функционирования регуляторных сетей, координирующих системные ответы на действие лучевого фактора [1]. Особо значимым среди них является апоптоз – программируемая гибель клеток. Индукция апоптоза зависит от ряда факторов – метаболической активности клеток, природы и времени действия апоптогенного стимула. Именно такой путь гибели превалирует в популяции иммунокомпетентных клеток лимфоидных органов при воздействии ионизирующей радиации. Механизм апоптоза сложен и многогранен и включает в себя энергетически-зависимый каскад последовательных молекулярных событий. На сегодня выделяют два основных пути апоптоза: внешний – рецептор-опосредованный, и внутренний – митохондриальный. Оба пути тесно взаимодействуют и, в конечном итоге, реализуют генетически детерминированную программу клеточной гибели.

Изучение механизмов радиационно-индуцированного апоптоза проводили на тимocyтах и спленocyтах крыс через 30 мин. и 3 ч после действия рентгеновского излучения в дозе 1.0 и 7.78 Гр.

Уровень разрывов ДНК оценивали флуориметрическим методом с использованием 3',5'-диаминобензойной кислоты. Активность поли-(АДФ)-рибозополимеразы находили в соответствии с методом [2]. Оценку содержания белка p53 проводили, используя набор реактивов «p53 pan ELISA» (Roche Applied Science, USA). Уровень белка Вах определяли методом вестерн-блот анализа с использованием поликлональных антител против белка Вах (Sigma Aldrich, USA).

Генотоксическое влияние ионизирующих излучений реализуется в первую очередь в виде нарушений структуры и функций хрома-

**Уровень одно- и двуцепочечных разрывов в лимфоцитах тимуса и селезенки крыс при облучении в дозе 1.0 Гр ( $M \pm m$ ,  $n = 5$ )**

Группа	Тимоциты		Спленоциты	
	Одноцепочечные разрывы, %	Двуцепочечные разрывы, %	Одноцепочечные разрывы, %	Двуцепочечные разрывы, %
Контроль	6.7±0.5	1.1±0.8	5.6±0.5	1.0±0.1
30 мин.	12.8±0.9*	2.5±0.1*	18.0±1.6*	1.2±0.1
3 ч	13.3±0.1*	3.3±0.3*	12.3±1.1*	2.9±0.2*

*Примечание.* \*Достоверно по отношению к контролю;  $p < 0.05$ .

тина клеточного ядра. Нами показано, что влияние рентгеновского излучения в дозе 1.0 Гр приводит к накоплению одно- и двуцепочечных разрывов ДНК в лимфоцитах тимуса и селезенки крыс (см. таблицу), что частично можно объяснить невысоким уровнем активации репарационных систем.

Маркером ДНК-репарационных процессов, принимающим активное участие в сохранении целостности генома, регуляции экспрессии ряда генов и реализации процессов клеточной гибели, а также выполняющим функцию «реостата» между некротическим и апоптотическим путем, является фермент поли-(АДФ)-рибозополимеразы (ПАРП). Нами установлены разнонаправленные изменения активности фермента в исследуемых клетках при действии ионизирующей радиации (рис. 1), что, возможно, сопряжено с индукцией различных путей передачи апоптотического сигнала (фрагментация ПАРП при активации различных классов протеолитических ферментов) [3].

Нарушение структурной целостности генетического аппарата клетки в условиях нашего эксперимента приводит к повышению содержания транскрипционного фактора – белка р53 и активации р53-опосредованного пути апоптоза (рис. 2). На сегодня постулируется участие р53 в активации митохондриального пути апоптоза

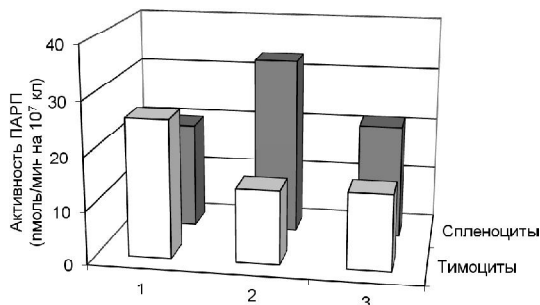


Рис. 1. Активность поли-(АДФ)-рибозополимеразы в тимоцитах и спленоцитах крыс при действии ионизирующей радиации в дозе 1.0 Гр: 1 – контроль; 2 – 30 мин. после действия радиации; 3 – 3 ч после действия радиации.

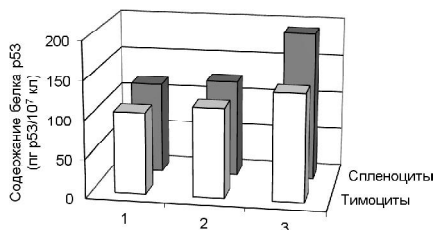


Рис. 2. Содержание белка p53 в тимocyтах и спленocyтах крыс при действии ионизирующей радиации в дозе 1.0 Гр: 1 – контроль; 2 – 30 мин. после действия радиации; 3 – 3 ч после действия радиации.

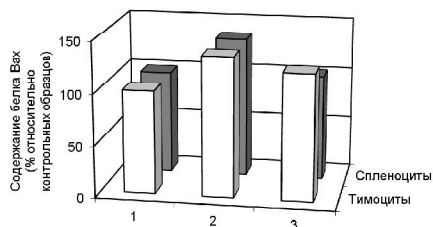


Рис. 3. Содержание белка Bax в тимocyтах и спленocyтах крыс при действии ионизирующей радиации в дозе 1.0 Гр: 1 – контроль; 2 – 30 мин. после действия радиации; 3 – 3 ч после действия радиации.

как за счет транскрипции p53-респонсивных генов, так и непосредственной активации процесса пермеабилзации митохондриальной мембраны с последующей поэтапной реализацией апоптотической гибели клеток. Гены белков семейства Bcl-2, являющиеся p53-респонсивными генами, активируются в условиях радиационно-индуцированного апоптоза.

Так, нами показано изменение уровня проапоптотического члена семейства Bcl-2 – белка Bax. При этом, повышение его содержания через 30 мин. в обоих типах клеток, возможно, объясняется активацией радиационно-индуцибельного *Erg 1* гена [4], продукт которого наряду с p53 принимает непосредственное участие в экспрессии Bax (рис. 3). Этап активации Bax завершается его транслокацией в митохондрии, где под контролем антиапоптотических и BНЗ-only членов семейства белков Bcl-2 димеры Bax связываются с митохондриальными апоптоз-индуцирующими каналами, ускоряя выход проапоптотических факторов, что, в свою очередь, запускает как каспазо-опосредованный, так и каспазо-независимый путь реализации программированной клеточной гибели.

Таким образом, при радиационно-индуцированном апоптозе в лимфоцитах тимуса и селезенки крыс наблюдается комплекс молекулярных событий с вовлечением апоптотических сигнальных каскадов.

#### Литература

1. Мазурик В.К. Роль регуляторных сетей ответа клеток на повреждение в формировании радиационных эффектов // Радиационная биология. Радиоэкология, 2005. Т. 45. № 1. С. 26-45.
2. Нелипович П.А., Никонова Л.В., Уманский С.Р. Пострадиационное ингибирование поли-(АДФ-рибозо)-полимеразы не определяется межнуклеосомной фрагментацией ДНК // Радиобиология, 1985. Т. 25. № 1. С. 7-11.
3. D'amours D., Desnoyers S., D'silva I. et al. Poly(ADP-ribosylation) reactions in the regulation of nuclear functions // Biochem. J., 1999. Vol. 342. P. 249-268.

4. *Zagurovskaya M., Shareef M.M., Das A. et al.* EGR-1 forms a complex with YAP-1 and upregulates Bax expression in irradiated prostate carcinoma cells // *Oncogene*, 2009. Vol. 28. P. 1121-1131.

#### THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON THE INDUCTION AND IMPLEMENTATION OF PROGRAMMED CELL DEATH

**T.R. Andriichuk, N.G. Raksha, S.L. Luhova, S.Ya. Mandryk, L.I. Ostapchenko**  
Taras Shevchenko National University of Kiev  
Educational and Scientific Center «The Institute of Biology», Kiev, Ukraine  
[tatosha62@mail.ru](mailto:tatosha62@mail.ru)

The investigation of the ionizing radiation influence on living organisms is closely associated with the function of the regulatory networks that coordinate system response to radiation factors including the activation of cell death. Apoptosis induction involves different ways which are stimulated both external and internal death signals and realize in deterministic genetic program of cell death.

Thus, the results indicate the possibility of involvement of complex multi-metabolic pathways components (levels of single- and double-stranded DNA breaks, poly-(ADP)-ribose polymerase activity, protein p53 and protein Bax content in rats' thymocytes and splenocytes) in processes of radiation-induced apoptosis.

---

#### ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАЧЕСТВА СЕМЕННОГО ПОТОМСТВА КОСТРЕЦА БЕЗОСТОГО ИЗ ЗОНЫ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ (ВУРС)

**Е.В. Антонова, В.Н. Позолотина, Э.М. Каримуллина**  
Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург,  
Россия, [selena@ipae.uran.ru](mailto:selena@ipae.uran.ru)

В рамках комплексной работы по изучению современной радио-экологической обстановки в регионах воздействия предприятий ядерного топливного цикла и оценке отдаленных последствий действия радиации на растения проведено исследование ценопопуляций костреца безостого (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub), длительное время произрастающих в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа). Живые организмы одновременно испытывают на себе действие целого комплекса факторов окружающей среды, проявляя при разном их сочетании эффекты синергии, аддитивности и антагонизма.

Цели настоящей работы: 1) изучить межгодовую изменчивость жизнеспособности, мутабельности и радиостойчивости семенного потомства костреца безостого, произрастающего в градиенте радио-

активного загрязнения ВУРСа; 2) выявить годовые биоритмы вышеперечисленных характеристик, присущих семенному потомству костреца из хронически облучаемых и фоновых ценопопуляций.

Семена костреца собирали в зоне ВУРСа в период с 2005 по 2012 г. Вдоль центральной оси следа были заложены четыре импактных, на периферии следа – три буферных участка. Две фоновые площадки располагались вне зоны какого-либо загрязнения. Растительность в головной части ВУРСа представлена комплексом синантропных и полуестественных сообществ на различной стадии деградации и восстановительных сукцессий. Во всех исследованных фитоценозах кострец является доминантом или субдоминантом. Расчеты поглощенных доз на растения выполнены с помощью программного пакета ERICA Tool [3, 4].

В течение семи лет исследовали жизнеспособность (всхожесть семян, выживаемость проростков, скорость листообразования и корней) и мутабельность (частота встречаемости морфозов в потомстве каждого растения и на совокупную выборку) семенного потомства костреца из разных ценопопуляций по стандартной методике [2]. Межгодовую изменчивость качества семенного потомства костреца оценивали с учетом влияния погодных условий. Для изучения внутригодовых биоритмов у разных выборок с сентября по август было проведено 12 экспериментов с ежемесячной закладкой. Антиоксидантный статус растений исследовали на высушенных до воздушно-сухого состояния проростках, определяя содержание низкомолекулярных антиоксидантов (НМАО). Данный метод основан на окислении антиоксидантов  $FeCl_3$  [1].

Современная радиоэкологическая характеристика ВУРСа подробно описана в работах [2; 6]. С учетом естественного радиационного фона мощность поглощенной материнскими растениями дозы превышала фоновый уровень в среднем в 2-5 раз на буферных участках и в 9-107 раз на импактных [5]. Максимальное превышение дозы для зародышей семян из зоны ВУРСа в период их хранения и созревания составило до 12 раз по сравнению с фоновыми семенами.

Сопряженный анализ показателей качества семян и погодных условий в разные годы показал, что для импактных популяций метеоусловия имеют меньшее значение, чем для фоновых выборок. Так, в зоне ВУРСа значимыми оказались лишь эффекты влияния температуры воздуха за июнь на длину корней ( $R = 0.535$ ,  $p = 0.015$ ). Вероятно, это связано с большей изменчивостью качества семенного потомства в зоне ВУРСа, отсутствием единого ответа семенного потомства из разных ценопопуляций, а значит, и ярко выраженных эффектов взаимодействия факторов радиационной и нерадиационной природы. В то же время для фоновых популяций значи-

мым оказалось влияние температуры, осадков и их комбинаций за разные месяцы (более 20 комбинаций факторов).

Ежемесячное изучение прорастания семян выявило существенные различия во временной динамике между выборками из зоны ВУРСа и фоновой. Для семян фоновой популяции (рис. 1А) показан минимальный диапазон изменчивости признака «выживаемость проростков» (от 73 до 90% при среднегодовом значении 82%). В популяции Импактная-1 обнаружено отсутствие значимых различий с фоновой выборкой (61-93% при среднем значении выживаемости 79% ;  $F$ -критерий,  $p << 0.01$ ). В то же время ценопопуляции Буферная-2 и Импактная-3 демонстрировали снижение выживаемости в 2.2 и 2.8 раза по сравнению с фоновой выборкой, среднегодовые значения равны 37% (8-60%) и 29% (7-47%) для двух выборок соответственно ( $F$ -критерий,  $p << 0.001$ ). Минимальные значения выживаемости проростков костреца во всех выборках зафиксированы в октябре.

Оценка динамики роста корней проростков (рис. 1Б) показала, что в осенне-зимние месяцы (с сентября по февраль) во всех изученных выборках костреца преобладали проростки с короткими корнями или практически не начавшими рост (2-34 мм). В весенне-летний период проростки из хронически облучаемых ценопопуляций росли лучше, но имели длину корней значительно ниже фоновых значений ( $F$ -критерий,  $p << 0.001$ ). У потомков растений с участка Импактный-3 проявилось снижение скорости роста корней

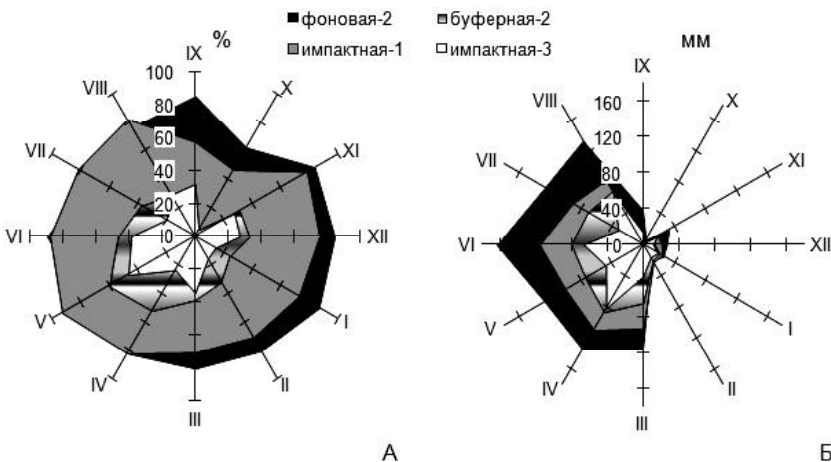


Рис. 1. Внутригодовая динамика прорастания семян костреца из разных ценопопуляций, оцененная по выживаемости проростков (А) и скорости роста корней (Б).



в марте, мае, июле, что отличает эту выборку от других ценопопуляций.

Для характеристики биохимического баланса проростков определяли содержание низкомолекулярных антиоксидантов (НМАО). Показано, что у проростков импактных участков концентрация НМАО выше (от 1.4 до 7.4 мкг-экв.кверц/г сухой массы) по сравнению с фоновой выборкой (1.3 мкг-экв.кверц/г;  $R_s = 0.9$ ;  $p = 0.037$ ). Дополнительное облучение стимулировало выработку НМАО в проростках всех ценопопуляций ( $p < 0.01$ ). Показаны высоко значимые зависимости ( $p = 0.0020-0.0328$ ) между содержанием НМАО и выживаемостью проростков в фоновых и хронически облучаемых выборках: чем ниже выживаемость проростков, тем более напряженный антиоксидантный статус у них выявляется. У костреца антиоксидантный статус проростков обусловлен отчасти наличием антоцианов, которые проявляются фенотипически, окрашивая органы в разные оттенки красного. Данная группа соединений является неспецифическими протекторами, способствуя адаптации растений к тем или иным стрессовым условиям. На примере окраски колеоптиле показано, что наличие антоцианов не всегда коррелирует положительно с содержанием НМАО (рис. 2). Это связано с многообразием соединений, входящих в группу низкомолекулярных антиоксидантов.

На примере некрозов колеоптиле у проростков показано, что в исследуемый период наблюдаются синхронные волнообразные колебания частоты встречаемости этого морфоза, особенно высокие в хронически облучаемых выборках. Максимальная амплитуда колебаний в проявлении этой аномалии характерна для осенне-зимних месяцев, небольшое повышение отмечено в апреле, а в физиологически благоприятный летний период некрозы колеоптиле практически не встречаются.

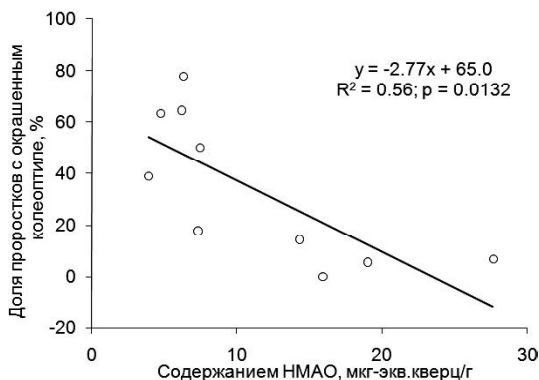


Рис. 2. Зависимость между содержанием НМАО и окраской колеоптиле у костреца в ценопопуляции импактная-3.

Полученные за семь лет данные об эффектах действия радиации на растения имеют более широкое значение, поскольку вскрывают общеприродные закономерности реакции живых систем на любое стрессорное воздействие. Живые организмы задействуют эволюционно сложившийся арсенал средств защиты и восстановления для выживания в условиях динамично меняющейся окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №11-04-01260) и Программы развития ведущих научных школ (НШ-5325.2012.4).

### Литература

1. *Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П.* Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.
2. *Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н.* и др. Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа. Екатеринбург: Изд-во «Гощицкий», 2008. 204 с.
3. *Beresford N.A., Barnett C.L., Howard B.J.* et al. Derivation of transfer parameters for use within the ERICA Tool and the default concentration ratios for terrestrial biota // *J. Environ. Radioact.*, 2008. Vol. 99. P. 1393-1407.
4. *Brown J.E., Alfonso B., Avila R.* et al. The ERICA tool. *J. of Environ. Radioact.*, 2008. Vol. 99 (9). P. 1371-1383.
5. *Karimullina E.M., Antonova E.V., Pozolotina V.N.* Assessing radiation exposure of herbaceous plant species at East-Ural Radioactive Trace // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013. Vol. 124. P. 113-120.
6. *Pozolotina V.N., Molchanova I.V., Karavaeva E.N.* et al. Radionuclides in terrestrial ecosystems of the zone of Kyshtym accident in the Urals // *J. of Environ. Radioact.*, 2010. Vol. 101. P. 438-442.

### TEMPORAL VARIABILITY OF BROMOPSIS INERMIS SEEDS QUALITY FROM RADIOACTIVE CONTAMINATED AREA (EURT)

**E.V. Antonova, V.N. Pozolotina, E.M. Karimullina**

Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Division of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, [pozolotina@ipae.uran.ru](mailto:pozolotina@ipae.uran.ru)

The interannual and monthly variability of viability, radioresistance, mutability and antioxidant status seed progeny of *Bromus inermis* from East-Ural Radioactive Trace area was studied. It was shown the different reactions of impact and background populations at the weather conductions. The radiosensitivity of the seed progeny was determined of its native vitality.

## К ВОПРОСУ О КАЛИБРОВКЕ КРИВОЙ БАСБИ-БУРЛАКОВОЙ ПРИ МАЛЫХ ДОЗАХ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

Н.Н. Антонова, В.В. Зайцев

Федеральное государственное унитарное предприятие «РАДОН»,  
Москва, Россия, [mosconfere@rambler.ru](mailto:mosconfere@rambler.ru)

За сравнительно короткий срок исследований действия ионизирующего излучения (ИИ) на живые организмы были обнаружены разнообразные по своей природе ответные реакции клеток и целых многоклеточных организмов на облучение. Выявлены зависимости проявления эффектов от дозы радиации и характера условий, сопутствующих облучению. Как правило, при больших дозах ИИ наблюдается гибель клеток и организмов, при малых – организм не погибает.

При облучении в малых дозах, уровни которых граничат с природным фоном, учеными регистрируется стимулирующее действие радиации. Такое действие проявляется в увеличении частоты клеточных делений, ускоренном прорастании и улучшении всхожести семян и даже в повышении урожайности сельскохозяйственных культур.

Для количественной характеристики радиочувствительности вида или популяции используют кривые, показывающие зависимость выраженности эффекта от величины полученной дозы. Радиочувствительность культурных растений характеризуют иногда величиной дозы, приводящей к снижению урожая на 50% –  $УД_{50}$ . Величина  $УД_{50}$  может быть в 10 раз и более ниже  $LD_{50}$  для того же вида и сорта растений.

Степень выраженности радиационного эффекта в зависимости от полученной дозы можно показать и на так называемых «дозовых кривых». Долгое время полагали, что величина эффекта должна быть строго пропорциональна полученной дозе, т.е. график указанной зависимости должен иметь вид прямой линии, выходящей из начала координат.

Уточнение характера дозовых зависимостей в экспериментах на животных, растениях и других живых организмах показало, однако, достоверное и воспроизводимое отклонение экспериментальных данных в области малых доз (т.е. от прямой, экстраполированной к нулю). Степень повреждений становилась вначале явно меньше ожидаемой, а при дальнейшем уменьшении доз (на уровне небольших превышений по сравнению с естественным фоном) обнаруживались даже признаки явного улучшения состояния после облучения, т.е. проявление эффекта радиационного стимулирования.

Цель исследований – изучение эффектов в семенах одуванчика лекарственного при воздействии малых доз с последующим использованием экспериментальных результатов для проведения калибровки кривой Басби-Бурлаковой в изученном интервале параметров.

Семена одуванчиков (*Taraxacum officinale s.l.*) для цитогенетического анализа готовили по методике В.Н. Позолотиной и др. (2008). Гамма-фон измеряли дозиметром ИРД-02 на уровне поверхности почвы и высоте 1 м над ее поверхностью. Суммарную бета-активность определяли общепринятым методом на радиометре «Бета».

Оценивали количество семян в одной корзинке, энергию их прорастания, другие интегральные морфофункциональные показатели, а также количество хромосомных аббераций в клетках меристемы одуванчика лекарственного.

В самом общем случае на дозовых кривых, получаемых на основе более точных наблюдений, оказалось возможным выделить и область радиационного ингибирования, где преобладают бионегативные эффекты, и область радиационного стимулирования, которая соответствует проявлениям биопозитивных эффектов. Типичные признаки эффектов и общий характер воздействия радиации на организмы при различных дозах показаны в табл. 1.

Причиной проявлений стимулирующего эффекта малых доз радиации посчитали следствием активизации некоторых жизненных процессов – при условии, что негативное воздействие само по себе не слишком велико.

Ранее было установлено, что радиостимуляция – это частный случай явления, получившего название гормезис, который состоит в положительной реакции организмов на действие самых различных неблагоприятных факторов окружающей среды (конечно, при

Таблица 1

## Общая шкала радиобиологических эффектов

Дозы, кратные естественному фону	Эффекты
<1	Депрессия роста, угнетение размножения
1-10	Стимуляция роста и размножения, повышение сопротивляемости неблагоприятным факторам
10-100	Проявления как депрессивных, так и стимуляционных эффектов. Активация репарационных и компенсационных механизмов
100-1000	Повреждения и генетические нарушения. Репарация повреждений
>1000	Повреждения генов. Аномалии развития и размножения. Угнетение репарационных процессов. Возможность летального исхода

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции зависимости внешнего гамма-фона и суммарной бета-активности и энергии прорастания семян одуванчика**

Показатель	Экспозиция, сут.			
	4	7	10	15
γ-излучение, мкЗв/ч	-0.763	+0.582	+0.719	+0.872
Σβ-активность, Бк/г	-0.724	+0.678	+0.679	+0.849

условии умеренных нагрузок). В случае, если таким фактором выступает ионизирующая радиация, говорят о радиационном гормезисе.

Исследования семян одуванчика лекарственного на территории НПК ГУП МосНПО «Радон» показали, что всхожесть и энергия прорастания семян выше, чем в контрольных ценопопуляциях (табл. 2, 3). Однако радиационный гормезис сопровождается генетической нестабильностью. Семена растений, подвергающихся постоянному воздействию радиационного фактора малой мощности (ценопопуляция ЗСР НПК), имеют несколько повышенный высокий уровень хромосомных аберраций в стадии анафазы меристемных клеток корневого проростка по сравнению с контролем.

Оценка последствий техногенного воздействия предполагает сравнение выборок с модельных площадок, выделенных на территориях с разной степенью техногенного воздействия, либо выборок с одной и той же площадки, собранных в разное время для выявления возможного ухудшения или улучшения состояния организма. В исследованиях различных территорий статистическая обработка данных проводилась для дискретных случайных величин значений показателей с достаточной достоверностью.

Как показывает практика проведения таких оценок, при этом возможно выявление последствий различных видов техногенных воздействий, а также мультифакторного воздействия. При мониторинге во времени возможно выявление направления и степени отклонения состояния системы от условной нормы в зависимости от нарастания или снижения степени техногенного воздействия.

Таблица 3

**Энергии прорастания семян одуванчика при различных уровнях облучения**

γ-фон, мкЗв/ч	Σβ-активность, Бк/г	Экспозиция, сут.			
		4	7	10	15
0.1-0.2	13.0	6.1	22.0	36.0	46.0
0.2-0.3	15.1	4.3	8.6	47.0	54.0
0.3-0.9	46.6	2.1	29.0	56.0	70.0

Впервые сделана попытка, используя результаты экспериментов (табл. 2, 3), провести калибровку теоретической, качественной кривой Басби-Бурлаковой при увеличении гамма-фона в пределах 0.30-0.90 мкЗв/ч, которое сопровождалось повышением энергии прорастания семян в 1.5-3.0 раза, что можно объяснить, по-видимому, эффектом гормезиса, когда небольшие дозы облучения стимулируют процессы роста растений.

**Заключение.** В работе обсуждаются результаты радиационно-гигиенического мониторинга территорий парка Кузьминки и НПК ФРУП «РАДОН». Впервые сделана попытка, используя результаты экспериментов (табл. 2, 3), провести калибровку теоретической качественной кривой Басби-Бурлаковой в положительной области влияния малых доз. В дальнейшем может быть поставлена задача калибровки отрицательных областей.

#### THE QUESTION OF THE CALIBRATION CURVE BUSBY-BURLAKOVA AT LOW DOSES OF IONIZING RADIATION

N.N. Antonova, V.V. Zaitsev

The Federal State Unitary Enterprise «Radon», Moscow, Russia

This paper discusses the results of radiation-hygienic monitoring areas of the park and NPK Kuz'minki FRUP «Radon». The first attempt, using the experimental results to calibrate the theoretical curve quality Busby-Burlakova in the positive effects of low doses. In what could be the task of calibrating the negative areas.

#### ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОПУЛЯЦИЯХ МЫШЕВИДНЫХ ГРЫЗУНОВ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧАЭС

О.О. Бурдо<sup>1</sup>, Д.А. Вишневский<sup>2</sup>, А.И. Липская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина,  
[kruza@list.ru](mailto:kruza@list.ru)

<sup>2</sup> Чернобыльский радиозокологический центр, Чернобыль, Украина,  
[den\\_post@rambler.ru](mailto:den_post@rambler.ru)

Качественная и количественная оценка антропогенного воздействия на биосферу является одним из наиболее интенсивно развивающихся и актуальных направлений в целом спектре биологических наук второй половины XX в. Особое внимание в этих исследованиях уделяется проблеме введения в окружающую среду новых веществ (ксенобиотиков) и факторов, которые дестабилизируют биологические системы, приводя к сложно прогнозируемому комплексу изменений.

Проблема радиационного загрязнения территории Украины стоит особенно остро в связи с радионуклидной контаминацией в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Так, наличие в почве цезия-137 в концентрации выше 10 кБк/км<sup>2</sup> наблюдается на площади около 100 тыс. км<sup>2</sup> [5]. Выбросами, возникшими при аварии, загрязнено примерно 200 тыс. км<sup>2</sup> территории стран Европы.

Дезактивация и рекультивация потенциально пригодных к сельскохозяйственному и другим видам использования земель, содержащих <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239</sup>Pu, экономически неэффективна [5]. Это позволяет предположить, что в долговременной перспективе комплекс мер по возвращению этих земельных ресурсов в оборот не будет предпринят. Это приводит к развитию радиогенной сукцессии, что выражается в формировании особых типов экосистем, отличающихся видовым разнообразием и спецификой протекания процессов обмена веществ и энергии [2-4]. В связи с этим актуальным является изучение маркеров, характеризующих разнообразие экспрессии признаков, выражающееся в их отклонении от нормы реакции.

На протяжении 2008-2009 гг. нами проводилось исследование мышевидных грызунов 30-километровой зоны отчуждения вокруг ЧАЭС, задачей которого была оценка цитогенетических параметров, описывающих отклонение от нормы.

Цель исследования – изучение характера проявления цитогенетических аномалий и их связи с радиогенной контаминацией среды, а также другими экологическими и биологическими факторами.

Отлов животных проводился на пяти полигонах в пределах зоны отчуждения ЧАЭС. Радиационное загрязнение этой территории имеет неравномерный (пятнистый) характер, что связано с особенностями поступления радионуклидов из разрушенного реактора четвертого энергоблока ЧАЭС в атмосферу и последующего их выпадения на грунт в зависимости от погодных условий. Учитывая это, были выбраны площадки, которые существенно отличались по уровню контаминации (табл. 1). Полигоны характеризовались единообразием экологических условий. Они представляли собой опушки и редколесья соснового леса с развитым травяным покровом, расположенные на уровне второй пойменной террасы р. Припять. В качестве условного контроля избран полигон № 5 с самым низким уровнем радиационного загрязнения почв.

Исследования проводили на четырех видах мышевидных грызунов: рыжей (*Chlethrionomus glareolus*), пашенной (*Microtus agrestis*), обыкновенной (*Microtus arvalis*) полевках и желтогорлой мыши (*Apodemus flavicollis*). Вид животных идентифицировали с помощью кариотипирования [1].

Таблица 1

## Радиационная характеристика полигонов

Номер полигона	Расстояние от ЧАЭС, км	Мощность экспозиционной дозы, мкР/час	Плотность загрязнения почвы, кБк/м <sup>2</sup>		Содержание радионуклидов в тканях животных, Бк/кг	
			<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr
1	2.4	550-1400	3600-20000	680-2100	900-18500	20-5300
2	4.5	310-620	1300-8600	300-1000	40-3100	20-100
3	6.4	130-150	1500-1700	34-196	2-120	2-20
4	13	27-35	1300-1600	30-100	1-6	1-3
5	23	20-22	180-270	13-15	1-6	1-3

Относительная численность животных на полигонах была равномерной и колебалась в пределах от 6.6 до 8.7 животных на 100 ловушко-суток. Рыжая полевка являлась доминирующим видом на всех полигонах, кроме № 4, вне зависимости от уровня радиационного загрязнения. Пашенная и обыкновенная полевки характеризовались приуроченностью к полигонам с более низким уровнем загрязнения.

Микроядерный тест применен для оценки мутагенного влияния факторов среды как интегральный показатель, объединяющий хромосомные и хроматидные фрагменты (неспособные к самостоятельному перемещению) и целые хромосомы (анеуплоидия). У каждого животного проанализировано по 5 тыс. клеток. Исследованы следующие показатели: количество клеток с микроядрами (МЯ), МЯ в клетке, МЯ у животного, распределения клеток по количеству МЯ. Все данные выражались в промилле, статистическую обработку проводили при помощи программы Statistika 7.0

Обнаружено статистически достоверное увеличение показателей микроядерного теста (частота клеток с МЯ, средняя частота МЯ и количество клеток с одним МЯ) у рыжей полевки (табл. 2) на полигонах № 1-3 относительно животных с условно-контрольного полигона № 5.

Исследуемым параметром было количество клеток с несколькими МЯ. У рыжей полевки клетки с тремя и более МЯ встречались у 37.5% животных, отобранных на полигоне № 1. У двух особей (12.5%) имелись клетки с пятью-семью МЯ, у одной – выявлено аномально большое количество МЯ в клетке (до 13). Животные, отловленные на полигонах № 2 и 3, характеризовались наличием клеток с тремя МЯ. Отметим, что у животных с полигона № 5 встречались только клетки с двумя МЯ.

На полигоне № 1 у рыжей полевки наблюдалась выраженная тенденция к увеличению степени нагруженности клеток МЯ с воз-



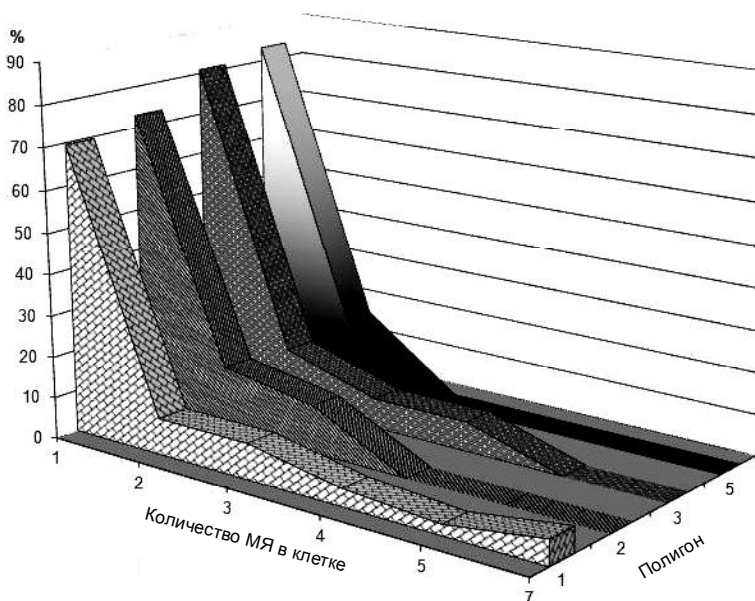
Таблица 2  
**Результаты анализа микроядер в клетках костного мозга *S. glareolus***  
 (%о, М ± m)

Полигон	Удельная активность		Частота клеток с МЯ	Средняя частота МЯ	Распределение клеток по количеству клеток с МЯ		
	Cs <sup>137</sup>	Sr <sup>90</sup>			1	2	3 и более
1	900±186	115±49	*1.53±0.37	*2.01±0.47	*1.0±0.17	0.125±0.05	0.45±0.25
2	1130±661	36±6	*1.3±0.45	**1.8±0.69	**0.95±0.33	0.2±0.11	0.15±0.15
3	36±26	5±2	*2.1±0.47	*2.65±0.66	*1.7±0.33	0.3±0.3	0.1±0.1
5	4.7±0.66	2.2±0.29	0.44±0.21	0.28±0.13	0.2±0.06	0.04±0.04	0±0

Примечание. \* p < 0.05, \*\* p < 0.07.

растанием мощности экспозиционной дозы и ростом удельной активности (см. рисунок).

На полигоне № 3 у пашенной полевки обнаружено статистически достоверное увеличение тех же показателей, как и у рыжей полевки. Изучение распределения животных по клеткам с несколькими МЯ показало, что у 55% животных обнаружилось наличие клеток с тремя и четырьмя МЯ (на полигоне № 3), тогда как у животных с полигонов с более низким уровнем загрязнения (№ 4, 5) клетки с тремя и более МЯ не встречались.



Распределение клеток по количеству микроядер в клетке у рыжей полевки.

У рыжей и пашенной полевки на полигонах с высокими значениями радиационного фактора (№ 1, 3) наблюдалась высокая степень нагруженности клеток МЯ. Несмотря на разницу в значениях показателя, цитогенетический ответ у разных видов был одинаковым.

Наблюдалось распределение по количеству МЯ. Клетки с одним МЯ составляли 60-80% от всего количества клеток с МЯ (независимо от вида и уровня загрязнения местообитания). Вместе с тем, у животных, обитающих на полигонах с высоким уровнем загрязнения (№ 1, 2), отмечено наличие клеток с множественными МЯ (3, 7, 13). Их количество достигает 20% от общего числа клеток с МЯ (см. рисунок).

Оценку связи между показателями проводили с помощью корреляционного анализа в непараметрической статистике. У двух видов, обитающих на полигоне с максимальным уровнем загрязнения, выявлена положительная корреляция между содержанием радионуклидов в организме животного и цитогенетическими показателями.

Показано, что у желтогорлой мыши удельная активность  $Cs^{137}$  коррелирует с комплексом микроядерных показателей (частота клеток с МЯ, клетки с одним МЯ, общее количество микроядер у животного). Коэффициент корреляции во всех случаях составил  $r = 0.9$ ;  $p < 0.05$ . Кроме того, выявлена корреляция между удельной активностью цезия и удельной активностью стронция ( $r = 0.9$ ;  $p < 0.05$ )

У рыжей полевки выявлена положительная корреляция между удельной активностью  $Sr^{90}$  и митотическим индексом ( $r = 0.82$ ;  $p < 0.05$ ); удельной активностью  $Sr^{90}$  – количеством двуядерных клеток ( $r = 0.77$ ;  $p < 0.05$ ); митотическим индексом – количеством двуядерных клеток ( $r = 0.77$ ;  $p < 0.05$ ).

Для рыжей полевки показано, что комплекс микроядерных показателей (количество клеток с МЯ, распределение клеток по количеству МЯ, общее количество МЯ у животного) не коррелирует с удельной активностью радионуклидов в организме. Корреляция обнаружена между показателями МЯ теста – коэффициент корреляции составляет от 0.8 до 0.9,  $p < 0.05$ , что, возможно, указывает на взаимосвязь различных типов нарушений структуры ядра.

Значения численности мышевидных грызунов достаточно однородны на всех полигонах. Это свидетельствует о том, что радиационный фактор не проявляет себя на популяционном уровне.

На участках с максимальными значениями радиационного фактора наблюдается высокая степень нагруженности клеток МЯ у особей каждого вида, что можно интерпретировать как формирование стабильного уровня генетической нестабильности в популяциях, обитающих на сильно загрязненных территориях.

Степень повреждения генома (высокие показатели МЯ теста) увеличивается с усилением радиационного фактора (МЭД и удельной активностью радионуклидов в теле животных).

#### Литература

1. *Nagy A., Gertsenstein M., Vintersten K., Behringer R.* Karyotyping Mouse // Cells, 2008. Vol. 3. Issue 5. P. 1-3.

2. *Большаков В.Н., Пястолова О.А., Вершинин В.Л.* Специфика формирования видовых сообществ животных в техногенных и урбанизированных ландшафтах // Экология, 2001. № 5. С. 343-354.

3. *Криволицкий Д.А.* Динамика биоразнообразия и экосистемы территорий с радиоактивным загрязнением // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Тез. докл. Междунар. конф. Сыктывкар, 2001. С. 69-70.

4. *Щипанов Н.А.* Некоторые аспекты популяционной устойчивости мелких млекопитающих // Успехи современной биологии, 2000. Т. 120. № 1. С. 73-87.

5. 20 років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє: Національна доповідь України. Київ: Атіка, 2006. 224 с.

#### CYTOGENETIC EFFECTS IN POPULATIONS OF MICE-LIKE RODENTS FROM CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

O.O. Burdo<sup>1</sup>, D.A. Vishnevsky<sup>2</sup>, A.I. Lipskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, [kruza@list.ru](mailto:kruza@list.ru)

<sup>2</sup> Chernobyl Radioecological Center, Chernobyl, Ukraine, [den\\_post@rambler.ru](mailto:den_post@rambler.ru)

Small rodents living in the Chernobyl exclusion zone were studied. In the areas with the highest values of the radiation factor, a high degree of cells loaded with micronuclei is recorded in the individuals of each species. This can be interpreted as genetic instability. There was found out a positive correlation between the specific activity in the carcasses of animals and Cytogenetic parameters.

#### ЧЕРНОБЫЛЬ, МАЛЫЕ ДОЗЫ РАДИАЦИИ И НАНОСТРУКТУРЫ

Е.Б. Бурлакова

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия, [radbio@sky.chph.ras.ru](mailto:radbio@sky.chph.ras.ru)

Прошло более 25 лет со дня аварии на Чернобыльской АЭС. В первые дни после аварии трудно было предположить, что ее последствия мы будем ощущать через четверть века. К сожалению, ни в ранние сроки после аварии, ни в последнее время научная общественность не была единой в осмыслении последствий этой катастрофы. В печати появились статьи о безвредности выброса милли-

онов Кюри радиоактивных элементов для здоровья населения, наблюдающиеся изменения в состоянии здоровья относили к радиофобии населения и т.д. Чернобыльская катастрофа является уникальной не только по масштабу – количеству выброшенных радионуклидов, площадям загрязненных территорий, коллективной дозе, полученной населением и работающими по ликвидации последствий аварии, но и в связи с необыкновенно сильным «йодным ударом» и наличием миллионов людей, получивших «малые дозы» радиации, считавшиеся абсолютно безопасными. Поэтому выяснение механизмов действия малых доз и их медико-биологических последствий является одной из фундаментальных проблем, решение которой необходимо для выработки научно обоснованных критериев радиационной безопасности.

К настоящему моменту взгляд на безопасность малых доз радиации изменился. За время, прошедшее после аварии, появились сотни публикаций, возникли новые журналы и научные общества, которые продолжают обсуждать механизмы и закономерности действия малых доз. Многочисленные исследования в России, Беларуси и Украине показали, что среди облученного населения, ликвидаторов последствий аварии и детей, проживающих на загрязненных территориях, заболеваемость по ряду болезней увеличилась после аварии в несколько раз. Особое внимание уделяется проблемам здоровья детского населения, подвергшегося действию радиации, а также детям ликвидаторов, у которых также было обнаружено ухудшение состояния здоровья. Ученые относят это к последствиям действия ионизирующей радиации.

В исследованиях, проведенных в ИБХФ РАН и подтвержденных в работах других ученых, выявлен ряд особенностей биологического действия малых доз радиации:

1) Малые дозы облучения активно влияют на метаболизм животных и человека.

2) В определенных интервалах доз низкоинтенсивное облучение более эффективно, чем острое.

3) Зависимость эффекта от дозы облучения может носить нелинейный, немонотонный, полимодальный характер.

4) Дозы, при которых наблюдаются экстремумы, зависят от мощности (интенсивности) облучения и снижаются при ее уменьшении.

5) Облучение в малых дозах приводит к изменению (в большинстве случаев к увеличению) чувствительности к действию повреждающих факторов.

Аналогичные закономерности были получены нами для биологически активных веществ (БАВ) в сверхмалых дозах (СМД) – вплоть до  $10^{-20}$  М. Если для объяснения самого факта действия БАВ и фи-

зических факторов в СМД в настоящее время высказано много различных гипотез, то для объяснения практически равной эффективности в дозах облучения, различающихся по величине на порядки, удовлетворительных представлений не имеется.

Мы обратили внимание на общность закономерностей в действии химических и физических агентов в СМД, с одной стороны, и поведения наноструктур – с другой. Было бы весьма важно рассмотреть, могут ли закономерности нанохимии быть применены для объяснения особенностей биологического действия низкоинтенсивных факторов. Необычные химические свойства частиц, состоящих из небольшого числа или нескольких десятков атомов и имеющих наноразмеры, требуют серьезной модификации представлений, развитых для систем, включающих тысячи и миллионы атомов. На многих объектах в физике, химии и биологии показано, что переход от макроразмеров к размерам 1-100 нм приводит к появлению качественных изменений в физико-химических свойствах отдельных соединений и получаемых на их основе систем. Особенно резкие изменения происходят в дозовых зависимостях. Наночастицы, или кластеры, обладают высокой активностью, и с ними в широком интервале температур возможно осуществление реакций, которые не идут с частицами макроскопического размера [1, 2]. В наночастицах значительное число атомов находится на поверхности, их доля растет с уменьшением размера частиц, и соответственно увеличивается вклад поверхностных атомов в энергию системы. Добавление даже одной молекулы в наночастицу может привести к потере ее характерных свойств. Действительно, например, дозовая зависимость физико-химических свойств наночастиц имеет полимодальный характер, как и для СМД химических и физических факторов. В биологических объектах поверхностью для образования зародышей новой структурной фазы и ее последующего роста могут быть биологические мембраны, позволяющие молекулам БАВ в СМД собраться и образовать новые структуры зародышевой фазы в тех случаях, когда их размеры и число атомов в наноструктуре отвечают требованиям нанонауки. Продукты радиационного воздействия на клетку при малых мощностях и дозах облучения возникают в сверхмалых концентрациях. В этих условиях образуются наноассоциаты, отличные по своему составу и свойствам от макроструктур. Таким образом, привлечение представлений об особенностях наноструктур позволяет объяснить целый комплекс закономерностей действия СМД физических и химических факторов, необъяснимых ранее, а именно:

1. Почему после первого максимума в зависимости доза–эффект наблюдается «мертвая зона» и эффект исчезает.

2. Почему возможна равная эффективность доз облучения и СМД БАВ при различии на порядки в их величинах.

3. Как объяснить появление новых свойств при СМД, которых нет у высоких доз.

4. Отчего изменяются температуры структурных переходов при сверхмалых воздействиях.

5. С чем связано возрастание токсичности при уменьшении дозы.

6. С чем связано изменение чувствительности биообъекта к действию различных физических и химических факторов после применения малых доз облучения и СМД БАВ.

Эти вопросы возникли в ходе экспериментальных исследований со сверхмалыми дозами низкоинтенсивного облучения. Если мы принимаем во внимание, что малые дозы приводят к возникновению новых структур, отличных по своим свойствам от тех структур, которые характерны для контроля или возникают при действии больших доз облучения, то это может объяснить указанные изменения.

В работе американских ученых [3], которые изучили влияние облучения на животных в дозах 10 и 200 мЗв, показано, что метаболические изменения, возникающие после облучения в этих двух дозах, были различны. Малые дозы (10 мЗв) затрагивают сигнальные системы, тогда как высокие – в основном системы, ответственные за синтез ферментов. В статье подробно рассматриваются реакции, индуцированные разными дозами, и сходство реакций, вызванных облучением в малых дозах, с процессами старения, болезнью Альцгеймера и падением когнитивной активности. Интересно отметить, что во всех случаях (старение, ухудшение памяти и умственной деятельности, болезнь Альцгеймера) процессы протекают на сниженном уровне антиокислительной активности липидов, что говорит о связи этих процессов с изменением скорости свободнорадикальных реакций в липидах и уменьшением количества природных антиоксидантов. Я думаю, что полезно обратить внимание на эти изменения и попытаться проверить, нельзя ли применить такой подход к лечению не только радиационно-индуцированных повреждений, но более широко – к лечению болезни Альцгеймера, воздействию на старение, влиянию на регуляторные процессы.

#### Литература

1. *Сергеев Г.Б.* Нанохимия. М.: КДУ, 2003. 288 с.
2. *Головин Ю.И.* Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2004. 493 с.
3. *Lowe X.R., Bhattacharya S., Marchetti F., Wyrobek A.J.* Early brain response to low-dose radiation exposure involves molecular networks and pathways associated with cognitive functions, advanced aging and Alzheimer's disease. Lawrence Berkeley National Laboratory // Radiation Research, 2009. Vol. 171. № 1. P. 53-65.

---

**CHERNOBYL, LOW DOSES OF RADIATION AND NANOSTRUCTURES****E.B. Burlakova**Emanuel Institute of Biochemical Physics, RAS, [radbio@sky.chph.ras.ru](mailto:radbio@sky.chph.ras.ru)

The mechanisms of biological effects of low doses of ionizing radiation and radiation of low intensity have been studied actively after Chernobyl disaster. Large number of hypotheses are proposed at present, but a number of new regularities found over the past years still need reliable explanations. The supposition is considered that regularities of nanochemistry can be applied to account for the peculiarities of biological effects of low-intensity factors.

---

**КАЧЕСТВЕННЫЕ ОТЛИЧИЯ РЕАКЦИИ  
НОРМАЛЬНЫХ ФИБРОБЛАСТОВ ЧЕЛОВЕКА  
НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В МАЛЫХ И ВЫСОКИХ ДОЗАХ****И.О. Вележанинов, Д.М. Шадрин, Я.И. Пылина, А.В. Пыстина,  
О.А. Шосталь, Е.С. Белых, А.В. Канева, О.В. Ермакова**Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[vellio@yandex.ru](mailto:vellio@yandex.ru)

Эффекты малых доз ионизирующего излучения и токсических агентов на живые системы многие десятилетия находятся в центре внимания радиобиологов и токсикологов. Актуальность изучения данной проблемы определяется тем, что живые организмы постоянно сталкиваются именно со слабыми стрессовыми воздействиями. Однако стохастичность и слабая выраженность эффектов не позволяют получить понятной законченной картины о закономерностях реакции клеток и организма на воздействие стрессовых факторов низкой интенсивности. Несмотря на это, исследователи не оставляют попыток найти универсальное объяснение возникновению нелинейности на кривых доза–эффект по параметрам повреждения ДНК и риска онкологии в области малых доз. Одной из таких попыток является гипотеза Pollycove и Feinendegen [2, 5], согласно которой нелинейность кривой доза–эффект формируется при сложении трех компонент: линейного прироста числа повреждений ДНК с дозой облучения, постоянного высокого фонового уровня повреждений эндогенного генеза и нелинейного ответа различных систем стресс-ответа клеток и организма. Несмотря на то, что первые две компоненты являются почти аксиомами, последняя порождает столько же вопросов, как и сама проблема в целом. Кроме того, накапливаются данные о специфических изменениях экспрессии генов в ответ на облучение в малых дозах, не проявляющих

ся при облучении в более высоких [1, 3, 4], что свидетельствует в пользу существования качественных отличий реакции клеток на облучение в малых и высоких дозах.

Мы поставили перед собой цель получить дополнительные данные, которые помогут разобратся в механизмах формирования нелинейности кривых доза–эффект при воздействии ионизирующего излучения в сверхмалых дозах путем сопоставления показателей повреждения ДНК, эффективности репарации и экспрессии 22 хорошо индуцируемых генов основных систем стресс-ответа при облучении нормальных фибробластов человека в диапазоне доз от 1 до 200 сГр.

В работе использовали нормальные фибробласты легких эмбриона человека (ФЛЭЧ-104, «БиолоТ», Санкт-Петербург, Россия). Уровень повреждения ДНК определяли с помощью щелочной версии метода ДНК-комет [6]. Клетки фиксировали в жидком азоте через 1, 5 и 240 мин. после облучения в дозах 1, 3, 5, 9, 12, 15, 20, 50, 100 или 200 сГр от источника  $^{60}\text{Co}$ . Эксперимент проводили в четырехкратной повторности с интервалом более чем в две недели. С каждой облученной культуры готовили по три препарата. На каждом препарате анализировали по 100 клеток. Средние значения момента хвоста по П. Оливе для отдельных препаратов использовали для статистического анализа с помощью t-критерия Стьюдента.

Уровень экспрессии генов определяли с помощью количественного ПЦР в реальном времени с этапом обратной транскрипции в культурах, фиксированных в жидком азоте через 240 мин. после облучения. Эксперимент выполняли в восьми повторностях, в каждой повторности проводили две ПЦР-реакции с праймерами для каждого гена. Экспрессию генов интереса выражали относительно средней геометрической экспрессии генов *GAPDH* и *ACTB*. Результат нормализовали на необлученный контроль. Статистический анализ производили с использованием критерия Уилкоксона для парно связанных выборок.

Уровень повреждений ДНК, детектируемых в первую минуту после облучения с помощью щелочной версии метода ДНК-комет, имел слабую зависимость от дозы в диапазоне от 1 сГр до 2 Гр. Достоверное изменение наблюдалось только в ответ на облучение в дозе 2 Гр. Тенденция к индукции повреждений наблюдалась при облучении в дозах 50 сГр и 1 Гр, а также 1 и 3 сГр. Спустя 5 мин. после облучения никаких дозовых зависимостей не наблюдалось, что говорит об эффективной репарации индуцированных одонитевых разрывов и АП-сайтов во всех вариантах (см. рисунок).

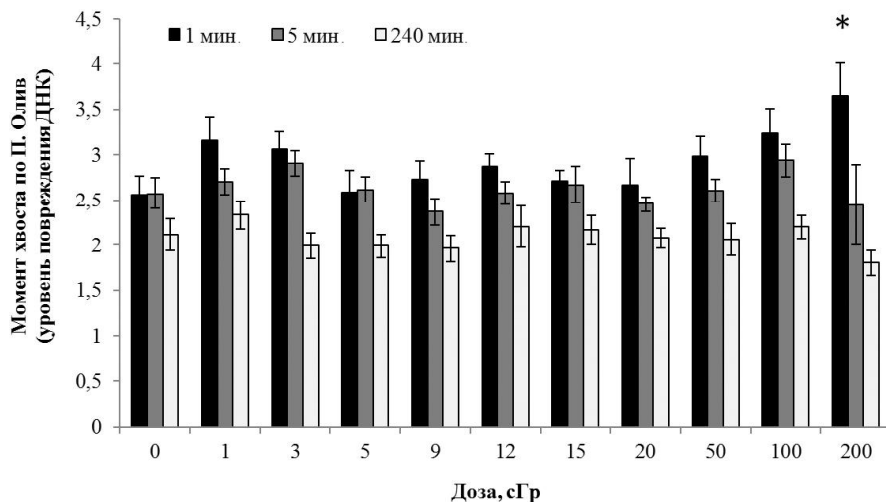
Очевидно, что разрешение метода и время жизни детектируемых им повреждений не позволили оценить эффективность репарации ДНК в данной серии экспериментов, однако нельзя оставлять



без внимания тенденцию к увеличению уровня повреждений в первую минуту после облучения в дозах 1 и 3 сГр, не наблюдаемую в диапазоне от 5 до 20 сГр.

Количество мРНК генов *p21*, *MDM2*, *GADD45A*, *XPC*, *DDB2* и *TNFSF10* статистически значимо изменялось только в ответ на облучение в дозах свыше 0.5 Гр, тогда как экспрессия гена *ATF3* возрастала как в ответ на большие дозы, так и после облучения в дозе 1 сГр. Самые неожиданные изменения экспрессии были обнаружены по генам регуляции клеточного цикла: Циклинам G1 (*CCNG1*) и G2 (*CCNG2*), а также гену детоксификации свободных радикалов и внутриклеточного сигналинга тиоредоксину (*TXN*). Количество мРНК этих генов статистически значимо снижалось в ответ на облучение в малых дозах (1 сГр для *CCNG1* и *CCNG2* и 1, 3 и 12 сГр для *TXN*) и оставалось неизменным при облучении в более высоких дозах (см. таблицу).

Таким образом, нами обнаружены новые доказательства качественных отличий реакции клеток на воздействие малых доз ионизирующего излучения. Кроме того, полученные данные указывают как минимум на четыре гена (*CCNG1*, *CCNG2*, *TXN*, *ATF3*), которые в дальнейших исследованиях помогут более глубоко понять механизмы специфических эффектов малых доз ионизирующего излучения, таких как гормезис, адаптивный ответ и гиперрадиочувствительность.



Уровень повреждения ДНК фибробластов человека ФЛЭЧ-104, детектируемый методом ДНК-комет (щелочная версия) через 1, 5 и 240 мин. после облучения в дозах от 1 до 200 сГр. \* – различия с контрольным значением достоверны при  $p < 0.05$  (t-критерий Стьюдента).

Относительная экспрессия генов стресс-ответа в клетках ФЛЭЧ-104  
через 4 ч после облучения в дозах от 1 до 200 сГр (значения относительно необлученного контроля)

Гены	Доза облучения										
	10 мГр	30 мГр	50 мГр	90 мГр	120 мГр	150 мГр	200 мГр	500 мГр	1 Гр	2 Гр	
APEX1	0.92±0.13	0.95±0.15	0.95±0.15	0.83±0.11	1.00±0.13	0.90±0.06	0.99±0.09	0.93±0.09	1.00±0.15	0.96±0.13	
ATF3	1.57±0.40*	1.13±0.21	1.09±0.21	1.12±0.15	1.09±0.15	1.18±0.12	1.00±0.07	1.53±0.14*	1.76±0.26*	2.13±0.25*	
BAX	0.96±0.11	0.89±0.07	0.92±0.08	0.94±0.08	0.96±0.09	0.94±0.08	0.99±0.07	1.00±0.08	1.05±0.15	1.02±0.10	
BBC3	1.03±0.24	0.93±0.17	0.94±0.16	0.95±0.27	0.84±0.12	0.93±0.12	1.14±0.23	0.79±0.07	0.82±0.08	1.31±0.16	
CCNE1	0.87±0.09	1.00±0.08	1.01±0.10	0.96±0.08	0.95±0.09	0.91±0.06	0.90±0.07	0.95±0.05	0.78±0.13	0.83±0.07	
CCNG1	0.82±0.06*	0.88±0.09	0.91±0.07	0.90±0.06	1.02±0.09	0.91±0.07	1.00±0.07	1.05±0.08	0.92±0.15	1.06±0.07	
CCNG2	0.87±0.05*	0.98±0.11	1.06±0.12	1.00±0.15	0.86±0.07	0.94±0.10	0.96±0.07	0.97±0.12	0.88±0.16	0.96±0.13	
CDKN1A	1.01±0.14	1.13±0.12	1.05±0.14	0.96±0.08	1.10±0.15	1.11±0.11	1.17±0.13	1.36±0.09*	1.53±0.26	2.12±0.18*	
c-FOS	1.31±0.22	0.87±0.15	1.00±0.17	0.86±0.11	0.79±0.13	0.94±0.14	0.86±0.16	1.24±0.38	1.29±0.37	1.48±0.20	
DBB2	1.08±0.16	0.80±0.13	0.91±0.09	1.00±0.06	1.14±0.11	0.89±0.11	1.04±0.14	1.21±0.08	1.13±0.18	1.38±0.07*	
DUSP1	1.30±0.29	1.05±0.16	1.21±0.19	0.96±0.14	1.10±0.13	1.07±0.08	0.96±0.10	1.18±0.16	1.84±0.43	1.58±0.32	
EGR1	1.92±1.04	0.91±0.24	0.89±0.17	0.96±0.15	0.98±0.16	1.05±0.22	0.90±0.12	1.03±0.13	1.90±0.88	1.75±0.65	
GADD45A	1.06±0.09	1.11±0.22	1.01±0.13	0.98±0.11	1.06±0.07	1.02±0.12	1.05±0.07	1.16±0.17	1.27±0.13	1.31±0.04*	
GSR	1.14±0.13	1.02±0.10	1.06±0.09	0.99±0.08	1.14±0.20	1.00±0.13	1.17±0.18	1.14±0.16	1.04±0.19	1.19±0.25	
IER5	1.28±0.23	1.20±0.10	1.07±0.20	0.90±0.06	1.37±0.24	1.09±0.13	1.25±0.22	1.23±0.13	1.36±0.26	1.38±0.19	
MDM2	0.95±0.09	0.95±0.13	0.92±0.14	0.99±0.07	1.14±0.11	1.11±0.13	1.10±0.07	1.34±0.14*	1.44±0.23	1.69±0.09*	
PBP74	1.11±0.17	1.07±0.10	1.18±0.17	1.20±0.13	1.04±0.09	1.12±0.11	0.95±0.10	1.23±0.06	1.13±0.17	1.01±0.07	
PCNA	0.92±0.13	0.90±0.12	0.93±0.16	0.81±0.12	1.00±0.16	0.90±0.11	0.93±0.11	0.94±0.04	0.90±0.18	1.10±0.16	
RAD52	1.09±0.23	1.06±0.11	1.07±0.23	1.10±0.15	1.30±0.29	1.03±0.12	1.23±0.22	1.11±0.17	1.03±0.20	1.22±0.20	
TNFSF10	1.20±0.18	0.98±0.20	1.48±0.36	0.97±0.16	1.16±0.18	0.89±0.09	1.02±0.15	1.25±0.18	1.13±0.22	1.45±0.26*	
TXN	0.37±0.16*	0.48±0.10*	0.74±0.27	0.86±0.25	0.64±0.08*	0.87±0.20	1.04±0.31	1.03±0.27	1.10±0.32	1.09±0.35	
XPC	1.05±0.13	1.07±0.12	1.05±0.12	1.01±0.04	1.18±0.11	1.09±0.08	1.16±0.14	1.17±0.08*	1.28±0.16	1.57±0.15*	

Примечание. \* Различия с необлученным контролем достоверны при  $p < 0.05$  (Критерий Уилкоксона).

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-04-01750 и молодежным научным грантом УрО РАН № 13-4-НП-180.

### Литература

1. *Ding L.H., Shingyoji M., Chen F.* et al. Gene expression profiles of normal human fibroblasts after exposure to ionizing radiation: a comparative study of low and high doses // *Radiat Res.*, 2005. Vol. 164. № 1. P. 17-26.
2. *Feinendegen L.E.* Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis // *The British Journal of Radiology*, 2005. № 78. P. 3-7.
3. *Franco N., Lamartine J., Frouin V.* et al. Low-dose exposure to gamma rays induces specific gene regulations in normal human keratinocytes // *Radiat Res.*, 2005. Vol. 163. № 6. P. 623-635.
4. *Nosel I., Vaurijoux A., Barquintero J.F., Gruel G.* Characterization of gene expression profiles at low and very low doses of ionizing radiation // *DNA Repair (Amst.)*, 2013. Vol. 12. № 7. P. 508-517.
5. *Pollycove M., Feinendegen L.E.* Radiationinduced versus endogenous DNA damage: possible effect of inducible protective responses in mitigating endogenous damage // *BELLE newsletter*, 2003. Vol. 11. № 2. P. 2-22.
6. *Tice R. R., Agurell E., Anderson D.* et al. Single cell gel/comet assay: guidelines for in vitro and in vivo genetic toxicology testing // *Environ. Mol. Mutagen*, 2000. № 35. P. 206-221.

### QUALITATIVE DIFFERENCES IN REACTION OF NORMAL HUMAN FIBROBLASTS TO RADIATION EXPOSURE AT HIGH AND LOW DOSES

I.O. Velegzhaninov, D.M. Shadrin, J.I. Pylina, A.V. Pystina, O.A. Shostal,  
E.S. Belych, A.V. Kaneva, O.V. Ermakova  
Institute of Biology, Komi Science Centre, Syktyvkar, Russia

DNA damage level of normal human lung fibroblasts after 1, 5 and 240 minutes after irradiation with doses of 1, 3, 5, 9, 12, 15, 20, 50, 100 and 200 cGy was analyzed using alkali comet assay. 240 minute after exposure at the same doses, the analysis of expression of 22 stress-response genes was performed by qRT-PCR. The specific decrease in the expression of *CCNG1*, *CCNG2* and *TXN* genes was shown only in response to low dose exposures. Two-peak association between expression of the *ATF3* gene and the radiation dose was also detected. Thus we have obtained new evidence of qualitative differences in the cellular response to low dose exposures of ionizing radiation.

## РОЛЬ МАКРОФИТОВ В ФОРМИРОВАНИИ РАДИАЦИОННОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЭМБРИОНОВ ПРЭСНОВОДНЫХ РЫБ

Е.Н. Волкова, В.В. Беляев, А.А. Пархоменко, С.П. Пришляк  
Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, Украина,  
[volkovaen@rambler.ru](mailto:volkovaen@rambler.ru)

В естественных водоемах на гидробионтов воздействует излучение радионуклидов, сосредоточенных в абиотических и биотических компонентах экосистемы, однако до настоящего времени не разработаны методологические подходы, позволяющие при расчетах учесть все возможные источники, составляющие суммарную дозу облучения организмов. Нашими исследованиями [2, 3, 5] и в работах других авторов [10, 11] показано, что облучение большинства видов пресноводных рыб в основном формируется излучением депонированных в донных отложениях радионуклидов. Тем не менее, нельзя не учитывать то, что многие виды пресноводных рыб выметывают икру непосредственно на растения, которые могут служить дополнительным источником облучения на ранней, наиболее радиочувствительной стадии развития организмов.

Цель работы – определить вклад излучения радионуклидов, накопленных в растительном субстрате, в формирование дозы облучения эмбрионов пресноводных рыб. Расчеты проведены на примере данных о содержании радионуклидов в абиотических и биотических компонентах Припятского отрога Киевского водохранилища за период 2010-2012 гг. [1, 2, 4].

В настоящее время радионуклидное загрязнение Киевского водохранилища формируют  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Содержание радионуклидов приводили в Бк/кг естественной влажности. Выражение «содержание радионуклидов в вегетирующей мягкой растительности» означает усредненные показатели содержания радионуклидов в зеленых нитчатых водорослях рода *Cladophora* и нескольких видах погруженных высших водных растений – рдесте гребенчатом, рдесте пронзеннолистом, урути колосистой, элодее канадской, роголистнике погруженном. Принадлежность рыб к экологическим группам по характеру размножения и развития, диаметр икринок приводили по литературным данным [6]. При разработке методики расчета дозовых нагрузок на эмбрионы рыб использовали справочные данные [7, 9, 12]. Поля излучения, создаваемые гамма-излучением радионуклидов, депонированных в донных отложениях, рассчитывали предложенными ранее методами [2, 3, 5] с учетом ослабления излучения водными массами по [7].

Большинство промысловых видов рыб Киевского водохранилища (лещ, плотва, густера, карась, линь, синец, судак, щука, сазан, сом и др.) по характеру размножения относятся к фитофильной группировке и используют в качестве нерестового субстрата вегетирующую мягкую растительность, а также корни и остатки отмерших макрофитов. Среди них есть виды, сочетающие свойства литофильных и фитофильных рыб, или относящиеся к субстрату индифферентно.

При расчетах дозы облучения эмбрионов рыб от радионуклидов, сосредоточенных в растительном субстрате, учитывали особенности распространения  $\beta$ ,  $\gamma$ -излучения в разных средах.  $\gamma$ -составляющую излучения от растений определяли путем расчета активности  $i$ -го радионуклида субстрата в объеме воды:

$$P = \sum C_{plan(i)} K d_{(i)(\gamma)}, \quad i = 1, k \quad (1)$$

$$C_{plan(i)} = A s_{plan(i)} / m_{wat}$$

где  $C_{plan(i)}$  – объемная активность субстрата Бк/л;  $A s_{plan(i)}$  – активность растений на единице площади (эквивалент плотности загрязнения поверхности), Бк/м<sup>2</sup>;  $m_{wat}$  – масса (объем) воды на единице площади нерестилищ, л/м<sup>2</sup>.

$\beta$ -составляющую излучения субстрата определяли следующим образом:

$$P_{\beta i} = 0.5 \cdot 86400 A_{mi} \langle E_i \rangle \rho_y / \mu_{yi} [1 - \exp(-\mu_{yi} y)] [1 - \exp(-\mu_{xi} x)] (\rho_x x)^{-1}, \quad (2)$$

где 86400 – коэффициент, учитывающий количество секунд в сутках;  $P_{\beta i}$  – мощность дозы, Гр/сут;  $A_{mi}$  – концентрация  $i$ -го радионуклида в субстрате, Бк/кг естественной влажности;  $\langle E_i \rangle$  – средняя энергия  $\beta$ -излучения  $i$ -го радионуклида, Дж/распад;  $\rho_y (\rho_x)$  – плотность субстрата (икры), кг/см<sup>3</sup>;  $\mu_{yi} (\mu_{xi})$  – коэффициент линейного ослабления  $\beta$ -излучения  $i$ -го радионуклида в субстрате (икре), см<sup>-1</sup>;  $y$  – толщина субстрата (растения), см;  $x$  – диаметр икринки, см.

При расчетах исходили из того, что толщина листовых пластинок погруженных растений составляет 0.05-0.2 мм (в среднем 0.1 мм) [6], отмерших стеблей рогоза и тростника – более 8 мм, фитомасса вегетирующей мягкой растительности достигает 0.3 кг/м<sup>2</sup>, диаметр икринок фитофильных рыб – 1-3 мм. Содержание <sup>90</sup>Sr в вегетирующей мягкой растительности составляло 2.5, <sup>137</sup>Cs – 50 Бк/кг, в отмершей растительности – 1.8 и 50 Бк/кг соответственно. Подставляя приведенные величины в формулы 1 и 2, получаем, что мощность дозы, создаваемой вегетирующей растительностью, составляет 15-34 нГр/сут., отмершей растительностью – 19-46 нГр/сут.

Для определения вклада водной растительности в суммарную дозу облучения эмбрионов рыб необходимо оценить дозы, создаваемые другими источниками. Дозу внутреннего облучения эмбрионов рыб (Pint) рассчитывали по формуле

$$P_{int} = \sum C_{f(i)} Kd_{(i)(\beta)} f_{(i)(\beta)}(x) \quad i = 1, k, \quad (3)$$

где  $C_{f(i)}$  – концентрация  $i$ -го радионуклида в икре рыбы, Бк/кг;  $Kd_{(i)(\beta)}$  – дозовый коэффициент  $i$ -го радионуклида ( $\beta$ -излучение), (Гр/сут.)/(Бк/кг);  $k$  – количество радионуклидов;  $f_{(i)(\beta)}(x)$  – коэффициент, учитывающий долю энергии  $\beta$ -излучения  $i$ -го радионуклида, реализующуюся в икринке диаметром  $x$ .

Коэффициент  $f_{(i)(\beta)}(x)$  рассчитывали, исходя из консервативного предположения о том, что вся активность  $i$ -го радионуклида сосредоточена в центре икринки. При этом было принято, что активность радионуклидов оплодотворенной икры рыб находится на уровне, зарегистрированном в гонадах и мышцах взрослых особей. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в упомянутых органах и тканях рыб Киевского водохранилища в среднем составляло 1 Бк/кг,  $^{137}\text{Cs}$  – 15 Бк/кг у мирных видов, 50 – у хищных. Такое содержание радионуклидов формирует дозу внутреннего облучения мощностью 54 нГр/сут. у мирных видов и 175 – у хищных.

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях нерестилищ Припятского отрога в среднем составляет 500 Бк/кг, что обуславливает мощность дозы  $\gamma$ -излучения на поверхности дна 1950 нГр/сут. Относящиеся к фитофильной группировке хищники – щука, судак и сом – используют в качестве нерестового субстрата отмершую растительность, находящуюся непосредственно на дне. Облучение эмбрионов этих видов в основном обусловлено излучением донных отложений, вклад растительного субстрата в суммарную дозу не превышает 2.5%. Часть мирных видов, таких как лещ, плотва, синец и густера, нерестятся на прогреваемых мелководьях, откладывая икру на вегетирующую растительность. При этом нерест совпадает с началом вегетации. Можно предположить, что эмбрионы этих видов развиваются на расстоянии 20-35 см от дна. В этом слое мощность дозы излучения радионуклидов донных отложений около 1000 нГр/сут. Следовательно, доза облучения эмбрионов этих видов, сформированная накопленными в растениях радионуклидами, составляет около 3%.

Некоторые фитофильные виды (карась серебряный, карась обыкновенный, линь, красноперка) нерестятся при температуре воды 20-26 °С, т.е. нерест совпадает с периодом активного увеличения биомассы высших водных растений. Поэтому икра может располагаться на расстоянии 50-70 см от дна, где излучение радионукли-

дов донных отложений ослабляется в 5-20 раз. Таким образом, за счет излучения депонированных в растительности радионуклидов может формироваться до 20% суммарной дозы облучения эмбрионов этих видов.

Проведенные расчеты показали, что на нерестилищах Припятского отрога Киевского водохранилища обусловленная депонированными в растениях радионуклидами мощность дозы облучения эмбрионов фитофильных рыб составляет 15-46 нГр/сут., что для большинства видов не превышает 3.5% суммарной дозы. Значительным, до 20% суммарной дозы, вклад излучения растительного субстрата может сформироваться для эмбрионов позднерестящихся рыб – карася серебряного, карася обыкновенного, линя и красноперки.

### Литература

1. *Беляев В.В., Холодько О.П., Волкова О.М.* та ін. Особливості радіонуклідного забруднення донних відкладів Київського водосховища // Современные проблемы гидробиологии. Перспективы, пути и методы решений: Материалы III Международной научной конференции. Херсон, ПП Вишемирський В.С., 2012. С. 136-139.
2. *Волкова Е.Н., Беляев В.В., Гончаренко Н.И.* Формирование дозовых нагрузок на рыб Киевского водохранилища // Гидробиол. журн., 2010. Т. 46. № 6. С. 75-82.
3. *Волкова Е.Н., Беляев В.В., Зарубин О.Л., Костюк В.А.* Особенности формирования дозовых нагрузок на рыб Каневского водохранилища // Ядерна фізика та енергетика, 2010. Т. 11. № 1. С. 82-85.
4. *Волкова Е.Н., Беляев В.В., Пришляк С.П.* и др. Особенности формирования радионуклидного загрязнения высших водных растений Киевского водохранилища // Ядерна фізика та енергетика, 2012. Т. 13. № 2. С. 160-165.
5. *Волкова О.М., Беляев В.В., Зарубин О.Л.* та ін. Формування дозових навантажень на риб водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка. Серія: Біологія. Спеціальний випуск: Гідробиологія, 2010. № 2(43). С. 61-64.
6. *Коблицкая А.Ф.* Изучение нереста пресноводных рыб. Методическое пособие. М.: Пищ. пром-ть, 1966. 110 с.
7. *Козлов В.Ф.* Справочник по радиационной безопасности. М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
8. *Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н.* Физиология высших водных растений. Киев: Наукова думка, 1988. 188 с.
9. *Немец О.Ф., Гофман Ю.В.* Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 416 с.
10. *Питкянен Г.Б., Зайцев Ю.А.* Особенности радиационных условий развития икры пресноводных рыб, относящихся к различным экологическим группам // Экология, 1977. № 6. С. 73-75.
11. *Рябов И.Н.* Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС: по материалам экспедиционных исследований. М., 2004. 215 с.

12. *Савинский А.К., Попов В.И., Кулямин В.А.* Спектры ЛПЭ и коэффициент качества инкорпорированных радионуклидов: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.

### THE ROLE OF MACROPHYTES IN THE FORMATION OF THE RADIATION DOSE EMBRYOS OF FRESHWATER FISH

**E.N. Volkova, V.V. Belyaev, A.A. Parhomenko, S.P. Prishlyak**  
Institute of Hydrobiology of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine,  
[volkovaen@rambler.ru](mailto:volkovaen@rambler.ru)

The features of the formation of the radiation dose fish embryos of the Kiev reservoir were studied. A method is described for calculating radiation doses to fish embryos from radionuclides, which concentrate in aquatic plants. The radiation dose fish embryos from  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  that have accumulated in the plants is 15-46 nGy/day. This represents 2.5% of the total dose rate of radiation on embryos of pike, pike-perch, catfish, roach, bream, blue bream, white bream and 10-20% of the total dose on goldfish, rudd and tench.

### ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОПУЛЯЦИЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

**П.Ю. Волкова, С.А. Гераськин**  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии  
Россельхозакадемии, Обнинск, Россия, [volkova.obninsk@gmail.com](mailto:volkova.obninsk@gmail.com)

Широкое распространение радиационных технологий в хозяйственной деятельности человека обусловило необходимость анализа биологических эффектов ионизирующего излучения в популяциях растений и животных и изучения путей миграции радионуклидов в природных экосистемах. Проведенные в различных компонентах природной среды радиоэкологические исследования показали, что лесные экосистемы играют важнейшую роль в поглощении и перераспределении радионуклидов, но в то же время отличаются высокой радиочувствительностью [1, 7, 13, 15].

Способность популяции адаптироваться к меняющимся условиям среды зависит, в частности, от величины генетического полиморфизма признаков, по которым идет отбор. Хроническое стрессовое воздействие может менять величину либо структуру внутрипопуляционной изменчивости [4, 8-10, 12, 16]. Поэтому анализ взаимосвязей генетического полиморфизма признаков и факторов внешней среды является перспективным с точки зрения разработки новых методов оценки состояния окружающей среды. Кроме того, он



вносит существенный вклад в понимание генетических основ дивергенции и адаптации популяций животных и растений в современных условиях.

Результаты исследований влияния малых доз хронического облучения на состояние природных популяций позволят в дальнейшем выработать научно обоснованные принципы и нормы допустимого техногенного воздействия на природные экосистемы.

Исследование проводили на территории Брянской области в Новозыбковском, Клинцовском и Красногорском районах, характеризующихся наибольшими уровнями радиоактивного загрязнения в результате Чернобыльской аварии. Было выбрано четыре экспериментальных участка, контрастные по уровню радиоактивного загрязнения, и один контрольный. Мощность дозы на участках варьировала от 7 до 130 мГр/год по сравнению с 0.14 мГр/год на контрольном участке.

Объектом исследования выбрали сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris* L.). Хвойные деревья отличаются высокой радиочувствительностью [6, 14], при этом радиочувствительность генеративных органов максимальна.

Для исследования техногенного загрязнения экспериментальных участков отбирали образцы почвы и биологического материала (шишек). Измеряли удельную активность радионуклидов и концентрации тяжелых металлов. Оценивали физико-химические характеристики почв.

Для анализа изоферментного полиморфизма в экспериментальных популяциях выбрали три фермента антиоксидантной системы: супероксиддисмутазу (SOD), глутатионпероксидазу (GPX) и глутатионредуктазу (GR). Анализ проводился в 7.5%-ном полиакриламидном геле на установках «PROTEAN II xi Cell» (США) и «Hoefer SE 600 Chroma» (Финляндия). Гистохимическое окрашивание гелей проводили в соответствии с рекомендациями [11]. После окрашивания зимограммы фотографировали для дальнейшего анализа.

Для определения ферментативной активности выбрали три ключевых фермента антиоксидантной системы – SOD, каталазу (CAT), пероксидазу (POD). Гомогенаты семян центрифугировали и сразу же анализировали с помощью бескуветного спектрофотометра NanoDrop-2000 (США) в соответствии с рекомендациями [2].

В исследуемых популяциях сосны супероксиддисмутазы контролируется тремя различающимися по электрофоретической подвижности локусами. Локусы SOD-2 и SOD-3 мономорфны на всех исследуемых участках, локус SOD-1 на участках ЗК и ЗП представлен двумя аллелями. У глутатионредуктазы был идентифицирован один полиморфный локус, у глутатионпероксидазы – три, но для анализа использованы два их них, обладающие наилучшим разре-

шением. При анализе в локусах GR и GPX-1 выявлено по два аллеля, а в локусе GPX-2 – три. На основании полученных данных оценена частота каждого аллеля в контрольной и экспериментальных популяциях. Выявлено, что в условиях антропогенной нагрузки повышается частота редких аллелей и увеличивается дисперсия выборки.

Оценили показатель фенотипического разнообразия Животовского, связанный с количеством аллелей в выборках: т.е. там, где полиморфизм ферментов высок, количество аллелей тоже велико. Локусы SOD-2 и SOD-3 мономорфны во всех популяциях, остальные локусы характеризуются средним уровнем изменчивости. Наиболее полиморфными являются популяции Заборье Поле и Заборье Кладбище. Индексы фенотипического разнообразия в этих популяциях значимо отличаются ( $r = 99\%$ ) от контроля. Таким образом, в условиях хронического облучения происходит увеличение среднего числа фенотипов в выборке, т.е. генетические процессы в исследуемых популяциях ведут к увеличению фенотипического разнообразия. Для детализации аллозимной структуры популяций оценили долю редких морф. Этот показатель увеличивается вместе с уровнем радиоактивного загрязнения ( $r = 74\%$ ).

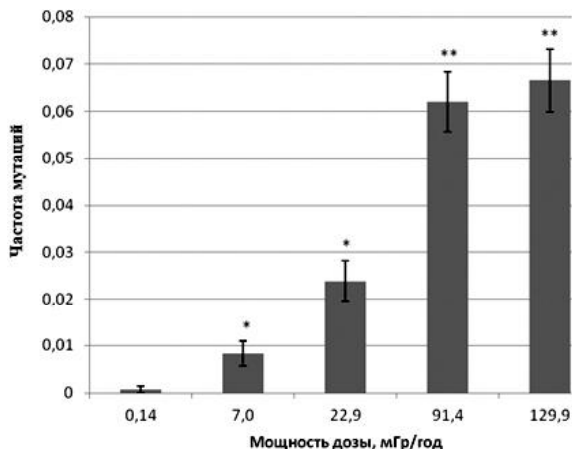
Оцененные по шести локусам трех ферментных систем величины наблюдаемой ( $H_o$ ) и ожидаемой ( $H_e$ ) гетерозиготности контрольной популяции близки к оценкам, полученным ранее для других видов сосен [5]. Качественно иная картина имеет место для наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности экспериментальных популяций, которые возрастают вместе с уровнем радиоактивного загрязнения участков ( $r = 99\%$ ,  $p < 0.01$ ).

Эффективное число аллелей  $n_e$  является мерой аллельного разнообразия локуса [3]. Хроническое радиационное воздействие приводит к увеличению эффективного числа аллелей по сравнению с контролем. Это связано с тем, что в хронически облучаемых популяциях сосны обыкновенной редкие аллели вносят больший вклад в аллельное разнообразие.

Оценили частоту трех типов мутаций – нуль-мутаций, дупликаций и изменений электрофоретической подвижности. Частота мутаций (рис. 1,  $r = 99\%$ ) значимо увеличивается вместе с ростом уровня радиоактивного загрязнения участков. Таким образом, хроническое радиационное воздействие в изученном диапазоне доз ведет к повышению частоты мутационных событий в популяциях сосны обыкновенной.

Данные по активности ферментов каталазы, супероксиддисмутазы, пероксидазы представлены на рис. 2. Значимое отличие от контроля демонстрирует каталаза на участке с мощностью дозы 22.9 мГр/год. Значимых изменений в активности супероксиддис-

Рис. 1. Общая частота мутаций в эндоспермах семян сосны обыкновенной (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ ).



мутазы не выявлено. Активность фермента пероксидазы снижается по сравнению с контролем на наиболее загрязненных участках. Супероксиддисмутаза характеризуется наименьшими значениями активности по сравнению с другими проанализированными ферментами.

В настоящей работе показано, что хроническое радиационное воздействие увеличивает общую частоту мутаций и долю редких аллелей в исследуемых популяциях. Но, поскольку мутационные события в семенах сосны обыкновенной относительно редки, они

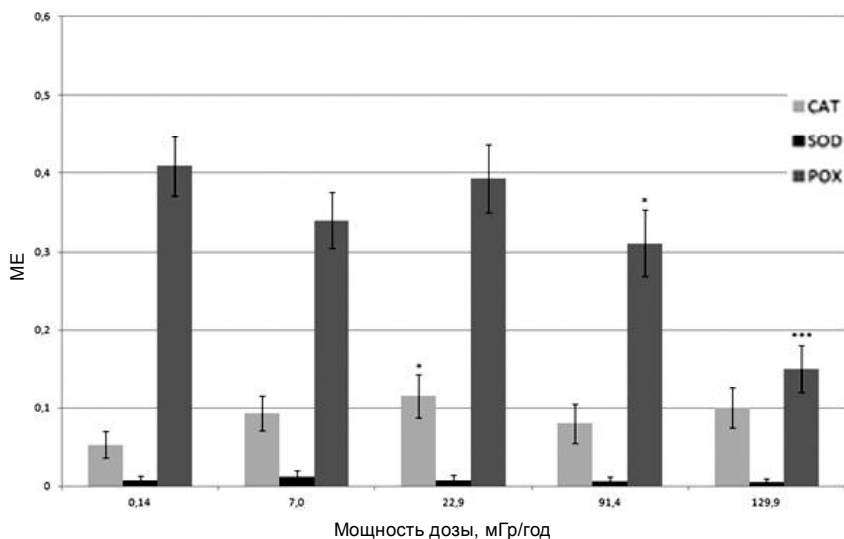


Рис. 2. Активность каталазы, супероксиддисмутазы и пероксидазы в популяциях сосны обыкновенной, развивающихся в условиях хронического радиационного воздействия (\*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ ).

не вносят значительного вклада в наблюдаемую активность ферментов. Для полного понимания процессов, происходящих в хронически облучаемых в столь низких дозах популяциях, необходим анализ эпигенетических характеристик геномов сосен.

В целом, проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на повышенную частоту мутаций изоферментных локусов и изменения в генетической структуре популяций, вынужденных развиваться в условиях хронического радиационного воздействия, существующих значений доз (7-130 мГр/год) недостаточно для формирования значимых изменений на организменном и популяционном уровнях.

### Литература

1. *Алексахин Р.М.* Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977. 144 с.
2. *Биссвангер Х.* Практическая энзимология. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. 328 с.
3. *Животовский Л.А.* Популяционная биометрия. М.: Наука, 1991. 271 с.
4. *Коршиков И.И., Духарев В.А., Котова А.А.* Аллозимный полиморфизм локусов GOT, GDH и SOD у сосны обыкновенной в условиях техногенной загрязненной среды // Цитология и генетика, 1991. Т. 25. № 6. С. 60-64.
5. Генетическая изменчивость сибирской кедровой сосны *Pinus sibirica* Du Tour. Сообщение IV. Генетическое разнообразие и степень генетической дифференциации между популяциями / *К.В. Крутовский, Д.В. Политов, Ю.П. Алтухов* и др. // Генетика, 1989. Т. XXV. № 11. С. 2009-2032.
6. *Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А.* Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
7. *Тихомиров Ф.А.* Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М.: Наука, 1972. 176 с.
8. *Шевченко В.А.* Радиационная генетика природных популяций. М.: Наука, 1992. 221 с.
9. Effects of chemical contaminants on genetic diversity in natural populations / *J.W. Bickham, S. Sandhu, P.D.N. Hebert* // *Mutat. Res.*, 2000. Vol. 4. P. 33-51.
10. *Hebert P.D.N.* Genetic effects of contaminant exposure – towards an assessment of impacts on animal populations // *Sci. Total. Environ.*, 1996. Vol. 191. P. 23-56.
11. *Manchenko G.P.* Handbook of detection of enzymes on electrophoretic gels / *Boka Raton (Florida): CRC Press*, 1994. 268 p.
12. Industrial pollutants tend to increase genetic diversity: Evidence from fird-grown european Scots pine / *W. Prus-Glowacki, A. Woljnicka-Poltorak, J. Oleksyn* // *Water, Air and Soil Pollution*, 1999. Vol. 116. P. 395-402.
13. *Sparrow A.H.* Prediction of the sensitivity of plants to chronic gamma irradiation // *Radiation Botany*, 1962. Vol. 2. P. 9-26.
14. Chromosomes and cellular radiosensitivity. I. The relationship of  $D_0$  to chromosome volume and complexity in seventy-nine different organisms / *A.H.*

*Sparrow, A.G. Underbrink, A.G. Sparrow // Radiation Research, 1967. Vol. 32. P. 915-945.*

15. *Woodwell G.M.* Design of the Brookhaven experiment on the effects of ionizing radiation on a terrestrial ecosystem // *Radiation Botany, 1963. Vol. 3. № 2. P. 125-133.*

16. *Wurgler F.E., Kramer P.G.N.* Environmental effects of genotoxins (ecogenotoxicology) // *Mutagenesis, 1992. Vol. 7. P. 321-327.*

### **GENETIC VARIABILITY OF PINUS SYLVESTRIS POPULATIONS INHABITING RADIOACTIVELY CONTAMINATED TERRITORIES**

**P.Yu. Volkova, S.A. Geras'kin**

Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia,  
[volkova.obninsk@gmail.com](mailto:volkova.obninsk@gmail.com)

Polymorphism of antioxidant enzymes system in pine populations of the contaminated areas of the Bryansk region was investigated. It was showed that increase of the dose rate at the experimental sites leads to significant increase in the frequency of mutations in isozyme loci, effective number of alleles, intrapopulation diversity, frequency of rare morphs and heterozygosity. Changes in the genetic structure of studying populations due to the occurrence of rare alleles and increase their frequency. Enzyme activity do not show dependence from radioactive contamination level.

---

### **ХРОНИЧЕСКОЕ РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОПУЛЯЦИИ РАСТЕНИЙ**

**С.А. Гераськин**

ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии РАСХН,  
Обнинск, Россия, [stgeraskin@gmail.com](mailto:stgeraskin@gmail.com)

В настоящее время общепризнано, что система нормирования радиационного воздействия на биоту должна быть ориентирована на защиту популяций. Поэтому исследования биологических эффектов в популяциях растений и животных, населяющих территории, контрастные по уровню и спектру дозообразующих радионуклидов, играют уникальную роль в развитии и обосновании принципов экологического нормирования. Особое внимание при этом следует уделять эффектам популяционного уровня, не сводимым к элементарным механизмам биологического действия радионуклидов, таким как феномен радиоадаптации, изменение половой, возрастной и генетической структур популяций. В докладе представлены результаты многолетних полевых исследований биологических эффектов в популяциях растений, населяющих контрастные по уровню радиоактивного загрязнения и спектру дозообразующих

радионуклидов участки (30-километровая зона ЧАЭС (Украина), Брянская и Ленинградская области России, Семипалатинский полигон (Казахстан). Развивающиеся в условиях радиоактивного загрязнения популяции растений характеризуются повышенной частотой генных и хромосомных мутаций. Даже относительно низкие уровни техногенного воздействия способны повышать величину генетической изменчивости и нарушать присущие интактным популяциям закономерности саморазвития. В условиях техногенного воздействия в популяциях происходит модификация структуры эколого-генетической изменчивости, степень которой увеличивается с возрастанием техногенной нагрузки. В условиях экологического стресса в популяциях растений происходит отбор на повышение устойчивости к действующему фактору. Но скорость и сама возможность осуществления этого процесса может существенно различаться в разных радиоэкологических условиях.

#### **EFFECTS OF CHRONIC RADIOACTIVE EXPOSURE ON PLANT POPULATIONS**

**S.A. Geras'kin**

Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia,  
[stgeraskin@gmail.com](mailto:stgeraskin@gmail.com)

Outcomes of long-term field studies of biological effects in plant populations inhabited areas (Chernobyl exclusion zone (Ukraine), Bryansk and Leningrad regions (Russia) and Semipalatinsk test site (Kazakhstan) contrasted in radioactive contamination and dose-forming radionuclides spectrum are presented.

---

#### **ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС ТКАНЕЙ ЖИВОТНЫХ, ОБЛУЧЕННЫХ ДОЗАМИ 0.5 И 1.0 ГР**

**А.И. Грицук, В.Т. Свергун, А.Н. Коваль**

Гомельский медицинский университет, Гомель, Беларусь,  
[svergun\\_vt@mail.ru](mailto:svergun_vt@mail.ru)

Под действием облучения интенсифицируются процессы образования активных форм кислорода, которые модифицируют молекулы липидов, белков и ДНК. В настоящей работе проведено исследование пострадиационных окислительных реакций в гомогенатах тканей печени, кишечника, почек, миокарда, мышц, и селезенки крыс, облученных дозами 0.5 и 1.0 Гр, мощностью 0.92 Гр/мин.

Животных брали в опыт на 3-, 10-, 30-, 60- и 90-е сут. после однократного ионизирующего излучения. В гомогенатах тканей органов (1:10) определяли интенсивность анти-прооксидантной активности по методу Т.В. Сирота [1]. Процесс автоокисления адреналина включает ряд последовательных стадий, в которых образуется и расходуется супероксидный радикал. Способность гомогенатов тканей ингибировать реакцию автоокисления адреналина оценивалась как антиоксидантная, а активация данной реакции как прооксидантная. Полученные данные обработаны с использованием методов непараметрической статистики и прикладной программы «Graf Pad Prism Demo».

Полученные результаты показали, что на третьи сутки после облучения в дозе 0.5 Гр скорость окислительных реакций увеличилась в гомогенатах всех тканей, но с разной степенью интенсивности. Так, в печени – в 2.2 раза, кишечнике – 5.9, мышце – 4.3, миокарде – 5.0, почках – 6.8 раз соответственно по отношению к контролю. При дозе 1 Гр на третьи сутки интенсивность автоокисления адреналина в гомогенатах тканей была менее выражена. Так, для печени увеличение составило 1.3 раза, кишечника – 3.8, мышц – 2.7, миокарда – 1.7, почек – 1.5 соответственно по отношению к контролю.

На 10-е сут. после однократного ионизирующего излучения в дозе 0.5 Гр повышенный уровень окисления сохранялся только в миокарде (увеличение в 4.9 раз) и почке (в 1.7). При дозе 1.0 Гр интенсивность окисления сохранялась только в мышцах (1.8 раза) и кишечнике (1.5).

На 90-е сут. после однократного воздействия ионизирующего излучения в дозе 0.5 Гр в почках интенсивность окисления увеличивалась в 9.3 раза по отношению к контролю и в 2.0 – при 1.0 Гр. В гомогенатах других тканей на 90-е сут. значительных изменений не отмечалось. В гомогенатах селезенки в отличие от других органов, на третьи и 10-е сут. после ионизирующего излучения, интенсивность автоокисления адреналина была достоверно ниже контрольных значений, возрастая только на 90-е сут.

Таким образом, в ответ на однократное ионизирующее излучение 0.5 и 1 Гр в тканях всех органов, кроме селезенки, отмечается однотипный характер окислительных реакций. Это выражается в виде пикового подъема интенсивности автоокисления адреналина при дозе 0.5 Гр на третьи сутки после воздействия.

#### Литература

1. Патент № 2144674 РФ, МПК7 G01N33/52, G01N33/68. Способ определения антиоксидантной активности супероксиддисмутазы и химических соединений / Т.В. Сирота: заявитель и патентообладатель Т.В. Сирота

№99103192/14; заяв. 24.02 1999; опубл. 20.01.2000, Б.И.П.М. 2000. № 2. С. 266.

## EVALUATION OF BIOLOGICAL EFFECTS OF LOW-DOSE IONIZING IRRADIATION ONTO ANTIOXIDANT STATUS OF ANIMAL TISSUES IRRADIATED WITH DOSES OF 0.5 AND 1.0 Gy

A.I. Gricuk, V.T. Svergun, A.N. Koval

Gomel State Medical University, Gomel, Belarus, [svergun\\_vt@mail.ru](mailto:svergun_vt@mail.ru)

After irradiation there are accelerated processes of reactive oxygen formation that modify lipids, proteins and DNA molecules. In this paper, a study of post-radiation oxidation reactions in liver, intestine, kidney, myocardium, muscle, and spleen tissues homogenates of rats irradiated with doses of 0.5 and 1 Gy. In response to a single ionizing irradiation there were marked similar character of oxidative reactions in the tissue homogenates of all organs examined. This results in a peak lift of oxidation intensity in dose 0.5 Gy 3 days after exposure.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТИОКСИДАНТНОЙ ЗАЩИТЫ *ALHAGI PSEUDALHAGI* (ВИБ.), ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО $\gamma$ -ОБЛУЧЕНИЯ

Э.С. Джафаров, А.К. Джафарлы, Г.А. Годжаева, Л.М. Гулиева

Институт радиационных проблем НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан, [e\\_dzhafarov@rambler.ru](mailto:e_dzhafarov@rambler.ru)

Как известно, в растениях под воздействием разных стрессоров развивается окислительный стресс, который сопровождается усиленным образованием активных форм кислорода (АФК). При этом антиоксидантная система защиты (АОСЗ) растений играет ключевую роль в защите метаболизма от повреждения. Как правило, в ответ на усиление образования АФК происходят как активация антиоксидантных ферментов: супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ) и аскорбатпероксидазы (АПО), так и накопление низкомолекулярных антиоксидантов, таких как антоцианы, каротиноиды и флавоноиды. Являясь компонентами единой антиоксидантной системы растений, низко- и высокомолекулярные антиоксиданты способны оказывать при этом взаимное влияние.

В настоящее время имеется незначительное количество работ по выяснению вклада различных компонентов в функционирование клеточной антиоксидантной системы. Проведенные в этом направлении исследования часто касаются отдельных элементов антиоксидантной защиты клетки [2, 3] и практически отсутствуют публи-



кации, в которых исследуется совместное функционирование антиоксидантных ферментов и аккумуляция низкомолекулярных антиоксидантов в условиях стресса.

Учитывая интерес к данной проблеме, мы попытались выяснить коррелятивные отношения между процессами функционирования антиоксидантных ферментов и стресс-зависимой аккумуляции низкомолекулярных антиоксидантов.

Объектами исследования были интактные листья верблюжьей колючки обыкновенной – *Alhagi pseudalhagi* (Vieb.). Выбор растения связан с тем, что оно является наиболее распространенным на выбранном нами участке, почва которого загрязнена разными природными радионуклидами. Сложившаяся на выбранном участке радиационная обстановка обусловлена деятельностью Бакинского завода по производству йода. Радиоспектрометрический анализ показал, что основными радионуклидами, загрязняющими опытные участки, являются  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ . В момент проведения исследований средняя мощность экспозиционной дозы на контрольном и на опытных участках составляла  $15.5 \pm 2.1$  и  $350 \pm 58$  мкР/ч соответственно. Удельные активности этих радионуклидов для почвы опытного участка составляли  $1440 \pm 419$ ,  $9143 \pm 946$  и  $139 \pm 33$  Бк/кг, а их удельные активности в почве контрольного участка имели значения, равные  $126 \pm 21$ ,  $72 \pm 19$  и  $37 \pm 11$  Бк/кг соответственно [4].

С выбором контрольного участка на территории завода мы добились, в какой-то мере, идентичности почвенно-климатических характеристик как импактных, так и контрольных участков. Пробы листьев для фиксации и извлечения пигментов брали в фазах всходов, развития и созревания растения. Для определения общего количества пигментов в пробах листьев растения использовали методику, разработанную в работах [1, 7]. Активности ферментов определяли по методике, представленной в работах [5, 6].

Полученные результаты (табл. 1) показывают, что разные фазы развития растения по содержанию антоцианов заметно отличаются. Если в фазе всходов замечается максимальное накопление антоцианов, то в фазах развития и созревания растения их количество резко уменьшается и остается почти постоянным до конца вегетационного периода. Что касается роли повышенного радиационного фона в процессе накопления антоцианов, то следует заметить, что ионизирующее излучение в летний период вегетации слегка подавляет, а в осенний период, наоборот, усиливает синтез этих пигментов.

В листьях растения во все периоды активной вегетации происходит постепенное изменение содержания флавоноидов (табл. 1). Наибольшее содержание в контрольном образце растения наблюда-

Таблица 1

**Фаза-зависимое изменение содержания пигментов  
в листьях *Alhagi pseudalhagi* (Bieb.)**

Концентрации пигментов, мкмоль/мл		Фазы вегетации		
		Всходы	Развитие	Созревание
Антоцианы	Контроль	12.3	0.5	0.4
	Опыт	11.1	0.5	2.0
Каротиноиды	Контроль	1.5	3.6	6.1
	Опыт	1.3	4.9	5.3
Флавоноиды	Контроль	2.8	2.5	2.4
	Опыт	2.2	2.9	3.1

ли в начале цветения, наименьшее – в период плодоношения. Наблюдаемое в контрольном образце максимальное значение в период всходов, в дальнейшем, постепенно снижается и становится минимальным в осенней вегетации. Для образца растения, произрастающего в зоне хронического облучения радиации, фиксировали иную картину. При этом в фазе плодоношения способность накапливать флавоноиды становится более интенсивной и отмечалась положительная динамика их накопления. Предполагаем, что к концу вегетационного периода, когда среда характеризуется более низкими освещенностью и температурой, растение вынуждено мобилизовать свой внутренний потенциал, что отражается в повышении флавоноидного состава. Другими словами, от фазы начала вегетации к фазе плодоношения радиоактивное излучение вместе с другими факторами окружающей среды играет роль стимулятора синтеза флавоноидов.

Как в опытном, так и в контрольном образцах растения по фенофазам ее развития отмечали постепенное увеличение содержания каротиноидов (табл. 1). Считаем, что подобные изменения можно связать с повышением защитной роли каротиноидов. Для многих растений со временем останавливается накопление биомассы и экстремальное воздействие окружающей среды выражается более ярко. Это, в свою очередь, отражается в росте содержания каротиноидов. При этом в опытном образце содержание каротиноидов изменяется неадекватно. Если в начальный и конечный периоды вегетации замечали уменьшение содержания этого пигмента, то в средний период влияние ионизирующего излучения приводило к усилению его синтеза.

Исследование роли антиоксидантных ферментов в защите растения от воздействия ионизирующего излучения показало, что активность СОД в листьях контрольного образца растения в фазе всходов по сравнению с другими фазами почти в два раза выше. В фазах

развития и созревания активность этого фермента для контрольного образца существенно не изменилась. При этом в листьях опытного растения активность СОД в фазах всходов и развития значительно снизилась, а в фазе плодоношения значение активности фермента не отличалось от величин контрольного варианта (табл. 2). Причиной снижения активности СОД в этот период развития растения может быть истощение пула ферментов усиленным его расходом на гашение супероксид радикалов или же следствием снижения синтеза или повышением деградации молекул СОД, поскольку активность СОД является результатом как ее синтеза, так и деградации.

В период вегетации для контрольного образца растения в активности КАТ отмечается тенденция к ее существенному увеличению. Кроме того, опытный образец растения во всех фазах ее развития характеризуются более высокой активностью фермента. При этом активность КАТ в фазах всходов и развития остается на стабильно высоком уровне. Интересно, что в период плодоношения КАТ в опытном образце проявляет наивысшую активность, т.е. повреждающее воздействие ионизирующего излучения вызывает существенное повышение активности фермента уже в начале вегетационного периода, а в конце наблюдаемый эффект усиливается (табл. 2). Предполагаем, что увеличение активности фермента при различных стрессовых воздействиях может быть обусловлено активацией его латентных форм или синтезом новых молекул фермента. Следует также предположить, что очень высокая активность каталазы после повреждающих воздействий могла компенсироваться весьма низкой активностью СОД, наблюдаемой нами.

Таким образом, на отдельных стадиях наших экспериментов проявлялась своеобразная «взаимозаменяемость» каталазы и СОД: при повышенных значениях активности каталазы отмечалась пониженная активность СОД и наоборот.

Таблица 2

**Фаза-зависимое изменение активности антиоксидантных ферментов в листьях *Alhagi pseudalhagi* (Bieb.)**

Активности ферментов		Фазы вегетации		
		Всходы	Развитие	Созревание
СОД, %	Контроль	87	34	40
	Опыт	50	15	38
КАТ, мкмоль/г·мин	Контроль	0.01	0.03	0.09
	Опыт	0.26	0.26	0.52
АПО, мкмоль/г·мин	Контроль	5.21	5.58	9.62
	Опыт	5.42	1.29	5.35

Интересно, что динамика изменения активности АПО для контрольного образца согласуется с динамикой развития растения, т.е. в процессе онтогенеза с развитием растения отмечается тенденция к ее увеличению. В фазе плодоношения фермент демонстрирует наивысшую активность (увеличение примерно в два раза). Для опытного образца характерна иная картина: в фазе развития активности АПО резко падает, а в фазе плодоношения равняется активности, которую растение имеет в фазе всходов (табл. 2).

Таким образом, если ионизирующее воздействие сначала приводило к значительному понижению активности АПО, то в дальнейшем, вызывая повышение его активности, оно способствовало сохранению активности фермента после повреждающих воздействий на более высоком уровне. Вероятно, что засуха и низкая температура в период плодоношения, которые характерны для данной местности, тоже сыграли определенную роль.

Проведенные исследования показали, что *Alhagi pseudalhagi* (Vieb.) обладает толерантностью к действию сверхмалых доз радиационного облучения. При этом устойчивость растения коррелировала с суммарным содержанием фенольных соединений. Среди них наибольший вклад в защитный ответ вносили антоцианы и каротиноиды, содержание которых в условиях хронического облучения радиации значительно выросло. Флавоноиды при этом вносили менее заметный вклад в увеличение суммарного содержания низкомолекулярных соединений. Активности антиоксидантных ферментов были более или менее постоянными. Наблюдали небольшое уменьшение активности пероксидазы и супероксиддисмутазы. Исключением составляла каталаза, активность которой значительно возросла. Такая динамика может свидетельствовать о более эффективном участии низкомолекулярных соединений в защитном ответе, чем ферментов-антиоксидантов.

#### Литература

1. Ломбаева С.С., Танхева Л.М., Оленников Д.Н. Методика количественного определения суммарного содержания флавоноидов в наземной части Ортилии однобокой (*Orthilia sekunda* L. House) // Химия растительного сырья, 2008. № 2. С. 65-68.
2. Ху Ю.Ф., Луу Ж.П. Ферменты антиоксидантной защиты и физиологические характеристики двух сортов топинамбура при солевом стрессе // Физиология растений, 2008. Т. 55. № 6. С. 863-868.
3. Fang W.-C., Kao C.H. Enhanced peroxidase activity in rice leaves in response to excess iron, copper, and zinc // Plant Science, 2000. Vol. 158. P. 71-76.
4. Jafarov E.S. The radio ecological problems created in the Absheron peninsula by the oil extraction and production // Radiation safety problems

in the Caspian region. NATO Advanced Research Workshop. Baku, 2003. P. 50.

5. Kumar C.N., Knowles N. Changes in lipid peroxidation and lipolytic and free-radical scavenging enzyme during aging and sprouting of Potato (*Solanum tuberosum* L.) seed tubers // Plant Physiology, 1993. Vol. 102. P. 115-124.

6. Nakano Y., Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts // Plant and Cell Physiology, 1981. Vol. 22. № 5. P. 867-880.

7. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sensing of Environment, 2002 Vol. 81. № 2-3. P. 337-354.

**STUDY OF CORRELATIVE FUNCTIONING OF COMPONENTS ANTIOXIDANT PROTECTION SYSTEM ALHAGI PSEUDALHAGI (BIEB.), GROWS IN CONDITIONS OF CHRONIC  $\gamma$ -IRRADIATION**

**E.S. Jafarov, A.K. Jafarli, G.A. Qojayeva, L.M. Guliyeva**

Institute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

Features of the accumulation of anthocyanins, flavonoids and carotenoids in leaves *Alhagi pseudalhagi*, growing in conditions of chronic  $\gamma$ - irradiation, has been investigated. Was determined in parallel the activity of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase, catalase and ascorbate peroxidase. It is shown that as a component of the antioxidant system of plants low and high molecular antioxidants can function mutually. While the increase in the content of one component may be accompanied by a simultaneous decrease in the other.

**МОНИТОРИНГ ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОМАТИЧЕСКОГО МУТАГЕНЕЗА МЛЕКОПИТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО НИЗКОДОЗОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

**С.А. Костенко<sup>1</sup>, Е.В. Федорова<sup>1</sup>, П.П. Джус, Ю.Ф. Курыленко<sup>1</sup>, С.Н. Сушко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина, [swetakostenko@mail.ru](mailto:swetakostenko@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

После аварии на ЧАЭС часть территории Украины, России, Белоруссии остается загрязненной радионуклидами. В 30-километровой зоне отчуждения ЧАЭС для обеспечения хозяйственных нужд используют сельскохозяйственных животных [1, 2]. Хроническое облучение в малых дозах – постоянно действующий экологический фактор на отдельных территориях, который приводит к существенной дестабилизации генома клеток облученных животных и может

выступать в роли косвенного индуктора заболеваний стохастической природы, о чем свидетельствует повышенный уровень онкологической заболеваемости в радиационно загрязненных районах Украины [3, 4].

Среди животных наиболее радиочувствительным классом являются млекопитающие, поэтому важным аспектом стало определение радиочувствительности у разных видов млекопитающих, содержащихся в условиях повышенного радиационного влияния [5].

В связи с этим цель наших исследований – цитогенетический мониторинг млекопитающих, с разных радиоэкологических условий обитания.

Исследовали животных четырех видов, которых содержали в условиях хронического низкодозового облучения: *Bos taurus* (коровы СГДК «Мрия» Иванковского района Киевской области,  $n = 12$ ; 24-96 мкР/ч), *Sus scrofa* (свиноматки ТОВ Шпыли Иванковского района Киевской области,  $n = 15$ ; 96 мкР/ч), *Equus caballus* (лошади, которых используют в Лубянском лесничестве «Чернобыльская пуца», пожарная часть «Чернобыль»,  $n = 6$ ; 25 мкР/ч), *Mus musculus* (лабораторная линия мышей Af, подвергшихся воздействию хронического низкодозированного облучения в заповеднике с. Масаны Хойникского района Гомельской области Белоруссии,  $n = 5$ ; 3.3 мкГр/ч). Контролем служили животные *Bos taurus* ГПОХ «Гонтаровка» Волчанского района Харьковской области ( $n = 20$ ; 8-16 мкР/ч), *Sus scrofa* Волынской области ( $n = 10$ ; 11-15 мкР/ч), а также *Equus caballus* украинской верховой породы, которые проходят испытания на Киевском государственном ипподроме ( $n = 5$ ; 11-15 мкР/ч). Цитогенетические препараты готовили по стандартной методике [6]. Учитывали следующие цитогенетические показатели: частоту делящихся клеток (митотический индекс, МИ), двухъядерных клеток (ДЯ), клеток с микроядрами (МЯ) на 1 тыс. клеток. У каждого животного анализировали не меньше 3 тыс. клеток с сохраненной цитоплазмой. Статистическую обработку данных проводили при использовании  $t$ -критерия Стьюдента.

Данные, представленные на рис. 1-3, свидетельствуют о том, что в условиях контроля показатели цитогенетической изменчивости исследуемых животных соответствовали параметрам, характерным для млекопитающих, воспроизводящихся в промышленных регионах [7-10]. Микроядерный анализ свидетельствует о статистически достоверном увеличении частоты клеток с микроядрами у всех видов животных, подвергавшихся хроническому низкодозовому облучению по сравнению с контролем. У коров выявили  $4.4 \pm 0.96\%$  (контроль –  $2.64 \pm 0.29$ ) клеток с МЯ, свиноматок –  $7.13 \pm 0.82$  ( $2.12 \pm 0.30$ ), лошадей –  $3.67 \pm 0.69$  ( $1.2 \pm 0.25$ ), мышей –  $5.9 \pm 1.03$  (контроль  $4.20 \pm 0.16$ ). Полученные нами сведения о повыше-

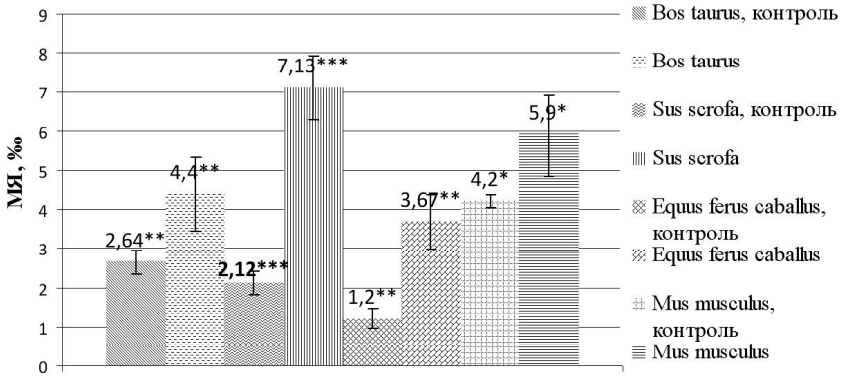


Рис. 1. Частота клеток с МЯ в разных радиоэкологических условиях, %.  
Здесь и в рис. 2, 3: \* при  $-0.99 > p > 0.95$ ; \*\* при  $0.999 > p > 0.99$ ; \*\*\* при  $p > 0.999$ .

нии частоты клеток с МЯ у животных, которые содержались в условиях хронического низкодозового облучения, совпадают с данными других авторов [8, 9, 11]. Это свидетельствует о том, что повышение частоты клеток с МЯ является невидоспецифичной реакцией кариотипа на хроническое низкодозовое ионизирующее облучение. Выявлены различия между МЯ облученных животных разных видов. Так, у свиней обнаружено статистически достоверное превышение частоты клеток с МЯ по сравнению с лошадьми и

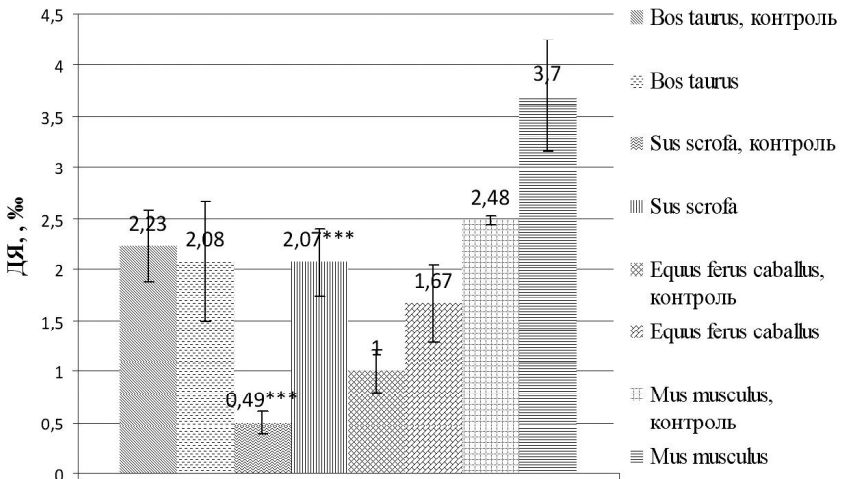


Рис. 2. Частота клеток с ДЯ в разных радиоэкологических условиях, %.

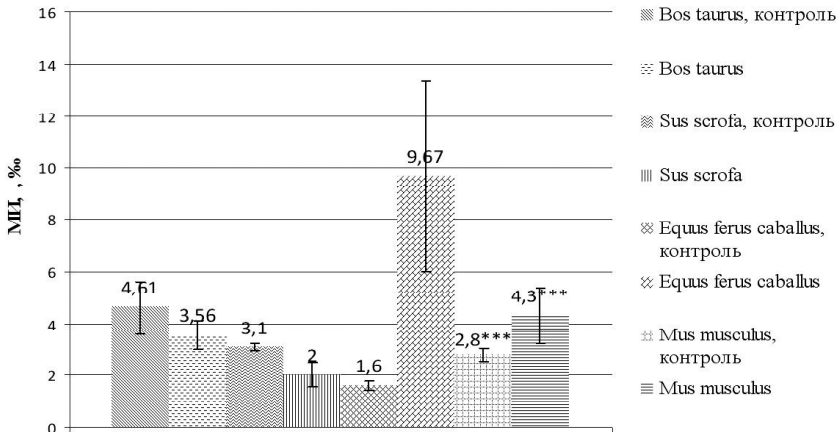


Рис. 3. Митотический индекс в разных радиозокологических условиях, %.

коровами. Эти различия могут быть связаны как с дозовой нагрузкой, так и особенностями их метаболизма, которые обуславливают устойчивость кариотипа.

По количеству двухъядерных клеток у животных с разных радиозокологических условий обитания достоверные различия были выявлены только у *Sus scrofa* –  $2.07 \pm 0.33$  (контроль  $0.49 \pm 0.11\%$ ). Для мышей выявлено повышение митотического индекса у облученных животных по сравнению с контролем.

Работа выполнена в рамках проекта № Ф55/006 Россия-Украина-Белоруссия.

### Литература

1. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Алексахин Р.М. Воздействие аварийного выброса ЧАЭС на биоту // Радиационная биология. Радиационная экология, 2006. Т. 46. № 2. С. 213-222.
2. Яблоков А.В. Миф о безопасности малых доз радиации // Центр экологической политики России. Программа по ядерной и радиационной безопасности СоЭС. М., 2002. 178 с.
3. Сердюк А.М. Медико-экологические последствия Чернобыльской катастрофы // Врачебное дело, 1997. № 1. С. 3-9.
4. Дьоміна Е.А. Вплив опромінення на виникнення злоякісних новоутворень у ліквідаторів аварії на ЧАЕС // Пробл. екол. та мед. генетики і клін. імунології, 2001. Вип. 1 (33). С. 68-75.
5. Юшкевич Е.А. Влияние Чернобыльской катастрофы на развитие сельскохозяйственного производства // Тезисы докладов II Международной конференции «Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов». Тюмень, 2011. С. 60-62.
6. Шельов А.В., Дзюцюк В.В. Методика приготування метафазних хромосом лімфоцитів периферійної крові тварин: метод рекомендації науко-



вих досліджень із селекції, генетики та біотехнології. Київ: Аграрна наука, 2005. 240 с.

7. *Кочнева М.Л., Петухов В.Л.* Межвидовая изменчивость цитогенетических параметров крови животных // Достижения в генетике, селекции и воспроизводстве сельскохозяйственных животных: Матер. конф. СПб., 2009. Ч. 2. С. 133-136.

8. *Стародуб Л.Ф.* Нестабильность генома – один из путей эволюции кариотипа у крупного рогатого скота // Современные проблемы эволюционной биологии: Матер. Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 200-летию со дня рожд. Ч. Дарвина и 150-летию выхода в свет «Происхождения видов». Брянск, 2009. Т. 11. С. 278-282.

9. *Сафонова Н.А., Глазко Т.Т.* Меж- и внутривидовая цитогенетическая нестабильность у крупного рогатого скота // Збірник наукових праць Інституту агроєкології та біотехнології УААН, 2000. № 4. С. 198-209.

10. *Колубасва С.Н.* Хромосомные аберрации, микроядра и апоптоз в лимфоцитах при радиационных воздействиях и других патологических состояниях: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Обнинск, 2010. 39 с.

11. *Cea Guidle, Etcheberey K.F.C., Dulton F.N.* Induction in micronuclei in mouse bone marrow cells by the flavonoid // Mutat. Res., 1983. Vol. 119. № 3. P. 339- 345.

#### MONITORING OF CYTOGENETIC INDEXES OF SOMATIC MUTAGENESIS IN MAMMALS UNDER CHRONIC LOW DOSE IRRADIATION

S.A. Kostenko<sup>1</sup>, E.V. Fyedorova<sup>1</sup>, P.P. Dzhus<sup>1</sup>, Yu.F. Kurylenko<sup>1</sup>, S.N. Sushko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, [swetakostenko@mail.ru](mailto:swetakostenko@mail.ru)

<sup>2</sup> Institute of Radiobiology of NAS of Belarus, Gomel, Belarus

Increase in frequency of cells with micronuclei is not a species specific reaction of a karyotype on chronic low dose ionising radiation. Differences in micronuclei among different animal species were found.

---

#### ВОДНОЕ РАСТЕНИЕ *ELODEA CANADENSIS* КАК БИОИНДИКАТОР РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ ЕНИСЕЙ

М.Ю. Медведева, А.Я. Болсуновский  
Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия,  
[medvedeva\\_m79@mail.ru](mailto:medvedeva_m79@mail.ru)

Река Енисей – одна из крупнейших рек мира – загрязнена техногенными радионуклидами в результате деятельности Горно-химического комбината Росатома (ГХК, г. Железногорск), производившего оружейный плутоний. Ранние исследования проб гидробионтов и донных отложений реки Енисей, отобранных вблизи сбросов ГХК в 1999-2009 гг., выявили широкий спектр техногенных

радионуклидов, включая трансурановые элементы [2, 5]. Спустя три года после остановки атомного реактора на ГХК (в апреле 2010 г.) уровень радиоактивного загрязнения р. Енисей значительно снизился, однако в настоящее время продолжает действовать радиохимический завод и другие производства ГХК. В донных отложениях р. Енисей накоплена значительная активность долгоживущих радионуклидов, которые могут вызывать загрязнение водных растений. Поэтому необходимы постоянный мониторинг радиоактивного загрязнения на данном участке р. Енисей и оценка состояния водных организмов. Погруженное водное растение *Elodea canadensis* Michx (элодея канадская) широко распространено на Енисее и является удобным объектом для биоиндикации техногенных загрязнений водных экосистем.

Цель работы – провести цитогенетический анализ корневых меристем элодеи из р. Енисей в зоне влияния ГХК и выявить возможную связь между хромосомными нарушениями в клетках и уровнем радиоактивного загрязнения исследуемых районов.

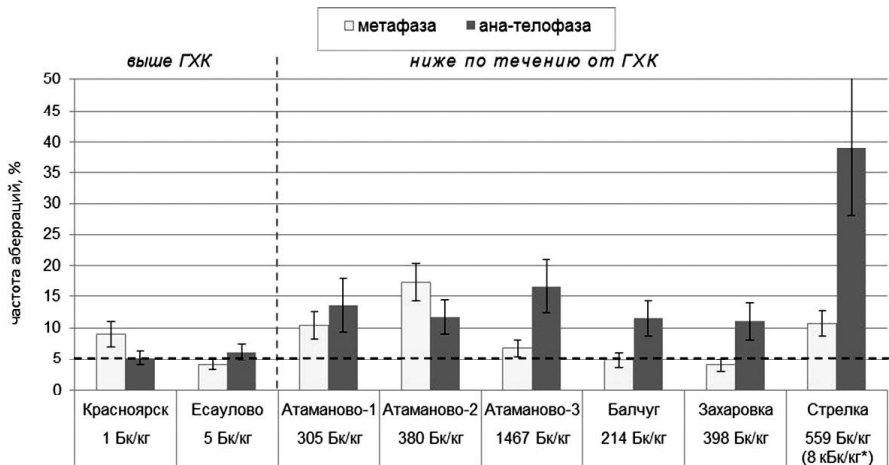
Пробы элодеи и верхний слой донных отложений отбирали в пойменной зоне р. Енисей в летне-осенний период 2012 г. Была исследована как ближняя зона влияния ГХК (Атаманово-1-3 – от 0.5 до 6.0 км вниз по течению реки от ГХК; Балчуг – 15 км от ГХК), так и на расстоянии до 250 км от ГХК (Захаровка – 198, Стрелка – 250 км от ГХК соответственно). В качестве контрольных проб были взяты образцы элодеи из районов выше по течению р. Енисей от ГХК – район поселков Удачный (выше г. Красноярск) и Есаулово (в 45 км ниже г. Красноярск). Район пос. Есаулово испытывает влияние только промышленно-бытовых сбросов г. Красноярск (нерадиоактивных).

Для цитогенетического анализа молодые корешки элодеи фиксировали в уксусном спирте и окрашивали 1% -ным ацеорсеином по стандартной методике [1]. Частоту хромосомных aberrаций оценивали на стадиях мета- и ана-телофазы клеточного цикла, в процентах к общему числу делящихся клеток. В спектре хромосомных aberrаций выделяли: мосты, нарушения расхождения хромосом (выбросы за пределы веретена деления, отставание и преждевременное расхождение хромосом), аномалии митоза (многополюсный, ассиметричный), кольцевую хромосому, остаточное ядрышко и агглютинацию.

В сухой биомассе элодеи и донных отложениях определяли активность  $\gamma$ -излучающих радионуклидов на  $\gamma$ -спектрометре («Canberra», США) со сверхчистым германиевым детектором. Спектры анализировали с помощью программного обеспечения Genie-2000 (Canberra, США).

В контрольных районах р. Енисей основной вклад в суммарную активность проб элодеи и донных отложений дают естественные радионуклиды (в основном  $^{40}\text{K}$ ). При этом содержание техногенного  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях не превышало фоновый уровень для р. Енисей – до 5 Бк/кг, в биомассе элодеи – до 0.6. Донные отложения, собранные ниже по течению от ГХК, содержали до семи техногенных радионуклидов, в том числе трансурановый  $^{241}\text{Am}$  (Атаманово-3). В этом же районе зарегистрирована максимальная активность  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях –  $750 \pm 30$  Бк/кг. Побеги элодеи из ближней зоны ГХК содержали долгоживущие радионуклиды –  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  с активностями до 50 Бк/кг. Далее по течению р. Енисей от ГХК удельная активность радионуклидов в пробах элодеи и донных отложений снижалась, однако в районах Захаровки и Стрелки были отмечены отдельные «пятна» с аномально высокими активностями  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях (до 8 кБк/кг в районе пос. Стрелка).

Цитогенетический анализ корневых меристем элодеи из зоны влияния ГХК показал достоверное увеличение частоты хромосомных aberrаций на стадии ана-телофазы во всех исследованных образцах, по сравнению с контрольными пробами (см. рисунок). Так, если частота aberrаций в ана-телофазных клетках элодеи из конт-



Частота хромосомных aberrаций в клетках апикальной корневой меристемы *Elodea canadensis* на стадиях метафазы и анафазы-телофазы (%), среднее  $\pm$  95% довер. инт.) из различных районов р. Енисей, а также сумма техногенных  $\gamma$ -радионуклидов в донных отложениях исследуемых районов (Бк/кг).

\* В районе пос. Стрелка обнаружены участки донных отложений с активностью  $\gamma$ -радионуклидов до 8 кБк/кг.

рольных районов была на уровне 5.2-6.2%, то в клетках элодеи из ближней зоны ГХК она достигала значений 11.8-16.7% (Атаманово-1-3). Максимальная частота aberrаций (39.0±5.7%) зарегистрирована в пробе элодеи из района пос. Стрелка (250 км от ГХК), где были выявлены участки с аномально высоким содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях. Показана положительная зависимость частоты aberrантных ана-телофаз в меристеме элодеи от суммарной активности техногенных  $\gamma$ -радионуклидов в донных отложениях исследованных районов р. Енисей ( $r = 0.89$ , достоверно при  $p < 0.05$ ), а также от содержания  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях ( $r = 0.96$ ). Достоверное возрастание частоты хромосомных мутаций на стадии метафазы по сравнению с контрольным уровнем (4.1-9.0%) наблюдалось только вблизи ГХК (10.4 и 17.1% – Атаманово-1 и 2 соответственно), а также в районе аномалии на Стрелке (10.7%).

Отмечено расширение спектра хромосомных нарушений в меристемах элодеи из районов влияния ГХК по сравнению с пробами из контрольных районов. В ближней зоне ГХК (Атаманово-1-2), а также в районе пос. Стрелка, возрастала частота появления клеток с агглютинацией (слипанием) хромосом в мета- и ана-телофазе, что является признаком высокой генотоксичности окружающей среды для растения. Также в отмеченных районах в три-шесть раз увеличилась частота появления мостов в клетках элодеи, по сравнению с пробами элодеи из Есаулово. Была показана положительная корреляция частоты встречаемости мостов в клетках элодеи с содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях исследуемых районов ( $r = 0.96$ , достоверно при  $p < 0.05$ ), а также с суммой техногенных  $\gamma$ -радионуклидов в донных отложениях ( $r = 0.89$ , достоверно при  $p < 0.05$ ).

Не только вблизи ГХК, но и в дальней зоне р. Енисей в клетках элодеи обнаружены кольцевые хромосомы с частотой до 0.2% от суммы клеток, в то время как в клетках элодеи из контрольных районов они не зарегистрированы. Кольцевые хромосомы образуются в результате неправильного воссоединения двухнитевых разрывов ДНК и, как правило, сопровождаются образованием фрагментов хромосомы. Нередко их появление связывают с действием радиационного фактора [3]. В меристемах элодеи из районов Балчуга и Стрелки отмечено возрастание частоты остаточных ядрышек на стадиях мета- и ана-телофазы (до 0.74%), по сравнению с образцами элодеи из других районов. Считается, что появление остаточных ядрышек в митозе компенсирует нехватку рибосомальной РНК и может стабилизировать одиночные разрывы хромосом [4].

В апикальной корневой меристеме *Elodea canadensis* из районов р. Енисей, подверженных радиоактивным сбросам ГХК, наблюдалось достоверное возрастание частоты патологических митозов и

изменение спектра хромосомных aberrаций (возрастание частоты мостов, агглютинаций хромосом и клеток с множественными aberrациями; появление кольцевых хромосом и остаточных ядрышек в делящихся клетках) по сравнению с контрольными районами. Факт радиационного воздействия подтверждается положительной корреляционной взаимосвязью между суммарной активностью техногенных радионуклидов в донных отложениях р. Енисей и частотой хромосомных aberrаций в клетках элодеи.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН Биоразнообразии № 30.5 и проекта РФФИ-сибирь №13-04-98004.

### Литература

1. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование / Под ред. О.П. Мелеховой, Е.И. Егоровой. М.: Издательский центр Академия, 2007. 288 с.

2. *Bolsunovskij A.Ya., Ermakov A.I., Burger M. et al.* Accumulation of artificial radionuclides by the Yenisei river aquatic plants in the area affected by the activity of the Mining-and-Chemical combine // Радиационная биология. Радиоэкология, 2002. Т. 42. № 2. С. 194-199.

3. *Bolsunovsky A., Muratova E. et al.* The effect of radionuclide and heavy metal contamination of the Yenisei River on cytogenetics of aquatic plant *Elodea canadensis* // Radioprotection, 2009. Vol. 44. №5. P. 83-88.

4. *Калаев В.Н.* Цитогенетические реакции листовных древесных растений на стрессовые условия и перспективы их использования для оценки генотоксичности окружающей среды: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Воронеж, 2009.

5. *Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Болсуновский А.Я. и др.* Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 286 с.

### WATER PLANT ELODEA CANADENSIS A BIOINDICATOR OF THE YENISEI RIVER RADIOACTIVE CONTAMINATION

M.Yu. Medvedeva, A.Ya. Bolsunovsky

Institute of Biophysics, Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk, Russia,  
[medvedeva\\_m79@mail.ru](mailto:medvedeva_m79@mail.ru)

Cytogenetic investigations and radioecological assessment of industrial contamination were conducted at the Yenisei River in the area affected by the operation of the Mining-and-Chemical Combine of Rosatom (MCC). The frequency of pathogenic mitoses increases and the types of chromosomal aberrations change in the elodea meristems from the area closest to the MCC compared to the elodea samples from control areas. Bridges and agglutination of chromosomes dominate aberrations in elodea plants from the radio-contaminated area; the number of cells with ring chromosome and residual nucleoli increases. Direct correlation has been found between the frequency of aberrations in the ana-telophase cells of elodea and the total activity of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River.

## ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КУМУЛЯТИВНОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ НА ПРИМЕРЕ БУККАЛЬНЫХ ЭПИТЕЛИОЦИТОВ

А.В. Мейер, Т.А. Толочко

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия,  
[shapo-alina@yandex.ru](mailto:shapo-alina@yandex.ru)

Многолетний мониторинг объемной активности (ОА) радона на территории школы-интерната г. Таштагол Кемеровской области свидетельствует о стабильном превышении нормируемых значений ( $200 \text{ Бк/м}^3$ ) данного показателя. В период с 2007 по 2011 г. было обследовано 318 детей и подростков, экспонированных радоном в условиях обучения и проживания. С использованием микроядерного теста в буккальных эпителиоцитах для данной когорты показано значимое превышение уровня цитогенетических повреждений, а также показателей нарушения пролиферации в сравнении с выборкой детей и подростков, проживающих в районах, характеризующихся низким уровнем химических и радиационных воздействий. Биологические эффекты увеличения кумулятивной дозы облучения радоном установлены, главным образом, в отношении риска развития рака легких, относительно цитогенетических и пролиферативных нарушений в буккальных эпителиоцитах они не изучены.

Цель данного исследования – изучение показателей цитогенетической нестабильности, а также показателей нарушения пролиферации эпителиальных клеток слизистой щеки в группе детей, длительно подвергающихся воздействию повышенных доз излучения от радона, в динамике.

Материалом для исследования послужили образцы буккального эпителия от 21 чел. (11 мальчиков, 10 девочек), собранных в 2007 и в 2011 гг. Значение ОА радона в период сбора материала составило  $235 \pm 44$  и  $347 \pm 49 \text{ Бк/м}^3$  соответственно. Процедуру сбора образцов и подготовки препаратов буккального эпителия осуществляли с учетом рекомендаций [2]. Для регистрации микроядер (МЯ) использовали критерии, предложенные Tolbert et al. [3], для дополнительных кариологических нарушений микроядерного теста – рекомендации Л.П. Сычевой [4]. Частоту клеток с ядерными аномалиями выражали в промилле (‰). Статистическую обработку осуществляли с помощью IBM PC средствами программы StatSoft Statistica 6.0.

Результаты сравнительного анализа средних значений цитогенетических и пролиферативных показателей за 2007 и 2011 гг. представлены в таблице.

**Динамика показателей цитологического статуса  
буккальных эпителиоцитов когорты, экспонированной радоном**

Показатель, %	2007 г.	2011 г.	p-value*
Частота клеток с микроядрами	0.38±0.11 (0-1)	1.52±0.41 (0-8)	0.010
с протрузией			
типа «пузырек»	2.00±0.38 (0-5)	4.09±0.7 (0-11)	0.036
«разбитое яйцо»	0.09±0.07 (0-1)	0.14±0.07 (0-1)	0.803
«язык»	0.29±0.12 (0-2)	0.33±0.13 (0-2)	0.803
с двумя ядрами	2.62±0.37 (0-6)	3.95±0.67 (0-12)	0.146
со сдвоенными			
ядрами	3.19±0.55 (0-8)	9.0±1.36 (2-28)	0

*Примечание.* \* Уровень значимости (U-критерий Манна-Уитни).

Основным показателем генотоксичности является наличие микроядер (МЯ), так как они могут быть образованы фрагментами хромосом, одной или большим числом целых хромосом [4]. Установлено, что за четырехлетний период частота выявления МЯ в буккальных эпителиоцитах возрастает в 4.5 раза (см. таблицу). К другим нерепарируемым цитогенетическим повреждениям относят протрузии типа «разбитое яйцо» и «язык»; средние значения частоты их обнаружения в анализируемых выборках статистически не отличаются, однако наблюдается тенденция к их увеличению (см. таблицу). Образование ядерных пузырьков связывают с удалением репарационных комплексов или продуктов амплификации ДНК [1], в данном исследовании установлено значимое двукратное превышение регистрации данного типа ядерных аномалий в 2011 г. в сопоставлении с 2007 г. (см. таблицу), что, вероятно, связано с напряжением репарационных систем ДНК и усилением синтетических активностей ядра.

Выявление во внешних слоях буккального эпителия двуядерных клеток, а также клеток со сдвоенными ядрами свидетельствует о нарушении формирования веретена деления и цитокинеза в базальном слое, что можно рассматривать как цито- и генотоксический эффект. С увеличением длительности экспозиции радоном показано статистически значимое увеличение среднего показателя частоты клеток со сдвоенными ядрами, в отношении двуядерных клеток выявлена тенденция к росту данного показателя (см. таблицу).

Таким образом, повышение частоты нерепарируемых цитогенетических повреждений и нарушений пролиферации с увеличением длительности воздействия повышенных доз радона носит кумулятивный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-04-32218 «мол\_а».

### Литература

1. *Sharma S.D., Igbal M.* Lithium induced toxicity in rats: a hematological, biochemical and histopathological study // *Biol. Pharm. Bull.*, 2005. Vol. 28. P. 843-847.
2. *Thomas P., Hollad N., Bolognesi C. et al.* Buccal micronucleus cytome assay // *Nat. Protoc.*, 2009. Vol. 4. P. 825-837.
3. *Tolbert P.E., Shy C.M., Allen J.W.* Micronuclei and other nuclear anomalies in buccal smears: methods development // *Mut. Res.*, 1992. Vol. 271. P. 69-77.
4. *Сычева Л.П.* Биологическое значение, критерии определения и пределы варьирования полного спектра кариологических показателей при оценке цитогенетического статуса человека // *Медицинская генетика*, 2007. Т. 6. № 11. С. 3-11.

### CYTOGENETIC EFFECTS OF CUMULATIVE RADON IRRADIATION DOSE BY THE EXAMPLE OF BUCCAL ERYTHROCYTES

A.V. Mejer, T.A. Tolochko

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, [shapo-alina@yandex.ru](mailto:shapo-alina@yandex.ru)

Cytogenetic instability indicators dynamics studied, as well as proliferation of buccal epithelial cells lesion indicators in the group of children (21 people), long exposed to high doses of radiation from radon. Radon activity concentration value in the first year the survey was  $235 \pm 44$  Bq/m<sup>3</sup>, four years later –  $347 \pm 49$  Bq/m<sup>3</sup>. The frequency of cells with micronuclei in the first stage was 0.38‰, with nuclear bubbles – 2.0‰, cells with doubles – 3.19‰; the second stage: 1.52, 4.09 and 9.0‰ respectively. All differences are statistically significant. It is concluded that the increase of cytogenetic irreparable damage frequency and proliferative disorders according to increasing duration of high radon exposure is cumulative.

### МЕХАНИЗМЫ РАДИАЦИОННОГО ГОРМЕЗИСА НА МОДЕЛИ ДРОЗОФИЛЫ

**А.А. Москалев<sup>1,3</sup>, М.В. Шапошников<sup>1,2</sup>, Е.Н. Плюснина<sup>1,2</sup>, Л.А. Шилова<sup>1</sup>,  
Н.В. Земская<sup>1,2</sup>, Д.О. Перегудова<sup>1</sup>,**

**А.А. Данилов<sup>1</sup>, Е.В. Добровольская<sup>1</sup>, А.В. Кудрявцева<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>Институт естественных наук СыктГУ, Сыктывкар, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (Федеральный университет), Долгопрудный, Россия

<sup>4</sup>Институт молекулярной биологии РАН им. В.А. Энгельгарта, Москва, Россия

Многие токсичные агенты, ингибируя процессы жизнедеятельности при больших концентрациях, в малых дозах оказывают стимулирующий эффект. В середине XX в. Сазам и Эрлих предложили



назвать такую U-образную зависимость «доза–ответ» гормезисом, от греческого слова «*hormaein*», означающего «стимулировать» [1]. С тех пор прошло ровно 70 лет и современные экспериментальные подходы позволили выявить основные механизмы данного явления.

Впервые вопрос: «Все ли дозы радиации вредны?» – поставил Х. Генри в 1961 г. [2], однако первые данные по радиационному гормезису были обобщены в монографии Льюкки [3], где он предложил собственно термин «радиационный гормезис» и продемонстрировал, что радиация в низких дозах может стимулировать метаболическую активность клеток, такую как синтез ДНК и белков. В СССР идею радиационного гормезиса развивал чл.-корр. А.М. Кузин [4].

Наши собственные данные не только подтвердили существование радиационного гормезиса у дрозофил, но и выявили несколько возможных его механизмов. Нам удалось показать, что хроническое ионизирующее облучение в малой (4 сГр) и средней (40 сГр) дозах на ранних стадиях развития приводит к статистически значимому увеличению массы тела взрослых самцов дрозофил. Кроме того, наши эксперименты демонстрируют возможность увеличения продолжительности жизни после облучения в малых дозах у линии дрозофил дикого типа [5-7].

По-видимому, важную роль при действии малых доз радиации на ранних стадиях развития играет элиминация (апоптоз) клеток со слабой антиоксидантной и репаративной способностью, т.е. тех клеток, которые будут впоследствии быстрее стареть. Это подтверждается более выраженным радиационным гормезисом по продолжительности жизни у мутантов дрозофилы по апоптозу по сравнению с линией дикого типа *Canton-S* [7]. Кроме того, установлено, что подвергающиеся индуцированному апоптозу клетки дрозофил выделяют цитокины, способствующие компенсаторной пролиферации неповрежденных клеток и регенерации окружающей ткани [8]. Таким образом, механизмом радиационного гормезиса на уровне организма может являться элиминация ослабленных и дефектных клеток с последующим их замещением по механизму компенсаторной пролиферации.

Анализ изменения продолжительности жизни в результате хронического облучения в течение более десяти поколений у инбредной линии дрозофилы *Oregon-R* выявил увеличение медианной продолжительности жизни по сравнению с необлученным контролем, начиная со второго поколения облучения. Это может свидетельствовать о стимулирующем влиянии на продолжительность жизни радиационно-индуцированного увеличения уровня генетической гетерогенности по сравнению с необлученной изогенной популяцией. Таким образом, гормезис по продолжительности жизни может

быть следствием отмены инбредной депрессии [9-10]. Аналогичный вывод был сделан ранее при изучении жизнеспособности облученных дрозофил [11]: на гомозиготном генетическом фоне вновь индуцированные мутации повышали жизнеспособность, а на гетерозиготном – снижали.

Еще одним механизмом радиационного гормезиса является стимуляция экспрессии генов, способствующих предотвращению (гены антиоксидантной защиты), замещению или элиминации клеточных повреждений (гены репарации ДНК, молекулярных шаперонов, автофагии). Наши исследования влияния малых доз ионизирующих излучений на продолжительность жизни линий дрозофил с мутациями генов антиоксидантной защиты, белков теплового шока и репарации ДНК показали их важную роль в радиоадаптации и радиационном гормезисе [12-13]. Результаты РТ-ПЦР анализа подтвердили долговременные изменения паттернов экспрессии генов стресс-ответа в результате воздействия малых доз ионизирующего излучения [13].

Применение полногеномного секвенирования транскриптома позволило нам выявить новые молекулярные механизмы радиационного гормезиса, связанные с изменением экспрессии генов сигнальных путей Hedgehog, Jak-STAT, mTOR, Notch, TGF-beta, Hippo, генов протеасомальной деградации, базальных транскрипционных факторов, эксцизионной репарации нуклеотидов и репарации мисматчей, циркадных ритмов, рибосом, транскрипции, синтеза ДНК и метаболизма ксенобиотиков [14].

Таким образом, зависимость «доза–ответ» в диапазоне малых доз носит сложный и не всегда прогнозируемый характер и радиационный гормезис – одно из проявлений такой неоднозначности. Более правильно определять «гормезис» как эффект гиперфункции системы в результате воздействия ионизирующего облучения, а не как «благоприятное» действие радиации [15].

Исследования поддержаны грантом «Экологическая генетика продолжительности жизни модельных животных (*Drosophila melanogaster*, *Mus musculus*)» № 12-П-4-1005 целевой Программы РАН «Молекулярная и клеточная биология».

#### Литература

1. Southam C.M., Ehrlich J. Effects of Extract of western red-cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture // *Phytopathology*, 1943. Vol. 33. P. 517-524.
2. Henry H.F. Is all nuclear radiation harmful? // *J. Am. Med. Assoc.*, 1961. Vol. 176. P. 671-675.
3. Luckey T.D. Hormesis with ionizing radiation. Boca Raton: CRC Press, 1980. 84 p.

4. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующего излучения на биологические процессы (к проблеме биологического действия малых доз). М.: Атомиздат, 1977. 135 с.

5. Москалев А.А., Зайнуллин В.Г. Изучение скорости старения после хронического облучения малыми дозами ионизирующей радиации у линий дрозофилы с нарушением апоптоза // Радиационная биология. Радиоэкология, 2004. Т. 44. № 2. С. 156-161.

6. Moskaev A.A. Investigation of the relationship of radio-induced apoptosis of *Drosophila* larvae nervous system and the ageing of imago nervous system // Contributed papers of the International Conference "Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation". Stockholm, 2003. P. 80-86.

7. Moskaev A.A. Chronic gamma-irradiation effect on *Drosophila melanogaster* lifespan in generations of wild-type isogenic and heterogenic strains // Int. J. Low Radiation, 2007. Vol. 4. № 3. P. 169-175.

8. Kondo S., Senoo-Matsuda N., Hiromi Y., Miura M. DRONC coordinates cell death and compensatory proliferation. Mol Cell Biol., 2006. Vol. 26. № 19. P. 7258-7268.

9. Москалев А.А., Зайнуллин В.Г. Продолжительность жизни в поколениях хронического облучения у изогенных и гетерогенных линий дрозофилы дикого типа // Радиационная биология. Радиоэкология, 2006. Т. 46. № 4. С. 436-440.

10. Moskaev A. Radiation-induced life span alteration of *Drosophila* lines with genotype differences // Biogerontology, 2007. Vol. 8. № 5. P. 499-504.

11. Воробцова И.Е. Особенности потомков облученных биологических объектов // Медицинская радиология, 1974. № 11. С. 76-83.

12. Moskaev A., Shaposhnikov M., Turysheva E. Life span alteration after irradiation in *Drosophila melanogaster* strains with mutations of Hsf and Hsps // Biogerontology, 2009. Vol. 10. № 1. P. 3-11.

13. Moskaev A.A., Plyusnina E.N., Shaposhnikov M.V. Radiation hormesis and radioadaptive response in *Drosophila melanogaster* flies with different genetic backgrounds: the role of cellular stress-resistance mechanisms // Biogerontology, 2011. Vol. 12. № 3. P. 253-263.

14. Moskaev A., Shaposhnikov M., Snezhkina A. et al. Mining gene expression data for pollutants (dioxin, toluene, formaldehyde) and low dose of gamma-irradiation. Plos ONE, 2014. In press.

15. Ивановский Ю.А. Радиационный гормезис. Благоприятны ли малые дозы ионизирующей радиации? // Вест. ДВО РАН, 2006. № 6. С. 86-91.

## MECHANISMS OF RADIATION HORMESIS ON DROSOPHILA MODEL

A.A. Moskaev<sup>1,3</sup>, M.V. Shaposhnikov<sup>1, 2</sup>, E.N. Plyusnina<sup>1, 2</sup>, L.A. Shilova<sup>1</sup>,  
N.V. Zemskaya<sup>1, 2</sup>, D.O. Peregodova<sup>1</sup>, A.A. Danylov<sup>1</sup>, E.V. Dobrovlskaya<sup>1</sup>,  
A.V. Kudryavtzeva<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of biology of Komi SC of RAS, Syktyvkar, Russia

<sup>2</sup> Institute of natural Sciences of SyktSU, Syktyvkar, Russia

<sup>3</sup> Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudny, Russia

<sup>4</sup> Institute of molecular biology of RAS, Moscow, Russia

Long-term studies of radiation hormesis, made in our research group have identified several key mechanisms. As cells with weakened protection will accumulate damages and will be exposed to ageing with the greater speed,

than steady cells, their radio-induced elimination at early development stages will result in delay of age-dependent changes and will lower speed of ageing [10]. The use of genome-wide transcriptome sequencing has allowed us to identify new molecular mechanisms of radiation hormesis associated with changes in gene expression of signaling pathways Hedgehog, Jak-STAT, mTOR, Notch, TFG-beta, Hippo, genes proteasomal degradation of the basal transcription factors, nucleotide excision repair and mismatch repair, circadian rhythms, ribosomal transcription, DNA synthesis and metabolism of xenobiotics [14].

---

## ИНДУКЦИЯ И РЕПАРАЦИЯ ДВУНИТЕВЫХ РАЗРЫВОВ ДНК В КЛЕТКАХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**А.Н. Осипов, К.В. Котенко, А.Ю. Бушманов, И.В. Озеров,  
М.В. Пустовалова, Д.В. Гурьев, Н.А. Анчишкина, Н.М. Сметанина,  
Е.Ю. Архангельская, Н.Ю. Воробьева**

Государственный научный центр Российской Федерации –  
Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна  
ФМБА России, Москва, Россия, [andreyan.osipov@gmail.com](mailto:andreyan.osipov@gmail.com)

Большая часть повреждений, возникающих в ДНК клеток, после воздействия ионизирующего излучения (ИИ) существенно отличается по своей химической природе от эндогенных повреждений. Важнейшей характеристикой радиационно-индуцированных повреждений ДНК является их сложность и кластеризация. В настоящее время общепризнано, что среди повреждений ДНК, вызываемых ИИ, двунитевые разрывы (ДР) ДНК – наиболее критические для дальнейшей судьбы клетки. Предполагается, что именно ДР являются основным триггером, запускающим процессы клеточного отклика на воздействие ионизирующего излучения. Репарация ДР происходит довольно медленно, в то время как ДР, не устраненные в ходе репарации ДНК, приводят к серьезным цитогенетическим нарушениям, гибели клеток, инактивации генов супрессоров опухолей или активации онкогенов. Основные закономерности индукции и репарации ДР довольно хорошо изучены при остром, кратковременном воздействии ИИ в различных дозах. Однако в реальных условиях живые организмы зачастую подвергаются не острому, а длительному/хроническому воздействию ИИ. К сожалению, существующие в настоящее время экспериментальные данные об особенностях изменения количества ДР в клетках млекопитающих при длительном/хроническом воздействии ИИ немногочисленны и крайне противоречивы. До сих пор нет четкого понимания того, как меняется кинетика индукции и репарации ДР при облучении в одних и тех же дозах, но с разной мощностью дозы.

Цель настоящей работы – сравнительное исследование изменений количества ДР ДНК в фибробластах китайского хомяка линии V79 при воздействии  $\gamma$ -излучения с различной мощностью дозы.

Для оценки изменений количества ДР ДНК использовали иммуноцитохимический анализ фосфорилированного корового гистона H2AX ( $\gamma$ -H2AX) [2]. Дополнительно для анализа фрагментации ДНК, обусловленной ДР, применяли метод гель-электрофореза ДНК единичных клеток (метод ДНК-комет) при нейтральном pH [8].

В работе использовали культуру фибробластов легкого китайского хомячка (линия V79). Клетки обладают довольно высокой адгезивной способностью к лабораторному пластику. Клетки культивировали в стандартной полной среде DMEM, содержащей 10% фетальной телячьей сыворотки, 1% L-глутамина и антибиотики (пенициллин и стрептомицин) в условиях стандартного CO<sub>2</sub>-инкубатора при 37 °C в атмосфере с 5%-ным содержанием CO<sub>2</sub>. Облучение клеток при мощностях доз 1 и 10 мГр/мин. проводили на специально переоборудованной для облучения культур клеток облучательной установке Луч (источник  $\gamma$ -излучения Co-60).

В проведенных нами предварительных экспериментах было показано, что при остром облучении количество фокусов  $\gamma$ -H2AX линейно зависит от поглощенной дозы. Зависимость «доза–эффект» для остро облученных клеток хорошо описывается линейной функцией  $y = 1.2 + 19.7x$  ( $R^2 = 0.99$ ), где  $y$  – среднее количество фокусов  $\gamma$ -H2AX в ядре клетки,  $x$  – доза облучения, Гр. Таким образом, исходя из предположения, что один фокус соответствует одному ДР, можно полагать, что острое облучение клеток линии V79 индуцирует в среднем ~20 ДР в клетке на 1 Гр. Полученное значение соответствует литературным данным для редкоионизирующего излучения [1]. Однако следует иметь в виду, что реальное количество ДР, индуцированных в среднем в клетке дозой 1 Гр может быть выше, так как фокусы  $\gamma$ -H2AX, образующиеся на месте индукции двух и более близкорасположенных ДР, сливаются и воспринимаются как один фокус большего размера.

Облучение клеток при мощности дозы 10 мГр/мин. приводило к изменению характера кривой «доза–эффект»: увеличение количества фокусов до дозы 1.44 Гр и «плато» в диапазоне доз 1.44–4.32 Гр. Такой характер дозовой зависимости обусловлен тем, что облучение клеток при этой мощности дозы происходит в течение длительного времени (несколько часов) и кривая отражает результат двух одновременно текущих процессов: индукцию ДР и их репарацию.

Наиболее интересные результаты получены при облучении с мощностью дозы 1 мГр/мин. (продолжительность облучения до 72 ч). Показано, что при такой мощности дозы наблюдается лишь незначительное (до семи фокусов), практически не зависящее от накопленной дозы, увеличение количества фокусов  $\gamma$ -H2AX. Ранее по-

добные результаты были получены японскими исследователями, продемонстрировавшими, что при облучении фибробластов человека в дозах до 5 Гр при мощности дозы 0.3 мГр/мин. не отмечается увеличения количества фосфорилированного белка р53, а количество фокусов  $\gamma$ -H2AX лишь незначительно превышает контрольный уровень [4]. Однако в литературе нет единого мнения о механизмах этого феномена. Так, было показано, что при облучении культивируемых клеток млекопитающих с мощностью дозы 1.5 мГр/мин. (дозы до 6 Гр) наблюдается пониженная активация киназы ATM, которая является сенсором ДР и фосфорилирует гистон H2AX [3]. Авторы объясняют эффект значительного снижения относительного выхода (в расчете на дозу облучения) количества фокусов  $\gamma$ -H2AX при облучении с низкой мощностью неэффективным распознаванием ДР киназой ATM. Однако в последнее время появляются доказательства, что процесс фосфорилирования гистона H2AX при облучении клеток с низкой мощностью является ATM-независимым [7]. Кроме того, в случае неэффективной репарации, должно происходить накопление неотрепарированных ДР и, как следствие, увеличение степени фрагментации хроматина. Для проверки этой гипотезы нами дополнительно проведены исследования изменений степени фрагментации ДНК, обусловленной ДР, с помощью метода ДНК-комет. Было показано, что характер изменений степени фрагментации ДНК при облучении клеток V79 с различной мощностью доз соответствует характеру изменений количества фокусов  $\gamma$ -H2AX. Снижение мощности дозы облучения приводило к существенному снижению степени фрагментации ДНК, регистрируемой методом ДНК-комет в пересчете на дозу облучения.

Можно полагать, что в нормальных (без дефектов систем репарации ДНК) клетках млекопитающих при длительном облучении с низкой мощностью дозы редкоизионизирующего излучения происходит эффективная репарация ДР ДНК и дефосфорилирование гистона H2AX. В пользу этого свидетельствуют результаты сравнительных исследований эффектов при облучении клеток с разными мощностями доз. Так, показано, что частота цитогенетических нарушений и гибель TERT-иммортизированных фибробластов человека при облучении с низкой мощностью (0.3 мГр/мин.) значительно ниже, чем при облучении с высокой мощностью дозы (2000 мГр/мин.) [5]. Подобные закономерности наблюдаются также и в экспериментах на животных [6].

Таким образом, исследования закономерностей изменения количества ДР ДНК в клетках линии V79 в зависимости от мощности дозы и длительности облучения показали, что снижение мощности дозы облучения приводит к существенному уменьшению выхода ДР в пересчете на дозу облучения. Полученные результаты

свидетельствуют в пользу гипотезы порогового действия ионизирующего излучения на биологические системы на молекулярном уровне, причем именно мощность дозы облучения является одним из ключевых факторов, определяющих проявление и выраженность биологических эффектов.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №12-04-01733-а.

#### Литература

1. *Asaithamby A., Chen D.J.* Cellular responses to DNA double-strand breaks after low-dose gamma-irradiation // *Nucleic. Acids Res.*, 2009. Vol. 37(12). P. 3912-3923.
2. *Banath J.P., Klokov D., MacPhail S.H.* et al. Residual gammaH2AX foci as an indication of lethal DNA lesions // *BMC Cancer*, 2010. Vol. 10. P. 4.
3. *Collis S.J., Schwaninger J.M., Ntambi A.J.* et al. Evasion of early cellular response mechanisms following low level radiation-induced DNA damage // *J. Biol. Chem.*, 2004. Vol. 279(48). P. 49624-49632.
4. *Ishizaki K., Hayashi Y., Nakamura H.* et al. No induction of p53 phosphorylation and few focus formation of phosphorylated H2AX suggest efficient repair of DNA damage during chronic low-dose-rate irradiation in human cells // *J. Radiat. Res.*, 2004. Vol. 45(4). P. 521-525.
5. *Nakamura H., Fukami H., Hayashi Y.* et al. Cytotoxic and mutagenic effects of chronic low-dose-rate irradiation on TERT-immortalized human cells // *Radiat. Res.*, 2005. Vol. 163(3). P. 283-288.
6. *Osipov A.N., Klokov D.Y., Elakov A.L.* et al. Comparison in vivo study of genotoxic action of high-versus very low dose-rate gamma-Irradiation // *Nonlinearity BiolToxicol. Med.*, 2004. Vol. 2(3). P. 223-232.
7. *Sugihara T., Murano H., Tanaka K.* Increased  $\gamma$ -H2A.X intensity in response to chronic medium-dose-rate  $\gamma$ -ray irradiation // *PLoS One*, 2012. Vol. 7(9). P. e45320.
8. *Wojewodzka M., Buraczewska I., Kruszewski M.* A modified neutral comet assay: elimination of lysis at high temperature and validation of the assay with anti-single-stranded DNA antibody // *Mutat. Res.*, 2002. Vol. 518(1). P. 9-20.

#### INDUCTION AND REPAIR OF DOUBLE-STRAND DNA BREAKS IN MAMMALIAN CELLS CONTINUOUSLY EXPOSED TO LOW DOSE-RATE IONIZING RADIATION

**A.N. Osipov, K.V. Kotenko, A.Y. Bushmanov, I.V. Ozerov, M.V. Pustovalova,  
D.V. Guryev, N.A. Anchishkina, N.M. Smetanina, E.Y. Arkhangelskaya,  
N.Y. Vorobyeva**

State Research Center-Burnasyan Federal Medical Biophysical Center  
of Federal Medical Biological Agency  
(SRC-FMBC), Moscow, Russia, [andriya.osipov@gmail.com](mailto:andriya.osipov@gmail.com)

The present study of the radiation-induced DSBs level in Chinese hamster V79 cells exposed to IR at various dose rates showed a significant decrease in the DSBs level per IR dose in cells irradiated at a lower dose rate compared to

a higher dose rate. Evidently, current findings support the threshold hypothesis on the biological effects of IR. The dose rate appeared to be an essential factor in cellular response to IR determining biological effects induction and realization, probably more important than the absorbed dose. Therefore, it is advisable to consider the dose rate factor in the radiological protection standards.

---

## ДВИГАТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ ЦИЛИАРНОГО АППАРАТА МАТОЧНЫХ ТРУБ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ХРОНИЧЕСКОГО $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ

**А.В. Павлов<sup>1</sup>, О.В. Ермакова<sup>2</sup>, Т.В. Кораблева<sup>1</sup>, А.Н. Гансбургский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Ярославская государственная медицинская академия, Ярославль,  
Россия, [pavlov@yma.ac.ru](mailto:pavlov@yma.ac.ru)

<sup>2</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[ermakova@ib.komisc.ru](mailto:ermakova@ib.komisc.ru)

Рассматривается информативность исследования основных параметров двигательной активности мерцательного эпителия яйцеводов в рамках изучения влияния антропогенных факторов на гистофункциональные возможности репродуктивной системы млекопитающих. Известно, что реснички мерцательных клеток вместе со слизью образуют мукоцилиарную транспортную систему (МЦТ), играющую, наряду с гладкими мышцами стенки органа, важную роль в обеспечении переноса эмбриона в полость матки. Наиболее значимыми эффектами действия повреждающих факторов на орган могут являться нарушение частоты и структуры цикла биения ресничек эпителиоцитов, усиленная десквамация клеток, изменение физико-химических характеристик секрета желез. Нарушения МЦТ могут играть значительную роль в развитии дисфункции органа и патогенезе ряда болезней репродуктивной системы, поэтому оценка его состояния при различных воздействиях, включая и радиационные, является крайне важной, но до сих пор недостаточно изученной.

Цель настоящей работы – изучение активности мукоцилиарной транспортной системы мерцательного эпителия маточных труб крыс линии Вистар при хроническом воздействии малых доз радиации. Исследование влияния длительного воздействия низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения в дозах 0.05 и 0.5 Гр ( $^{226}\text{Ra}$ , мощность дозы – 35-40 и 350-400 мкГр/ч, продолжительность облучения – 70 сут., взятие материала – в течение 10 сут. после облучения) на двигательную активность цилиарного аппарата (ДАЦА) яйцеводов проведено на 21 самке крыс линии Вистар репродуктивного возраста. Дозовая нагрузка на организм определялась мощностью экспозиционной дозы



и сроками содержания в условиях облучения; измерения проводили радиометром ДРГ-01Т1 (НПП «Доза», Россия). Животные находились в зоне воздействия ионизирующего излучения круглосуточно с перерывами на кормление и уборку помещения. Контрольные одновозрастные группы животных содержались при естественном радиационном фоне в условиях, строго идентичных с экспериментальными. Каждой группе животных соответствовал свой контроль. Анализ ДАЦА проведен с помощью диагностического комплекса НПК «Азимут» (Россия), состоящего из микроскопа Микмед-6 (увеличение  $\times 400$  и  $1000$ ) с термостоликом, высокоскоростной видеокамеры «Эндокам» с платой видеозахвата и персонального компьютера со специализированным программным обеспечением «Oscillation». Для поддержания частоты биения ресничек использовали специальную питательную среду «Игла МЕМ для культур клеток» при температурном режиме, близком к параметрам тела животного ( $40^\circ\text{C}$ ).

Результаты проведенного исследования показали, что при хроническом облучении в дозах  $0.05$  и  $0.5$  Гр выявлено статистически значимое ( $p < 0.05$ ) уменьшение частоты биения ресничек в маточных трубах половозрелых животных на  $13.2-14.3\%$  по сравнению с контрольной группой ( $0.5$  Гр –  $16.08 \pm 0.2$  Гц,  $0.05$  Гр –  $15.59 \pm 0.2$ , контроль –  $18.2 \pm 0.5$  Гц).

Таким образом, хроническое облучение в малых дозах угнетает мерцательную активность эпителия маточных труб, что свидетельствует о достаточно высокой радиочувствительности изученной тест-системы. Наиболее вероятным объяснением выявленного эффекта является прямое воздействие низкоинтенсивного  $\gamma$ -облучения на сократительный аппарат мерцательных эпителиальных клеток. Экспериментально обосновывается информативность использования метода определения частоты биения ресничек в качестве чувствительного маркера индуцированных радиацией гистофункциональных нарушений мерцательного эпителия яйцеводов.

Работа частично поддержана проектом конкурсных программ научных исследований УрО РАН № 12-У-4-1015.

#### CHRONIC EXPOSURE OF LOW DOSE $\gamma$ -RADIATION ON MOTOR ACTIVITY OF THE FALLOPIAN TUBES CILIAR APPARATUS

A.V. Pavlov<sup>1</sup>, O.V. Ermakova<sup>2</sup>, T.V. Korableva<sup>1</sup>, A.N. Gansburgskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Yaroslavl'skaya State Medical Academy, Russia, [pavlov@yma.ac.ru](mailto:pavlov@yma.ac.ru)

<sup>2</sup> Institute of Biology, Komi Science Centre, Syktyvkar, [ermakova@ib.komisc.ru](mailto:ermakova@ib.komisc.ru)

Informativity of use of cilia throbbing frequency determination method as a sensitive marker of gistofunctional disturbances of the fallopian tubes ciliar apparatus induced with ionizing radiation is experimentally grounded.

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБНОСТИ ИНТАКТНЫХ И ОБЛУЧЕННЫХ РОДИТЕЛЕЙ К ОБУЧЕНИЮ НА КОГНИТИВНЫЕ ФУНКЦИИ МОЗГА ИХ ПОТОМСТВА

В.В. Панфилова, О.И. Колганова, Л.П. Жаворонков

Медицинский радиологический научный центр Минздрава РФ,  
Обнинск, Россия, [whiskas04@yandex.ru](mailto:whiskas04@yandex.ru)

Развитие и расширяющиеся масштабы применения ядерной энергии в народном хозяйстве увеличивают вероятность вредоносного воздействия ионизирующей радиации на человека. В связи с этим возрастает необходимость более глубокого и детального экспериментального изучения влияния относительно невысоких, нелетальных доз радиации на организм млекопитающих и их потомство.

Объектом исследования явились самцы крыс линии Вистар и их потомство первого поколения. Психофизиологическое развитие потомства оценивалось по способности к обучению с помощью теста выработки условного оборонительного рефлекса избегания в челночной камере.

Для решения поставленных задач 25 половозрелых самцов крыс линии Вистар ( $F_0$ ) облучали на гамма-установке «Луч» при мощности дозы 0.003 Гр/с в дозе 0.5 Гр. Затем их спаривали с интактными самками через разные интервалы времени после облучения (чтобы в оплодотворении участвовали половые клетки, облученные на разных стадиях сперматогенеза, соответственно, потомство разделилось на условные подгруппы согласно стадиям сперматогенеза: сперматозоиды, сперматиды, сперматогонии, сперматоциты). В группы для дальнейшего тестирования условно-рефлекторной деятельности в месячном возрасте отбирали по два внешне здоровых детеныша от каждой самки-матери и дорастивали их до трехмесячного возраста. Контрольную группу составляли интактные самцы и самки, которые находились в идентичных с подопытными крысами условиях содержания. Тестирование проводилось отдельно для групп самок и самцов. Когнитивные (памятные) функции мозга оценивали по способности к выработке и воспроизведению условного рефлекса избегания (УРИ). В экспериментах использовали стандартную методику обучения крыс в челночной камере Шаттл-бокс [1]. Животных тестировали два раза с интервалом в двое суток.

При тестировании потомков в первой серии опытов были получены настолько высоко достоверные различия между контрольными и подопытными животными, облученными пренатально на стадии сперматогониев относительно небольшой дозой радиации (0.5 Гр), что это потребовало подтверждения и привело к постановке второй серии опытов. Достоверные различия в первой серии опытов наблюдаются по всем интегративным показателям: числу по-

пыток до первого избегания ( $3.3 \pm 0.7$  и  $12.8 \pm 3.8$ ), количеству УРИ ( $29.6 \pm 2.7$  и  $13.8 \pm 3.1$ ) и отказов ( $1.0 \pm 0.4$  и  $9.9 \pm 2.1$ ), ОБ-50 ( $26.0 \pm 3.2$  и  $146.9 \pm 60.3$  – в пять раз) и числу крыс с сериями УРИ, т.е. мы наблюдали снижение обучаемости у группы «сперматогонии» по сравнению с контролем. Во второй серии опытов при равноценных родительских группах (одинаков и качественный, и количественный состав) потомки первого поколения из контрольной и опытной групп достоверно не различались по интегральным показателям обучаемости – выявлены только некоторые различия по динамике обучения. Исходя из полученных результатов в опыте на сперматогониях, было решено в двух повторностях опытов на сперматиде сформировать группы родителей по уровню развития когнитивных способностей. Их потомство (отдельно самцы и самки) поделено на группы, с распределением, подобным распределению в естественной популяции. Ниже приведены уравнения линейной регрессии вида  $y = B + Ax$ , отражающие различия между контролем и потомками облученных родителей в исходном уровне обученности и скорости обучения.

Контроль:  $y = 29.4 \pm 3.0 + (2.4 \pm 0.2)x$ .

«Сперматиды»:  $y = 34.4 \pm 2.4 + (2.1 \pm 0.2)x$ .

Сравнение по свободному члену уравнения:  $T(A) = 1.27$ .

Сравнение по наклону (по коэффициенту регрессии):  $T(B) = 1.29$ .

Опытная группа начинает с уровня обученности чуть ниже, чем контрольная, но затем демонстрирует большую скорость обучения. Различия по динамике незначительны. Различия между опытными и контрольными группами существуют на уровне тенденции к ухудшению запоминания выработанного навыка у крыс-потомков облученных отцов.

Потомков первого поколения, родившихся из яйцеклеток, оплодотворенных мужскими гаметами, облученными на стадии сперматид, протестировали по методике Шаттл-бокс и получили достоверные различия между животными, родившимися от «умных» и «глупых» родителей. Так, например, у самцов, родившихся от «умных» родителей, общее число УРИ за второе тестирование составило  $35.4 \pm 2.2$  ( $n = 12$ ), а у самцов, родившихся от «более глупых» родителей, –  $21.7 \pm 2.9$  ( $n = 15$ ). Суммарно эти животные составили подопытную группу для оценки влияния ионизирующего излучения. При сравнении контрольной и подопытной групп были выявлены достоверные различия (можно говорить о снижении скорости обучения УРИ вследствие облучения сперматид). Если сравнить скорости выработки УРИ у опытных групп с разными уровнями когнитивного развития, то получаем достоверные различия в динамике выработки УРИ.

Известно, что в популяциях высших животных (и человека) отдельные особи могут существенно различаться по функциональному состоянию ЦНС, в частности, по когнитивным функциям. Для устранения случайных по сути флуктуаций (неравномерностей) применяются методы рандомизирования групп, проводя предварительные тестирования с небольшим числом предъявлений и распределяя животных группы с учетом их исходной способности к обучению. Возможность влияния исходного состояния когнитивных функций на психофизиологическое развитие потомства (особенно при «гомозиготности» по данному критерию) ранее не оценивалось.

В ходе экспериментов, результаты которых представлены выше, установлено, что получение потомства от родителей с низким уровнем способности к облучению приводит к существенному снижению функциональной полноценности их потомства по тесту выработки УРИ. Значимость такого эффекта проанализировано по результатам опытов с ионизирующим облучением родителей-самцов в относительно малой дозе (0.5 Гр). При этом разные группы потомства составили животные, зачатые из половых клеток самцов, облученных на разных стадиях сперматогенеза. Кроме сравнительного анализа радиочувствительности оценивали значимость рандомизации групп родителей для выраженности радиационного эффекта на потомках. Показано, что отсутствие такого методического подхода может привести к существенным изменениям степени выраженности пострадиационных нарушений когнитивных функций. Учет данного фактора позволит избежать методических ошибок, заключающихся в случайном формировании групп, неравноценных по исходным психофизиологическим параметрам.

### Литература

1. *Навакатикян М.А.* Методика изучения оборонительных условных рефлексов активного избегания. // Журнал высшей нервной деятельности, 1992. Т. 42. № 4. С. 812-818.

### INFLUENCE OF EDUCATIONAL CAPACITY OF INTACT AND IRRADIATED PARENTS ON COGNITIVE BRAIN FUNCTION OF THEIR PROGENY

V.V. Panfilova, O.I. Kolganova, L.P. Javoronkov

Medical radiological scientific center of Health ministry RF, Obninsk, Russia,  
[whiskas04@yandex.ru](mailto:whiskas04@yandex.ru)

The influence of ionizing radiation (the dose of 0.5 Gy, the dose rate of 0.003 Gy/s) of rat males at different stages of spermatogenesis on the psychophysiological development of their offspring of first generation was studied. The estimation of the brain cognitive functions of the first generation offspring was carried out by the avoiding reflex in the Shuttle-box. It was shown that the irradiation at all stages of spermatogenesis have a negative effect on the offspring of the first generation.

## ИЗМЕНЕНИЕ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ, ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ

И.И. Пелевина<sup>1</sup>, А.В. Алещенко<sup>2</sup>, М.М. Антошина<sup>3</sup>, В.А. Бирюков<sup>3</sup>,  
О.В. Кудряшова<sup>1</sup>, Н.Г. Минаева<sup>3</sup>, А.М. Серебряный<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия,  
[pele@chph.ras.ru](mailto:pele@chph.ras.ru)

<sup>2</sup> Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,  
Москва, Россия

<sup>3</sup> Медицинский радиологический научный центр  
Минздравсоцразвития РФ, Обнинск, Россия

Является ли проблема адаптивного ответа (АО), т.е. проблема повышения радиорезистентности после воздействия генотоксических агентов в малых дозах, общебиологической, общим механизмом защиты от вредных факторов? Анализ многочисленных данных литературы и результатов наших собственных экспериментов показывает, что до сих пор не известен механизм АО, на выявление АО влияют состав клеточной популяции, индивидуальные особенности организма, использованные критерии оценки, уменьшение количества повреждений на стадии их возникновения, активность системы антиоксидантной защиты, активность процессов репарации, фазы клеточного цикла, процессы гибели поврежденных клеток, возраст, экологическая ситуация и т.д. Широкая вариабельность АО, множественность механизмов позволяют ставить вопрос о его универсальности. Кроме того, необходимо учитывать, что в некоторых случаях после облучения в малых дозах наблюдается не повышение радиорезистентности, а противоположный эффект – повышение радиочувствительности. Было также обнаружено, что направленность изменения радиочувствительности после воздействия радиации в малых дозах зависит от исходной радиочувствительности.

В данной работе на лимфоцитах периферической крови человека приводятся результаты проявления АО в разных условиях. Так, показано, что у хронически облученных жителей Челябинской области частота проявления АО снижена, снижена она и у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС. У больных со злокачественными опухолями формирование способности к АО зависит от типа опухоли – несколько снижена при лимфоме Ходжина (в среднем), но индивидуальна у каждого больного. При раке предстательной железы наблюдается аналогичная ситуация.

Были изучены особенности проявления АО у потомков отцов, облученных при проживании на зараженных нуклидами территориях Челябинской области вследствие аварии на п/о «Маяк». Оказалось, что у потомков АО практически не выявляется совсем.

У детей разного возраста, страдающих различными заболеваниями, было обнаружено снижение частоты АО и повышение частоты проявления сенсибилизации при ряде аллергических заболеваний, туберкулезе.

Отдельной проблемой является обнаруженная нами отрицательная зависимость между исходной радиочувствительностью и ее изменением после облучения в малых дозах, выявленная у жителей Москвы, Обнинска, облученных жителей Южного Урала, при наличии отдельных заболеваний у детей и взрослых. Таким образом, этот феномен можно считать общей закономерностью.

В работе обсуждаются возможные механизмы феноменов АО и повышения радиочувствительности, их значимость для выживания и гибели клеток, частота их проявления в разных экологических условиях, у здоровых и больных людей, т.е. обсуждаются возможные факторы, определяющие формирование АО или повышения радиочувствительности после облучения в малых дозах. Ставится вопрос об универсальности способности к АО, как необходимой защиты всего живого от токсических агентов окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 12-04-01442а.

#### CELLULAR RADIOSENSITIVITY CHANGES AFTER LOW DOSE IRRADIATION. THE POSSIBLE MECHANISMS AND REGULARITIES

I.I. Pelevina<sup>1</sup>, A.V. Aleshchenko<sup>2</sup>, M.M. Antoschina<sup>3</sup>, V.A. Biriukov<sup>3</sup>,  
O.V. Kudryashova<sup>1</sup>, N.G. Minaeva<sup>3</sup>, A.M. Serebryanyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> N.N. Semenov Institute of Chemical Physics Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia; [pele@chph.ras.ru](mailto:pele@chph.ras.ru)

<sup>2</sup> N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Is the problem of the adaptive response (AR) that is the radioresistance enhancing after low dose of genotoxic agents, common for biology, overall protection mechanism from toxic factors? Analysis of numerous literature data and our results shows that up to date the AR mechanisms are unknown, to AR forming many factors can influence: the cell population content, organisms individual peculiarity, the used criteria of evaluation, decreasing of damage amount on the phase when they are appeared, the activity of antioxidant defense system, the activity repair system, cell cycle phases, apoptosis of damaged cells, person age, ecological situation and many another things. The great AR variability, multitude of AR mechanisms permits to speak about the universality of its phenomenon. Then it is necessary to take into consideration that in some cases the opposite effect can be observed: the radiosensitivity increasing. It was shown too the direction of radiosensitivity change after low dose of irradiation depends on the initial radiosensitivity.

In this paper the results of forming AR on human blood lymphocytes in the different conditions carry out. It was shown that at chronic irradiation inhabitants of Cheliabinsk region the frequency of AR appearance decreases, it decreases in liquidators of the Chernobyl accident consequence; in people with cancer AR forming depends on the tumor type. It increases at the Hodgkin's lymphoma patients (in mean), the individual variability to AR is different in each patients, in some cases the increasing of radiosensitivity can be observed. Analogical situation is observed in the group of patients with prostate cancer.

The peculiarity of AR appearance in the progeny of irradiated fathers resident of Cheliabinsk region contaminated radionuclides after accident in Majak that AR wasn't determined.

In different age children having different diseases the decreasing of AR frequency and increasing of radiosensitivity after low dose of irradiation have been observed in group patients with allergy and tuberculosis.

Especial problem is the discovered by us the negative connection between the initial radiosensitivity and its change after low doses irradiation shown in Moscow, Obninsk inhabitants, in irradiated people in the South Ural, at the diseased children and adults and many other situations investigated. We can suppose that this phenomenon can be overall regularity.

In this report the possible mechanisms of AR and radiosensitivity increasing phenomena, their significance for the life and death of cells, the frequency of their appearance in the different ecological situation, in health and disease people have been discussed. The possible factors that can affect on AR or sensibilization can be determined. The questions about AR universality raise as needed safe all living organisms from toxic agents surrounding environment.

The work was supported by a grant of the Russian Fond of Basic Research № 12-04-01442a.

---

### **ВЫЯВЛЕНИЕ ГЕНОВ-БИОСЕНСОРОВ МАЛЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ У *DROSOPHILA MELANOGASTER***

**Д.О. Перегудова, Е.Н. Плюснина, М.В. Шапошников, А.А. Москалев**  
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[delovoyd3@gmail.com](mailto:delovoyd3@gmail.com), [mshaposhnikov@mail.ru](mailto:mshaposhnikov@mail.ru)

Согласно современной парадигме, стресс-факторы оказывают влияние на организм опосредованно через изменение экспрессии определенных генов. Важно отметить, что живые организмы постоянно подвергаются воздействию различных низкоинтенсивных стресс-факторов, следовательно, актуальной задачей стала разработка систем их детекции, особенно при малых концентрациях. Для достижения этой цели наиболее актуальным методом биосенсирования является выявление адаптивного изменения экспрессии генов.

Ранее в работах нашей лаборатории был проведен сравнительный анализ эффектов малых доз ионизирующей радиации, формальдегида и диоксина, выявлен список генов, специфически изменяющих свою экспрессию после воздействия ионизирующего излучения в дозе 20 сГр (табл. 1).

Для выявления генов-биосенсоров малых доз ионизирующей радиации проводили сравнительный анализ экспрессии исследуемых генов после воздействия различных неблагоприятных факторов, таких как ионизирующая радиация (10, 20, 40 сГр), пары раствора формальдегида (3.5, 7.0, 14.0%), растворы толуола (1, 50, 100 мМоль/л) и диоксина (0.016, 0.822, 1.644 мМоль/л).

Цель данной работы – выявление у особей *Drosophila melanogaster* генов, достоверно меняющих уровень экспрессии, после воздействия ионизирующего излучения.

Объектами данного эксперимента были особи *Drosophila melanogaster* линии дикого типа *Canton-S* (Блумингтон, США). Мух разделили на две группы – опытную и контрольную. Все мухи содержатся

Таблица 1

## Исследуемые гены и их функции

Ген	Функция	Ссылка
<i>CG15820</i>	Неизвестная функция	[5]
<i>CG18302</i>	Участвует в метаболизме липидов	[5]
<i>CG31104</i>	Протеинкиназа-подобный белок	[5]
<i>CG6839</i>	DNA/RNA не специфическая эндонуклеаза	[5]
<i>CG6908</i>	Вовлечен в процесс стресс-ответа дрозофилы на воздействие инсектицидов	[7]
<i>Сурба2</i>	Цитохром P450, E-класс, группа I. Участвует в процессе утилизации синтетических инсектицидов и играет роль в метаболизме гормонов насекомых	[1, 6]
<i>Сурба8</i>	Цитохром P450, E-класс, группа I. Не увеличивает устойчивость к инсектицидам	[6, 9]
<i>Рерск</i>	Играет роль в регуляции метаболизма, играет ключевую роль в гомеостазе липидов	[10]
<i>Sugarbabe</i>	Участвует в ответных реакциях на стресс и голод. Сверхэкспрессия гена <i>Sugarbabe</i> увеличивает продолжительность жизни. Удаление у дрозофилы клеток, производящих инсулиноподобный белок, расположенных в средней части мозга, приводит к повышению накопления липидов и углеводов, продлению средней и максимальной продолжительности жизни и увеличению устойчивости к окислительному стрессу и голоду	[4, 8, 12]
<i>Tramtrack</i>	Вовлечен в дифференциальные процессы органогенеза	[2, 3, 11]



лись при 25 °С и 12-часовом режиме освещения на дрожжевой питательной среде. Опытную группу мух подвергли воздействию гамма-излучения от источника  $^{226}\text{Ra}$  в дозах 10, 20, 40 сГр на имагинальной стадии жизненного цикла. Мощность экспозиционной дозы составила 36 мГр/ч, время воздействия – 2 ч 47 мин., 5 ч 34 мин. и 11 ч 8 мин. соответственно.

Для определения экспрессии генов использовали по 15 особей на вариант эксперимента. Уровни экспрессии генов оценивали отдельно у самцов и самок. РНК выделяли с помощью RNeasy Mini Kit (Quagen, США) по инструкции изготовителя. Оценку концентрации и контроля качества выделенной РНК проводили методом капиллярного электрофореза на чипах с применением Experion RNA HighSens Analysis Kit (BioRad, США). Обратную транскрипцию для синтеза кДНК осуществляли с использованием набора QuantiTect Reverse Transcription Kit (Quagen, США) по инструкции изготовителя.

Для постановки ПЦР «в реальном времени» готовили реакционную смесь согласно инструкции изготовителя, которая содержала SYBR Green PCR Master Mix (Applied Biosystems, США), праймеры исследуемых генов (*CG15820*, *CG18302*, *CG31104*, *CG6839*, *CG6908*, *Сурба2*, *Сурба8*, *Рерск*, *Sugarbabe*, *Tramtrack*) и гена-референса ( *$\beta$ -Tubulin*) (СИНТОЛ, Россия). Затем данную смесь раскапывали в объеме 13 мкл в плашки с 200-мкл ячейками и добавляли по 2 мкл полученной кДНК для каждого образца.

Реакцию проводили в амплификаторе CFX96 (BioRad, США). Значения относительной экспрессии рассчитывали с помощью программного обеспечения CFX96 (BioRad, США).

Показано, что ионизирующая радиация в дозе 10, 20, 40 сГр вызывает закономерные изменения экспрессии генов у самцов, выраженные в обратной дозовой зависимости, характерной практически для всех генов (кроме *Tramtrack*), чего нельзя сказать о самках – четкой и достоверной картины изменений не прослеживается.

Анализ изменения экспрессии генов *CG15820*, *CG18302*, *CG31104*, *CG6839*, *CG6908*, *Сурба2*, *Сурба8*, *Рерск*, *Sugarbabe*, *Tramtrack* в ряду воздействий формальдегид-диоксин-толуол-ионизирующая радиация выявил следующие закономерности: все вышеперечисленные гены, кроме *Tramtrack*, изменяют свою экспрессию при всех четырех воздействиях. Ген *Tramtrack* является уникальным для таких воздействий, как диоксин (увеличение у самок при концентрации 1.644 мМоль/л) и ионизирующая радиация (у самок происходит увеличение при дозе 10 сГр и снижение – при 40 сГр, у самцов – снижение при дозе 40 сГр). Также из общей картины выделяется ген *CG15820*, который не изменяет свою экспрессию только после воздействия ди-

Таблица 2

## Наличие изменений в экспрессии изучаемых генов в зависимости от воздействия

Тип воздействия	Пол	Интенсивность воздействия	CG15820	CG18302	CG31104	CG6839	CG6908	Сур6a2	Сур6a8	Рерск	Sugarbabe	Tramtrack
Формальдегид, %	♂	3.5	-	+	+	0	+	+	+	+	0	0
		7	0	+	+	0	+	+	+	+	0	0
		14	-	+	+	0	+	+	+	+	0	0
	♀	3.5	-	-	0	+	+	+	+	0	+	0
		7	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0
		14	0	+	+	+	+	+	+	+	+	0
Диоксин, мМоль/л	♂	0.016	0	+	-	0	0	-	0	0	+	0
		0.822	0	+	0	-	-	-	0	0	-	+
		1.644	0	0	0	-	-	-	-	-	-	+
	♀	0.016	0	0	0	0	0	0	0	+	+	0
		0.822	0	-	0	0	0	-	-	0	0	-
		1.644	0	-	0	-	+	-	0	-	-	+
Толуол, мМоль/л	♂	1	+	+	0	0	-	-	-	-	+	0
		50	0	+	0	+	+	0	0	0	0	0
		100	0	+	+	+	0	0	-	-	0	0
	♀	1	+	0	+	+	0	0	0	+	+	0
		50	0	-	-	-	0	-	-	+	0	0
		100	0	-	-	-	-	+	+	+	0	0
Ионизирующая радиация, сГр	♂	10	+	+	+	+	0	+	+	+	+	0
		20	+	0	0	+	-	+	+	0	0	0
		40	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-
	♀	10	+	+	0	+	0	0	0	+	0	+
		20	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0
		40	-	0	0	+	0	0	0	0	0	0

Примечание. «+» – увеличение уровня транскрипции; прочерк – снижение уровня транскрипции; 0 – эффект на транскрипцию отсутствует.

оксина (табл. 2). Но так как *Tramtrack* в случае воздействия диоксина изменяет свою экспрессию только у самок и только при концентрации экотоксиканта, равной 1.644 мМоль/л, то можно предположить, что это изменение случайное и сделать вывод, что ген *Tramtrack*, принимающий участие в дифференциальных процессах онтогенеза, является уникальным для такого воздействия, как ионизирующая радиация, и может выполнять роль биосенсора.

Исследования поддержаны грантом «Экологическая генетика продолжительности жизни модельных животных (*Drosophila melanogaster*, *Mus musculus*)» № 12-П-4-1005 целевой Программы РАН «Молекулярная и клеточная биология».

### Литература

1. *Amichot M., Tares S., Brun-Barale A. et al.* Point mutations associated with insecticide resistance in the *Drosophila* cytochrome P450 Cyp6a2 enable DDT metabolism // *Eur. J. Biochem.*, 2004. Vol. 271. № 7. P. 1250-1257.
2. *Bajpe P.K., van der Knaap J.A., Demmers J.A. et al.* Deubiquitylating enzyme UBP64 controls cell fate through stabilization of the transcriptional repressor tramtrack // *Mol. Cell. Biol.*, 2008. Vol. 28. № 5. P. 1606-1615.
3. *Bartoletti M., Rubin T., Chalvet F. et al.* Genetic basis for developmental homeostasis of germline stem cell niche number: a network of Tramtrack-Group nuclear BTB factors // *PLoS ONE*, 2012. Vol. 7. № 11. P. e49958.
4. *Broughton S.J., Piper M.D., Ikeya T. et al.* Longer lifespan, altered metabolism, and stress resistance in *Drosophila* from ablation of cells making insulin-like ligands // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005. Vol. 102. № 8. P. 3105-3110.
5. *Celniker S.E., Wheeler D.A., Kronmiller B. et al.* Finishing a whole-genome shotgun: release 3 of the *Drosophila melanogaster* euchromatic genome sequence // *Genome Biol.*, 2002. Vol. 3. № 12. P. RESEARCH0079.
6. *Daborn P.J., Lumb C., Boey A. et al.* Evaluating the insecticide resistance potential of eight *Drosophila melanogaster* cytochrome P450 genes by transgenic over-expression // *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 2007. Vol. 37. № 5. P. 512-519.
7. *King-Jones K., Horner M.A., Lam G. et al.* The DHR96 nuclear receptor regulates xenobiotic responses in *Drosophila* // *Cell Metab.*, 2006. Vol. 4. № 1. P. 37-48.
8. *Landis G.N., Bhole D., Tower J.* A search for doxycycline-dependent mutations that increase *Drosophila melanogaster* life span identifies the *VhaSFD*, *Sugar baby*, *filamin*, *fwd* and *Cctl* genes // *Genome Biol.*, 2003. Vol. 4. № 2. P. R8.
9. *Maitra S., Price C., Ganguly R.* Cyp6a8 of *Drosophila melanogaster*: gene structure, and sequence and functional analysis of the upstream DNA // *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 2002. Vol. 32. № 8. P. 859-870.
10. *Reshef L., Olswang Y., Cassuto H. et al.* Glyceroneogenesis and the triglyceride/fatty acid cycle // *J. Biol. Chem.*, 2003. Vol. 278. № 33. P. 30413-30416.

11. Sun J., Smith L., Armento A. et al. Regulation of the endocycle/gene amplification switch by Notch and ecdysone signaling // J. Cell Biol., 2008. Vol. 182. № 5. P. 885-896.

12. Varghese J., Lim S.F., Cohen S.M. *Drosophila* miR-14 regulates insulin production and metabolism through its target, *sugarbabe* // Genes Dev., 2010. Vol. 24. № 24. P. 2748-2753.

#### DETECTION OF *DROSOPHILA MELANOGASTER* GENES AS BIOSENSORS OF LOW DOSES OF IONISING RADIATION

D.O. Peregudova, E.N. Plyusnina, M.V. Shaposhnikov, A.A. Moskalev  
Institute of Biology Komi SC UrD RAS, Syktyvkar, Russia,  
[delovoyd3@gmail.com](mailto:delovoyd3@gmail.com), [mshaposhnikov@mail.ru](mailto:mshaposhnikov@mail.ru)

Organisms are always faced with low doses of different stress-factors. So the urgent problem is the designing of the detection systems. One of the most perspective methods of biosensing is identification of adaptive changes in gene expression. As a result of our work the biosensor gene of low doses (20 cGy) of irradiation was detected. This gene is *Tramtrack*.

---

#### ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В БУККАЛЬНОМ ЭПИТЕЛИИ ГОРНЯКОВ И В КЛЕТКАХ МЕРИСТЕМЫ *VIGNA RADIATA*

Д.А. Петрашова<sup>1</sup>, Н.К. Белишева<sup>1</sup>, Н.А. Мельник<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кольский НЦ РАН, Апатиты, Россия, [petrashova@admksk.apatity.ru](mailto:petrashova@admksk.apatity.ru)

<sup>2</sup> Институт химии и технологии редких элементов  
и минерального сырья Кольского НЦ РАН,  
Апатиты, Россия, [melnik@chemy.kolasc.net.ru](mailto:melnik@chemy.kolasc.net.ru)

Подземная разработка руды, содержащей такие природные радионуклиды, как уран, торий, радий, представляет определенную опасность для здоровья горных рабочих вследствие смешанного облучения различными видами ионизирующего излучения.

Для выявления генотоксических эффектов ионизирующих источников излучения широко используется микроядерный тест. В определенных случаях генотоксические эффекты предпочтительнее изучать на клетках буккального эпителия, который позволяет при минимальном инвазивном вмешательстве получать информацию о генетических изменениях в клетках человека [7].

Для оценки генотоксических эффектов ионизирующих источников излучения также используется ана-телофазный анализ делящихся растительных клеток. В качестве растительной тест-системы

мы нами были выбраны проростки семян *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek, число хромосом в клетках составляет  $2n = 22$  [4].

Цель данного исследования – оценка генотоксических и цитотоксических эффектов природных источников ионизирующего излучения на буккальном эпителии горняков, пребывающих под землей в условиях смешанного ионизирующего излучения, и клетках меристемы *V. radiata*, инкубированных в шахте.

Материалом исследования служили:

1. Образцы буккального эпителия горняков, работающих под землей на производстве, связанном с добычей и обогащением лопаритовых руд (Ловозерский район, Мурманская область), и контрольной группы здоровых испытуемых, проживающих в г. Апатиты Мурманской области. Группы испытуемых состояли из 10 и восьми курящих мужчин соответственно в возрасте от 25 до 40 лет. Взятие образцов буккального эпителия и процедуры приготовления препаратов проводили в соответствии с методикой, описанной в работе [5], анализ частоты встречаемости клеток с генетическими и цитологическими нарушениями – на отдельно лежащих и распластанных клетках с подсчетом не менее 1 тыс. клеток на каждом препарате.

2. Корешки проростков семян *V. radiata*, подвергшихся действию ионизирующей радиации различного типа, источником которой является торийсодержащая лопаритовая руда, добываемая в шахтах. Семена, помещенные по 50 шт. в чашки Петри с влажной фильтровальной бумагой, проращивали в течение 5 сут. при  $t = 7^\circ\text{C}$  в трех повторностях в шахте по добыче лопаритовой руды (Мурманская область). Контрольные образцы проращивали при той же температуре в течение того же времени в лаборатории в г. Апатиты Мурманской области. Проращивание семян проводили в темноте, чтобы избежать действия световых ритмов, влияющих на структуру ритмов митотической активности [3].

Фиксацию, окрашивание и приготовление давленных препаратов осуществляли согласно методике, описанной в работе [2]. При изучении митоза использовали три-четыре корешка, из которых готовили отдельные препараты с последующим анализом не менее 1 тыс. клеток. Величину митотического индекса (МИ) определяли отдельно для каждого проростка, на основе чего рассчитывали среднее значение для каждой экспозиции. Цитологические нарушения учитывались отдельно, согласно классификации по И.А. Алову [1].

Анализ препаратов проводили с помощью микроскопа AXIOSTAR PLUS (Karl Zeiss, Германия) (объектив  $\times 15$ , окуляр  $\times 40$ ). Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью STATISTICA 6.

Регистрация смешанных видов ионизирующего излучения (альфа-, бета-, гамма- и нейтронное излучение) проводилась в шахте сотрудниками аккредитованной региональной лаборатории радиационного контроля ИХТРЭМС Кольского НЦ РАН по аттестованным методикам на сертифицированном оборудовании: Радиометр-спектрометр МКС-А-03-1Н; Радиометр гамма-излучения ДКГ-07Д «Дрозд» ФВКМ.412113.026; Аэрозольный альфа-радиометр РАА-20П2 «Поиск»; Альфа-радиометр РАА-3-01 «Альфа-АЭРО».

Лопаритовая руда наряду с ценными металлами (Ti, Ta, Nb и др.) содержит примеси природных радионуклидов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ), являющиеся источником смешанных видов ионизирующего излучения, заряженные частицы которого оседают на пыли и взвешках, содержащихся в шахтном пространстве. Исследования по измерению содержания природных радионуклидов, входящих в ряды  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ , на поверхности рудного тела и в различных шахтных отсеках, проведенные в шахте Ловозерского района (пос. Ревда), показали, что при отсутствии техногенных радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и др.) мощность экспозиционной дозы (МЭД) на поверхности выхода рудного тела достигала 1.9 мкЗв/ч, в то время как гаммафон и МЭД, измеренные на всем протяжении шахты, находились в пределах 0.5-1.5 мкЗв/ч. В воздушном пространстве всех шахтных отсеков выявлено наличие дочерних продуктов распада  $^{224}$ ,  $^{226}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ : радиоактивные газы радон и торон, а также RaA, RaB и RaC, при распаде которых излучаются альфа частицы, обладающие высокой генотоксичностью. Максимальные концентрации радона (до 20 тыс. Бк/м<sup>3</sup>) выявлены непосредственно в забое и плохо вентилируемых местах [6], поэтому инкубацию чашек Петри с исследуемыми объектами проводили в забое, где предполагался источник смешанных типов ионизирующего излучения: плотно- (альфа- частицы и нейтроны) и редко- (гамма-радиация) ионизирующее излучение.

Встречаемость клеток с микроядрами в контрольной группе и у горняков достоверно не различается ( $p = 0.37$ ). А число клеток с апоптозными тельцами в два раза выше в контрольной группе, чем у горняков ( $p = 0.06$ ). При объединении всех типов цитологических и ядерных нарушений, характеризующих гибель клеток по типу некроза или апоптоза, оказалось, что в группе горняков в 1.9 раз чаще встречается гибель клеток буккального эпителия по типу некроза (66.9% против 35.2,  $p = 0.0001$ ), т.е. преобладает гибель клеток по типу некроза. В то же время в контроле гибель клеток по типу апоптоза встречается в 1.8 раз чаще, чем в группе горняков (5.9% против 3.3,  $p = 0.0771$ ).

Анализ препаратов контрольных образцов показал, что митотический индекс в корешках контрольной группы составил  $8.8 \pm 1.4\%$ ,

число нарушений митоза не превышало 2.6% и в среднем составило 0.9%. Из нарушений митотического деления клеток наблюдаются отставание хромосом в анафазе и К-митоз.

Митотический индекс в корешках, подвергшихся облучению природным ионизирующим излучением в лопаритовой шахте, был достоверно ниже, чем в контрольных образцах, что свидетельствует о снижении интенсивности клеточного деления. Следует отметить, что, несмотря на то, что чашки Петри с семенами располагались в одном и том же месте шахты, полученные результаты довольно сильно отличаются как по показателям митотического индекса, так и по количеству нарушений митоза. Так, митотический индекс в облученных образцах в 1.5, 2.0 и 10.0 раз достоверно ниже, чем в контроле. Нарушений митозов у облученных проростков в одном случае (чашка № 3) в 12 раз больше, чем в контроле, во втором – их число достоверно не отличается (чашка № 2), и в третьем случае таковые нарушения отсутствуют вследствие очень низкой степени пролиферации. Такие различия, вероятно, связаны с тем, что образцы подвергались смешанному облучению разнокачественного характера (плотно- и редкоионизирующее излучение), неоднородностью пространственного распределения источников, и, как следствие, образцы получили разные дозы облучения.

Нарушения митотического деления в клетках в образцах облученных проростков проявлялись в отставании хромосом, мостах в телофазе, фрагментации и слипании хромосом, множественных и многополюсных митозах. Число нарушений митоза достигало 18% на один препарат.

Согласно литературным данным, увеличение числа патологических митозов наблюдается при радиационном поражении и вирусной инфекции. Облучение организма приводит к резкому снижению митотической активности с ее последующим восстановлением. Во время восстановления пролиферации происходит увеличение числа патологических митозов. Их характер и количество зависят от дозы и времени облучения. При радиационном поражении наблюдаются патологии митоза, преимущественно связанные с повреждением хромосом: фрагментация хромосом, их набухание, слипание и образование мостов. Одновременно возникают нарушения движения хромосом и поражаются процессы цитотомии. Возникновение многополюсных митозов наблюдаются при слабых воздействиях ионизирующего излучения на культуры тканей. Нарушение цитотомии и возникновение многополюсных митозов приводят к образованию многоядерных клеток [1].

Таким образом, полученные нами результаты по *V. radiata* и буккальному эпителию горняков согласуются друг с другом и лите-

ратурными данными. Так, в буккальном эпителии горняков генотоксические эффекты, вызванные облучением смешанными источниками ионизирующего излучения природного происхождения, проявляются в возрастании более чем на порядок двуядерных клеток по сравнению с контрольной группой. Резкое возрастание двуядерных клеток в группе горняков по сравнению с контрольной группой может свидетельствовать о воздействии ионизирующей радиации на процесс цитокинеза, нарушение которого может приводить к появлению многоядерных клеток.

Работа поддержана грантом РФФИ и Администрацией Мурманской области, проект № 10-04-98809-р\_север\_a.

### Литература

1. Алов И.А. Цитофизиология и патология митоза. М.: Медицина, 1972. 264 с.
2. Буторина А.К., Тиен До Ньы. Ритмы суточной активности у золотистой фасоли *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek // Цитология, 2008. Т. 50. № 8. С. 729-733.
3. Гриф В.Г., Мачс Э.М. Влияние ритма освещенности на митотический цикл в корневой меристеме растений // Цитология, 1996. № 28 (7). С. 718-725.
4. Карпеченко Г.Д. О хромосомах видов фасоли // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. Л., 1926. № 14(2). С. 143-148.
5. Мейер А.В., Дружинин В.Г., Ларионов А.В., Толочко В.А. Генотоксические и цитотоксические эффекты в буккальных эпителиоцитах детей, проживающих в экологически различающихся районах Кузбасса // Цитология, 2010. Т. 52. № 4. С. 305-310.
6. Петрашова Д.А., Белишева Н.К., Пелевина И.И. и др. Генотоксические эффекты в буккальном эпителии горняков, работающих в условиях облучения природными источниками ионизирующего излучения // Изв. Самарского НЦ РАН, 2011. Т. 13. № 1(7). С. 1792-1796.
7. Holland N., Bolognesi C., Kirsch-Volders M. et al. The micronucleus assay in human buccal cells as a tool for biomonitoring DNA damage. The HUMN project perspective on current status and knowledge gaps // Mutat. Res., 2008. Vol. 659 (1-2). P. 93-108.

### CYTOGENETIC EFFECTS OF IONIZING RADIATION IN BUCCAL EPITHELIUM OF MINERS AND MERISTEMATIC CELLS OF *VIGNA RADIATE*

D.A. Petrashova<sup>1</sup>, N.K. Belisheva<sup>1</sup>, N.A. Melnik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kola Science Center of RAS, Apatity, Russia, [petrashova@admksk.apatity.ru](mailto:petrashova@admksk.apatity.ru)

<sup>2</sup> Institute of Chemistry and Technology of Scarce Elements and Mineral Sources, Kola Science Center of RAS, Apatity, Russia, [melnik@chemy.kolasc.net.ru](mailto:melnik@chemy.kolasc.net.ru)

The study results of the cytogenetic damages in the buccal cells of miners working in conditions of natural ionizing radiation exposure are presented. It



is shown that genotoxic effects in the buccal cells of the miners are manifested in the reduce of the normal cell frequency, in the increase of the necrotic cells and in the increase of the binuclear cells in 26 times. The study results of the cytogenetic damage in *Vigna radiata* meristematic cells exposed to a mixed natural ionizing radiation in the loparite mine are presented. It is shown that the cytotoxic effects in the *V. radiata* meristem are manifested in mitotic index reducing, lagging chromosomes, bridges in telophase, chromosomes fragmentation and chromosomes stickiness, multiple and multi mitosis.

---

## ВЛИЯНИЕ АКТИВНОСТИ ГЕНОВ РЕПАРАЦИИ ДНК НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ И РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ *DROSOPHILA MELANOGASTER*

Е.Н. Плюснина<sup>1, 2</sup>, Л.А. Шилова<sup>1</sup>, А.А. Москалев<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[ekaterina.plyusnina@gmail.com](mailto:ekaterina.plyusnina@gmail.com)

<sup>2</sup> Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар, Россия

<sup>3</sup> Московский физико-технический университет, Долгопрудный, Россия

Зависимость величины эффектов ионизирующих излучений от дозы в диапазоне малых доз воздействия нелинейна, что сопровождается возникновением таких эффектов, как гиперчувствительность, гормезис и адаптивный ответ. В исследованиях, выполненных на клеточных культурах, удалось выявить основные ферментативные пути, участвующие в данных процессах. Однако до сих пор открытым остается вопрос, каким образом интегрируются отдельные клеточные процессы в изменении параметров жизнедеятельности целого организма, в частности, продолжительности жизни (ПЖ). Репарация ДНК является важнейшим механизмом, обеспечивающим ответ клетки на действие разнообразных стрессовых факторов, включая  $\gamma$ -излучение [1, 2, 12]. Ранее нами показано, что нарушение активности генов, которые обеспечивают ответ на повреждение ДНК, в частности, гомологов *FOXO*, *SIRT1*, *JNK*, *ATM*, *ATR* и *p53*, снижают радиоустойчивость особей *Drosophila melanogaster* и приводят к отсутствию радиоиндуцированного гормезиса и адаптивного ответа по показателю ПЖ [7].

Цель данной работы – изучение роли гомологов генов эксцизионной репарации ДНК *Gadd45*, *XPF (Mei-9)* и *XPC (Mus210)* в регуляции ПЖ при действии  $\gamma$ -излучения на особей *Drosophila melanogaster in vivo*.

Для изучения влияния мутаций в генах репарации ДНК на ПЖ и радиочувствительность дрозофил использовали следующие лабораторные линии (Bloomington Stock Center, США): линия дикого

типа *Canton-S*; *D-Gadd45* ( $y^* w^*$ ;  $P\{GawB\} Gadd45^{NP0351}/y^* w^*$ ;  $P\{GawB\}Gadd45^{NP035}$  и  $y^* w^*$ ;  $P\{GawB\}Gadd45^{NP0351}/CyO$ ); *Mei-9* ( $w^1 mei-9^{A1}/w^1 mei-9^{A1}$ ) и *Mei-9/+* ( $w^1 mei-9^{A2}/C(1)DX, y^1 f^1$ ); *Mus210/+* ( $mus210^{G1}/CyO$ ). Особи каждого из изучаемых генотипов были разделены на четыре группы: 1) без облучения; 2) особи, подверженные хроническому воздействию  $\gamma$ -излучения от источника с  $^{226}\text{Ra}$  в дозе 40 сГр за поколение на предимагинальных стадиях развития (10 сут); 3) особи, подверженные острому воздействию  $\gamma$ -излучения в дозе 30 Гр от источника с  $^{60}\text{Co}$  сразу после вылета имаго (30 мин.);

Таблица 1

**Изменение продолжительности жизни дрозophil линии дикого типа *Canton-S* и линий с мутациями в генах репарации ДНК после различных режимов облучения**

Вариант эксперимента	Самцы				Самки			
	<i>M</i>	$\bar{X} \pm \Delta m$	90%	<i>N</i>	<i>M</i>	$\bar{X} \pm \Delta m$	90%	<i>N</i>
<i>Canton-S</i> Без облучения	47	47.9±0.6	58	379	58	55.0±0.8	68	328
<i>Canton-S</i> 40 сГр	54*	52.2±0.6*	65**	478	65	63.0±0.6*	71	378
<i>Canton-S</i> 30 Гр	20	22.0±0.3	26	399	28	29.8±0.5	45	420
<i>Canton-S</i> 40 сГр +30 Гр	45*	40.2±0.7*	56*	358	46*	44.4±0.7*	60	397
<i>D-Gadd45</i> Без облучения	48	50.2±1.5	82	195	56	52.6±1.4	80	242
<i>D-Gadd45</i> 40 сГр	45*	43.0±1.2*	58*	144	44*	45.1±1.2*	63*	193
<i>D-Gadd45</i> 30 Гр	43	42.7±1.3	69	197	38	43.8±1.3	74	203
<i>D-Gadd45</i> 40 сГр +30 Гр	37.5**	40.5±1.2**	67	228	39	41.5±1.2**	65*	175
<i>D-Gadd45/+</i> Без облучения	22	24.9±0.8	35	173	33.5	33.8±1.2	56	154
<i>D-Gadd45/+</i> 40 сГр	22	25.8±0.9	43	180	30*	28.8±0.8*	41*	151
<i>D-Gadd45/+</i> 30 Гр	24	26.6±0.7	39	190	32	31.1±1	46	140
<i>D-Gadd45/+</i> 40 сГр +30 Гр	19*	23.1±0.8*	32	167	32	31.4±0.9	45	152
<i>Mei-9</i> Без облучения	43	39.0±1.1	59	219	39	37.2±1.2	58	201
<i>Mei-9</i> 40 сГр	42**	38.9±1.1**	57*	186	31.5*	35.5±1.7*	60*	115
<i>Mei-9</i> 30 Гр	45	36.7±1.7	57	108	40	37.9±1.7	60	117
<i>Mei-9</i> 40 сГр +30 Гр	29.5*	30.2±1.6*	52*	125	33*	33.5±1.1*	56*	177
<i>Mei-9/+</i> Без облучения	–	–	–	–	33	31.4±0.5	41	270
<i>Mei-9/+</i> 40 сГр	–	–	–	–	31*	30.4±0.3*	38*	543
<i>Mei-9/+</i> 30 Гр	–	–	–	–	32	30.0±0.6	39	204
<i>Mei-9/+</i> 40 сГр +30 Гр	–	–	–	–	27*	27.4±0.6*	39	216
<i>Mus210/+</i> Без облучения	32	31.7±0.4	43	468	57	52.4±0.6	65	453
<i>Mus210/+</i> 40 сГр	33	32.3±0.3*	40	352	55**	56.3±0.6*	69	429
<i>Mus210/+</i> 30 Гр	33	30.9±0.5	46	469	46	44.7±0.5	60	537
<i>Mus210/+</i> 40 сГр +30 Гр	31	30.4±0.5*	45	412	53*	48.1±0.5*	60	511

*Примечание.* *M* – медианная продолжительность жизни, сут.;  $\bar{X} \pm \Delta m$  – средняя продолжительность жизни, сут. и ошибка средней; 90% – возраст 90%-ной смертности, сут.; \* и \*\* – различия достоверны при  $p < 0.001$  и  $p < 0.05$ , соответственно, между вариантами «Без облучения» и «40 сГр» и между вариантами «30 Гр» и «40 сГр + 30 Гр» (столбец «*M*» – по критерию Гехана-Бреслоу-Вилкоксона; столбец « $\bar{X} \pm \Delta m$ » – по критерию Колмогорова-Смирнова, столбец «90%» – по методу Ванг-Аллисона).

4) особи, которых последовательно облучали в обеих дозах. Эксперимент проводили при 25 °С и 12-часовом режиме освещения на агарно-дрожжевой питательной среде. Рассчитывали среднюю, медианную ПЖ, возраст 90%-ной смертности и другие параметры. Для оценки достоверности различий между выборками применяли непараметрические критерии Гехана-Бреслоу-Вилкоксона и Колмогорова-Смирнова, а также метод Ванг-Аллисона для оценки различий по возрасту 90%-ной смертности (табл 1, 2).

Анализ возраст-зависимого изменения экспрессии генов *D-Gadd45*, *Mei-9* и *Mus210* проводили у дрозофил линии дикого типа *Canton-S*, которые были разделены на две группы: 1) без облучения; 2) особи, хронически облученные в дозе 40 сГр за поколение на предимагинальных стадиях развития. Применяли стандартные процедуры выделения РНК (TRIzol Reagent, Invitrogen) и обратной транскрипции (SuperScriptIII, Invitrogen). ПЦР проводили в амплификаторе CFX-96 (BioRad) с использованием красителя SYBR Green I (Applied Biosystems) и праймеров исследуемых генов (СИНТОЛ).

Для изучения влияния повсеместной кондиционной сверхэкспрессии генов репарации ДНК на ПЖ и радиочувствительность дрозофил использовали линии с дополнительными копиями исследуе-

Таблица 2

**Изменение продолжительности жизни дрозофил со сверхэкспрессией генов репарации ДНК после острого воздействия  $\gamma$ -излучения в дозе 30 Гр**

Вариант эксперимента	Самцы				Самки			
	M	$\bar{X} \pm \Delta m$	90%	N	M	$\bar{X} \pm \Delta m$	90%	N
<i>UAS-D-GADD45/GS-GAL4</i> (-)	58	51.7±1.4	78	217	59	55.3±1.1	73	208
<i>UAS-D-GADD45/GS-GAL4</i> (-) 30 Гр	58	50.1±1.4	67	177	66*	60.9±1.1*	76	224
<i>UAS-D-GADD45/GS-GAL4</i> + RU486 (+)	17	14.3±0.4	19	207	16	17.8±0.4	27	239
<i>UAS-D-GADD45/GS-GAL4</i> + RU486 (+) 30 Гр**	13**	12.6±0.2**	17**	227	14**	15.9±0.3**	22**	263
<i>UAS-Mei-9/GS-GAL4</i> (-)	43	41.4±1.1	59	215	46	46.0±0.8	59	246
<i>UAS-Mei-9/GS-GAL4</i> (-) 30 Гр	37*	34.0±1.4*	49*	121	46	43.9±1.3**	63	147
<i>UAS-Mei-9/GS-GAL4</i> + RU486 (+)	17	22.5±0.9	46	240	24	25.2±0.8	44	234
<i>UAS-Mei-9/GS-GAL4</i> + RU486 (+) 30 Гр**	13**	14.9±0.6**	18**	210	16**	22.8±1.0**	50**	206
<i>UAS-Mus210/GS-GAL4</i> (-)	40	37.9±0.8	49	220	49	49.9±0.9	69	214
<i>UAS-Mus210/GS-GAL4</i> (-) 30 Гр	26*	28.9±0.5*	40*	215	46*	45.5±0.9*	55*	147
<i>UAS-Mus210/GS-GAL4</i> + RU486 (+)	13	14.4±0.5	25	209	15	14.7±0.4	22	197
<i>UAS-Mus210/GS-GAL4</i> + RU486 (+) 30 Гр**	19**	17.7±0.6**	26	194	19**	17.0±0.6**	25**	218

*Примечание.* (-) – без сверхэкспрессии; (+) – сверхэкспрессия гена; M – медианная продолжительность жизни, сут.;  $\bar{X} \pm \Delta m$  – средняя продолжительность жизни, сут. и ошибка средней; 90% – возраст 90%-ной смертности, сут.; \* и \*\* – различия достоверны при  $p < 0.001$  и  $p < 0.05$  соответственно между вариантами «Без облучения» и «30 Гр» (столбец «M» – по критерию Гехана-Бреслоу-Вилкоксона; столбец « $\bar{X} \pm \Delta m$ » – Колмогорова-Смирнова, столбец «90%» – по методу Ванг-Аллисона).

мых генов под контролем промотера UAS: *UAS-D-Gadd45* (генотип:  $w^{1118}$ , *UAS-D-Gadd45*) (любезно предоставлена Uri Abdu, Ben-Gurion University, Израиль), *UAS-Mei-9* (генотип:  $w^{1118}$ , *UAS-Mei-9*) (Genetivision, США), *UAS-Mus210* ( $w^{1118}$ , *UAS-Mus210*) (Genetivision, США). Для получения особей с повсеместной конституционной сверхэкспрессией генов *D-Gadd45*, *Mei-9* и *Mus210* скрещивали самок перечисленных линий с самцами линии *P{Act5C(-FRT)GAL4.Switch.PR}3/TM6B, Tb<sup>1</sup>* (далее – *GS-GAL4*) с мифепристон-индуцибельным драйвером GAL4 (Bloomington *Drosophila* Stock Center, США) с последующим добавлением в питательную среду мифепристона RU486 (Mifepristone, Sigma). В качестве контроля использовали мух с тем же генотипом, живущих на питательной среде без мифепристона. Особей со сверхэкспрессией генов репарации ДНК и без сверхэкспрессии разделяли на две группы: 1) без облучения; 2) особи, подверженные острому воздействию  $\gamma$ -излучения в дозе 30 Гр. Анализ ПЖ проводили аналогично эксперименту с линиями с мутациями изучаемых генов.

Хроническое воздействие  $\gamma$ -излучения в дозе 40 сГр на предимагинальных стадиях развития индуцировало радиационный гормезис и адаптивный ответ на острое воздействие  $\gamma$ -излучения в дозе 30 Гр у особей линии дикого типа *Canton-S*. После облучения в дозе 40 сГр медианная ПЖ дрозофил была выше на 12-15% ( $p < 0.001$ ) по сравнению с необлученными мухами, а эффект негативного влияния  $\gamma$ -излучения в дозе 30 Гр был снижен почти в два раза ( $p < 0.001$ ). У дрозофил с мутациями в генах *D-Gadd45*, *Mei-9* и *Mus210* после хронического воздействия  $\gamma$ -излучения в дозе 40 сГр медианная ПЖ либо достоверно не изменялась, либо снижалась на 3-21% ( $p < 0.05$ ). У самцов и самок дрозофил с мутациями в генах *D-Gadd45* и *Mei-9* и у самцов с мутацией *Mus210* также отсутствовал радиоадаптивный ответ. Ген *D-Gadd45* является ортологом семейства *Gadd45*, участвующего в контроле клеточного цикла, репарации ДНК, апоптозе, выживании и пролиферации клеток с помощью межбелковых взаимодействий [4, 8, 9]. Белки *Gadd45* контролируют активность белков репарации ДНК (PCNA, XPF, XPG) и обеспечивают доступность поврежденных участков ДНК для ферментов репарации [5]. Гены *Mei-9* и *Mus210* являются гомологами *XPF* и *XPC* млекопитающих. Белковые продукты этих генов необходимы для инициации эксцизионной репарации нуклеотидов, мисматчей и перекрестных шшивок [3, 10, 11]. Полученные данные демонстрируют, что гены *Gadd45*, *XPF* (*Mei-9*) и *XPC* (*Mus210*) играют ключевую роль в ответе на действие  $\gamma$ -излучения и даже частичного снижения их активности достаточно для утраты организмом способности проявлять гормезис и адаптивный ответ.

Малые дозы ионизирующего излучения способны активировать компоненты стресс-сигналинга, включая сенсоры, трансдукторы и эффекторы. В результате организм становится более адаптированным к последующим повреждающим воздействиям. В пользу данного объяснения говорят данные по возраст-зависимому изменению экспрессии генов репарации ДНК. Сразу после хронического воздействия  $\gamma$ -излучения в дозе 40 сГр у особой линии дикого типа *Canton-S* наблюдали повышение экспрессии генов *Mei-9* и *Mus210* (но не *D-Gadd45*) в 1.7-2.2 раз. Данный эффект сохранялся в течение всей жизни дрозофил.

Мы предположили, что сверхэкспрессия генов *D-Gadd45*, *Mei-9* и *Mus210* может повысить эффективность репарации ДНК и радиостойчивость организма, так же как облучение в малых дозах. Однако медианная ПЖ дрозофил с повсеместной кондиционной сверхэкспрессией изучаемых генов эксцизионной репарации ДНК снизилась на 26-36% ( $p < 0.001$ ) без повышения устойчивости к острому воздействию  $\gamma$ -излучения в дозе 30 Гр. Наблюдаемый эффект может быть связан с рядом причин. Во-первых, увеличение экспрессии только генов эксцизионной репарации ДНК могло оказаться недостаточно для проявления благоприятных эффектов. В частности, показано, что в культуре фибробластов человека повышенная активность генов репарации ДНК замедляет репликативное старение только на фоне сверхэкспрессии деацетилазы гистонов SIRT6 [6]. Во-вторых, процессы репарации ДНК являются высокоэнергетическими, и сверхэкспрессия генов репарации ДНК могла привести к чрезмерному расходу энергии в ущерб другим жизненно важным процессам.

Работа поддержана грантами Президиума РАН 12-П-4-1005 «Экологическая генетика продолжительности жизни модельных животных (*Drosophila melanogaster*, *Mus musculus*)» и 12-С-4-1007 «Структурно-функциональная организация хромосом в клеточном цикле».

#### Литература

1. Москалев А.А., Плюснина Е.Н., Зайнуллин В.Г. Влияние гамма-излучения в малых дозах на продолжительность жизни у мутантов дрозофилы по распознаванию и репарации повреждений ДНК // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 5. С. 586-588.
2. de Boer J., Andressoo J.O., de Wit J. et al. Premature aging in mice deficient in DNA repair and transcription // Science, 2002. Vol. 296. № 5571. P. 1276-1279.
3. Henning K.A., Peterson C., Legerski R., Friedberg E.C. Cloning the *Drosophila* homolog of the xeroderma pigmentosum complementation group C gene reveals homology between the predicted human and *Drosophila* polypeptides and that encoded by the yeast *RAD4* gene // Nucleic Acids Res., 1994. Vol. 22. № 3. P. 257-261.

4. Liebermann D.A., Hoffman B. Gadd45 in stress signaling // J. Mol. Signal., 2008. Vol. 3. P. 15.
5. Ma D.K., Guo J.U., Ming G., Song H. DNA excision repair proteins and Gadd45 as molecular players for active DNA demethylation // Cell Cycle, 2009. Vol. 8. № 10. P. 1526-1531.
6. Mao Z., Tian X., Van Meter M. et al. Sirtuin 6 (SIRT6) rescues the decline of homologous recombination repair during replicative senescence // PNAS, 2012. Vol. 109. № 29. P. 11800-11805.
7. Moskalev A.A., Plyusnina E.N., Shaposhnikov M.V. Radiation hormesis and radioadaptive response in *Drosophila melanogaster* flies with different genetic backgrounds: the role of cellular stress-resistance mechanisms // Biogerontology, 2011. Vol. 12. № 3. P. 253-263.
8. Moskalev A.A., Smit-McBride Z., Shaposhnikov M.V. et al. Gadd45 proteins: Relevance to aging, longevity, and age-related pathologies // Aging Res. Rev., 2012. Vol. 11. № 1. P. 51-66.
9. Peretz G., Bakhrat A., Abdu U. Expression of the *Drosophila melanogaster* GADD45 homolog (CG11086) affects egg asymmetric development that is mediated by the c-Jun N-terminal kinase pathway // Genetics, 2007. Vol. 177. P. 1691-1702.
10. Radford S.J., McMahan S., Blanton H.L., Sekelsky J. Heteroduplex DNA in meiotic recombination in *Drosophila mei-9* mutants // Genetics, 2007. Vol. 176. № 1. P. 63-72.
11. Vogel E.W., Nivard M.J. The response of germ cells to ethylene oxide, propylene oxide, propylene imine and methyl methanesulfonate is a matter of cell stage-related DNA repair // Environ. Mol. Mutagen., 1997. Vol. 29. № 2. P. 124-135.
12. Zhao B., Benson E.K., Qiao R. Cellular senescence and organismal ageing in the absence of p21<sup>CIP1/WAF1</sup> in *ku80*<sup>-/-</sup> mice // EMBO reports, 2009. Vol. 10. № 1. P. 71-78.

#### EFFECTS OF DNA EXCISION REPAIR GENE ACTIVITY ON LIFESPAN AND RADIOSENSITIVITY OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*

E.N. Plyusnina<sup>1, 2</sup>, L.A. Shilova<sup>1</sup>, A.A. Moskalev<sup>1-3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biology Komi SC UrD RAS, Syktyvkar, Russia,  
[ekaterina.plyusnina@gmail.com](mailto:ekaterina.plyusnina@gmail.com)

<sup>2</sup> Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

Low-dose ionizing radiation is known to induce non-linear alterations in cells and tissues, and causes a wide range of biological effects including hypersensitivity, hormesis, adaptive response that modulates lifespan. DNA repair is an essential mechanism of cell response to different stress impacts including ionizing irradiation. It is a topical issue to disclose its role in stress-response regulation and integration in the whole-organism level. The aim of this work was to study the role of genes *GADD45*, *XPC*, *XPF* that involved in DNA excision repair, in lifespan regulation under *in vivo* ionizing radiation exposure in *Drosophila melanogaster*. Lifespan assay showed that chronic low-

dose irradiation induces the radiation hormesis and adaptive response in *Canton-S* wild-type flies. These effects were absent or less expressed in flies with mutations in *GADD45*, *XPC*, *XPF* homologues. The expression levels of investigated genes were estimated in *Canton-S* wild-type imago after gamma-irradiation at 40 cGy dose rate. Transcriptional activities of *XPC* and *XPF* genes (but not *GADD45*) were increased by 1.7-2.2 times. This effect was partially persisted during *Drosophila* lifetime. Obtained data show an essential role of DNA excision repair genes in gamma-irradiation biological effects. We supposed that overexpression in *GADD45*, *XPC*, *XPF* genes might result more efficient DNA repair and increase the radioresistance of organism same as previous low-dose exposure. However, it was not revealed increased resistance to gamma-irradiation exposure at 30 Gy dose rate in flies with conditional ubiquitous overexpression of DNA excision repair genes. In contrast, the lifespan decrease by 26-36% was shown in flies with *XPC* and *XPF* over-expression.

---

### ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ И ИММУНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТИМУЛИРОВАННЫХ ЛИМФОЦИТОВ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА СВЯЗАНЫ СО СКОРОСТЬЮ ПРОЛИФЕРАЦИИ КЛЕТОК

А.М. Серебряный<sup>1</sup>, М.М. Антошина<sup>2</sup>, А.В. Алещенко<sup>1</sup>, О.В. Кудряшова<sup>3</sup>,  
М.Ф. Никонова<sup>4</sup>, Н.И. Рябченко<sup>2</sup>, А.А. Ярилин<sup>4</sup>, И.И. Пелевина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Москва, Россия,  
[amserebr@sky.chph.ras.ru](mailto:amserebr@sky.chph.ras.ru)

<sup>2</sup> Медицинский радиологический научный центр Минздравсоцразвития  
РФ, Обнинск, Россия

<sup>3</sup> Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup> Государственный научный центр «Институт иммунологии» ФМБА  
России, Москва, Россия

Культура стимулированных лимфоцитов периферической крови человека (ЛПК) – один из наиболее часто употребляемых объектов в цитогенетических и молекулярно-биологических исследованиях. Известно, что стимулированные ЛПК являются асинхронной популяцией, состоящей из клеток, находящихся на разных фазах клеточного цикла. Однако мало что известно о скорости, с которой клетки в популяции движутся по клеточному циклу, о количестве клеток, находящихся в заданный момент времени, на той или иной стадии клеточного цикла, об изменении свойств ЛПК при изменении скорости их продвижения по клеточному циклу.

При метафазном анализе частоты клеток с абберациями хромосом для оценки скорости движения ЛПК используют *proliferation rate index* – показатель скорости пролиферации [7, 8]. Для его измерения с помощью бромдезоксисуридина измеряют количество кле-

ток в популяции, находящихся в данный момент времени на стадии первого, второго или третьего митоза, и затем по этим данным рассчитывают индекс. Было установлено, например, что воздействие солей никеля [11] или стирол оксида [4] снижает скорость движения клеток.

При изучении действия генотоксических агентов на ЛПК широко используется микроядерный тест в сочетании с цитокINETическим блоком, вызываемым введением в культуру цитохалазина В. Особенность метода состоит в том, что он позволяет, с одной стороны, корректно оценивать поврежденность генома после воздействий, с другой – одновременно оценить скорость движения клеток по клеточному циклу. Последняя задача решается путем расчета аналогичного пролиферативного индекса (ПИ).

Он рассчитывается по составу клеточной популяции, состоящей, после введения в культуру клеток цитохалазина В на 48 ч после стимуляции и фиксации клеток спустя 24 ч, из одно-, дву- и многоядерных клеток, а также из небольшого числа клеток в стадии митоза.  $PI = [(число\ одноядерных\ клеток\ в\ популяции) + 2 * (число\ двуядерных\ клеток) + 3 * (число\ трех- +\ четырехядерных\ клеток) + (число\ клеток\ в\ стадии\ митоза)] / \text{число\ просмотренных\ клеток}$  [3, 6]. Таким образом, ПИ по сути есть среднее число митозов, произошедших в популяции за 24 ч, и чем выше средняя скорость движения клеток по клеточному циклу, чем больше прошло митозов, тем выше значение ПИ.

В настоящей работе мы описанными выше способами исследовали связи скорости движения ЛПК по клеточному циклу с рядом показателей: спонтанной или индуцированной поврежденностью генома, с содержанием в популяции CD25, CD69 и Ki-67 положительных Т-лимфоцитов. Выбор этих иммунологических маркеров был обусловлен их тесной связью с пролиферацией ЛПК. CD69 – плейотропный иммунорегулятор, самый ранний маркер активации. В  $G_0$  фазе концентрация лимфоцитов с этим антигеном мала, но резко возрастает уже через час после стимуляции и достигает максимума к 24 ч [13]. Экспрессия этого маркера активировывает целый ряд функций, в том числе и пролиферацию, однако активация CD69 не всегда сопровождается активацией пролиферации [5]. CD25 является ранним маркером активации [1], а Ki-67 – маркер, экспрессия которого, по мнению некоторых исследователей, абсолютно необходима для прогрессии клеток по клеточному циклу. Ряд авторов считает, что экспрессия его происходит лишь с началом S фазы [10], другие сообщают, что Ki-67 положительные клетки обнаруживаются во всех фазах клеточного цикла, за исключением фазы  $G_0$  [12].



С помощью микроядерного теста пролиферативный индекс измерялся как для популяции, не подвергавшейся радиационным воздействиям (исходный пролиферативный индекс), так и для популяции, облученной через 48 ч после стимуляции в дозе 1 Гр (пролиферативный индекс после облучения). Цитохалазин В вводили сразу после облучения, клетки фиксировали через 72 ч после стимуляции.

С помощью метафазного анализа пролиферативный индекс был измерен для популяции, облученной через 48 ч после стимуляции ФГА в дозе 1.0 Гр, а также для популяции, облученной дозе 0.05 Гр через 24 ч после стимуляции и в дозе 1.0 Гр 24 ч спустя. В обоих случаях фиксацию клеток производили через 50 или 72 ч после стимуляции.

По результатам микроядерного теста облучение в дозе 1.0 Гр лишь незначительно снижает пролиферативный индекс с  $2.00 \pm 0.07$  (24 чел.) до  $1.90 \pm 0.05$  (16 чел.), но это снижение статистически не значимо ( $p = 0.057$ , тест Манна-Уитни). Однако облучение существенно снижает его индивидуальную вариабельность: коэффициент вариации снижается с 16.7 до 9.8% и различие дисперсий между двумя массивами становится значимым ( $p = 0.023$ ). В этом, вероятно, и кроется причина того, что исходный пролиферативный индекс и пролиферативный индекс после облучения хотя и достоверно коррелируют между собой ( $p = 0.017$ ), но с коэффициентом корреляции всего 0.672.

Исходный пролиферативный индекс не связан коррелятивными связями с уровнем спонтанной поврежденности генома и радиочувствительностью лимфоцитов.

После облучения возникает связь между пролиферативным индексом и радиочувствительностью, причем, как ни парадоксально, большей скоростью (большим пролиферативным индексом) обладают более радиочувствительные популяции ( $r = 0.62$ ,  $p = 0.013$ ). Вероятно, причиной синхронизации служит факт задержки в клеточном делении из-за репарации повреждений ДНК во время блока  $G_1$ -S [9].

Аналогичная связь между радиочувствительностью и пролиферативным индексом после радиационного воздействия обнаруживается и при метафазном анализе в варианте фиксации клеток через 50 ч после стимуляции, но ее нет в варианте фиксации через 72 ч после стимуляции. Принципиально, что пролиферативный индекс, измеренный в метафазном анализе при фиксации клеток через 72 ч после стимуляции, и индекс, измеренный в микроядерном тесте, в котором учитываются все клетки, вступившие в митоз между 48 и 72 ч после стимуляции, статистически не различаются:  $1.77 \pm 0.06$

и  $1.90 \pm 0.05$  ( $p = 0.19$ ). В метафазном анализе в варианте с фиксацией на 72 ч проявилась также принципиально новое свойство: предварительное адаптирующее облучение достоверно повышает скорость пролиферации клеток после облучения в ударной дозе: пролиферативный индекс возрастает с  $1.77 \pm 0.06$  до  $2.36 \pm 0.06$  ( $p = 0.0002$ ) соответственно.

Анализ показал, что после стимуляции уровень экспрессии всех трех маркеров не связан с уровнем поврежденности генома. Мы полагаем, что причиной выявленных в работе отсутствий каких-либо связей между уровнем экспрессии всех трех маркеров активации и спонтанной частотой лимфоцитов с микроядрами является, вероятно, показанная ранее в нашей работе особенность возникновения повреждений генома этого типа [2]. Основываясь на характере распределений индивидуумов по спонтанной частоте клеток с микроядрами, мы полагаем, что этот показатель отражает процессы, протекающие при формировании лимфоцитов, еще до стадии их попадания в периферическую кровь. Таким образом, процесс формирования спонтанного уровня клеток с микроядрами и процесс активации лимфоцитов протекают в разные промежутки времени и, естественно, независимо.

К неожиданному результату привело изучение связей исходной скорости пролиферации клеток с уровнем экспрессии указанных иммунологических маркеров. Оказалось, что после стимуляции уровень экспрессии всех трех изученных маркеров связан с исходным пролиферативным индексом коррелятивными связями средней силы. Однако, существенно, что коэффициенты корреляции пролиферативного индекса с уровнями экспрессии всех трех маркеров отрицательны. Это означает, что после стимуляции в популяциях с меньшей скоростью движения клеток по циклу доля маркер положительных клеток выше. Этот факт зафиксирован для всех трех изученных маркеров: CD25, CD69 и Ki-67. Однако все связи исчезают, если пролиферативный индекс измерять после облучения. Вероятно, экспрессия маркеров и пролиферация являются, в какой-то мере, конкурирующими процессами и возможность их одновременного протекания ограничивается какими-то общими предшественниками и ресурсами.

Таким образом, изложенные результаты показывают, что и спонтанная, и индуцированная облучением поврежденность генома ЛПК не связаны с исходной скоростью их пролиферации после стимуляции. Выявлена отрицательная коррелятивная связь между иммунологическими свойствами стимулированных ЛПК со скоростью их пролиферации. Существенный вклад в понимание механизмов адаптивного ответа вносят полученные данные об ускорении пролиферации ЛПК после адаптирующего облучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 04-011442-а.

### Литература

1. *Ярилин А.А.* Иммунология. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. С. 414.
2. *Серебряный А.М., Аклеев А.В., Алещенко А.В.* и др. Распределение индивидуумов по спонтанной частоте лимфоцитов с микроядрами. Особенности и следствия // *Цитология*, 2011. Т. 53. № 1. С. 5-9.
3. *Albertini R.J., Anderson D., Douglas G.R.* et al. IPCS guidelines for the monitoring of genotoxic effects of carcinogens in humans // *Mutat. Res.*, 2000. Vol. 463. № 2. P. 111-172.
4. *Chakrabarti S., Zhang X.X., Richer G.L.* Influence of duration of exposure to styrene oxide on sister chromatid exchanges and cell-cycle kinetics in cultured human blood lymphocytes *in vitro* // *Mutat. Res.*, 1997. Vol. 395. № 1. P. 37-45.
5. *Cheel J., Onofre G., Vokurkova D.* et al. Licorice infusion: Chemical profile and effects on the activation and the cell cycle progression of human lymphocytes // *Pharmacognosy Mag.*, 2010. Vol. 6. № 21. P. 26-33.
6. *Fenech M., Chang W.P., Kirsch-Volders M.* et al. HUMN project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures // *Mutat. Res.*, 2003. Vol. 534. № 1-2. P. 65-75.
7. *Lamberti L., Ponzetto P.B., Ardito G.* Cell kinetics and sister chromatid exchange frequency in human lymphocytes. // *Mutat. Res.*, 1983. Vol. 120. № 2-3. P. 193-199.
8. *Lazutka J.R.* Replication index cultured human lymphocytes: methods for statistical analysis and possible role of genetic toxicology // *Environ. Mol. Mutagen*, 1991. Vol. 17. № 3. P. 188-195.
9. *Liu V.F., Boubnov N.V., Weaver D.T.* Cell cycle checkpoints and repair of ionizing radiation damage // *Stem Cells*, 1995. Vol. 13. № 1. P. 117-128.
10. *Lopez F., Belloc F., Lacombe F.* et al. Modulation of synthesis of Ki67 antigen during the stimulation of lymphocytes // *Cytometry. Part A*, 1991. Vol. 12. № 1. P. 42-49.
11. *Sahu R.K., Katsifis S.P., Kinney P.L., Christie N.T.* Ni (II) induced changes in cell cycle duration and sister chromatid exchanges in cultured human lymphocytes // *Mutat. Res.*, 1995. № 1-2. Vol. 327. № P. 217-225.
12. *Scholzen T., Gerdes J.* The Ki-67 protein: from the known and the unknown // *J. Cell Physiology*, 2000. Vol. 182. № 3. P. 311-322.
13. *Ziegler S.F., Ramsdell F., Alderson M.R.* The activation antigen CD69 // *Stem Cell*, 1994. Vol. 12. № 5. P. 456-465.

**CYTOGENETIC AND IMMUNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF STIMULATED HUMAN PERIPHERAL BLOOD LYMPHOCYTES ARE CONNECTED WITH CELL PROLIFERATION RATES**

**A.M. Serebryanyi<sup>1</sup>, A.V. Aleschenko<sup>1</sup>, M.M. Antoschina<sup>2</sup>, O.V. Kudriashova<sup>2</sup>, M.F. Nikonova<sup>4</sup>, N.I. Ryabchenko<sup>2</sup>, A.A. Yarilin<sup>4</sup>, I.I. Pelevina<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics RAS, Moscow, Russia, [amserebr@sky.chph.ras.ru](mailto:amserebr@sky.chph.ras.ru)

<sup>2</sup>Medical Radiological Research Center RF Ministry of Health, Obninsk, Russia

<sup>3</sup>N.N. Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>State Research Centre-Institute of Immunology, RF Ministry of Health, Moscow, Russia

In the current study the authors investigated the connection between the proliferation rate of stimulated human peripheral blood lymphocytes with some other characteristics of the population. The population's proliferation index (PI) was taken as a measure of rate. It was calculated using two methods: from the composition of a cell population, which was cytokinesis-blocked with a cytochalasin B, and from the results of a metaphase analysis in which the number of cells in first, second and third division stage was determined using BUdR. It was found that if the genotoxic action is absent the PI does not correlate with spontaneous frequency of cells with micronuclei or with cell radiosensitivity. It has been determined that after stimulation the level of marker-positive cells (CD25, CD69 и Ki-67) is closely related with PI and is greater in populations with lower proliferation rates. Irradiation of a cell culture 48 h after stimulation in a dose of 1Gy leads to a correlation between new PI and radiosensitivity, measured directly after the irradiation and in the same time frame as the PI measured in the non-irradiated population. This new PI increased after an adaptive irradiation.

---

**МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ДИКОГО КАБАНА И ЕНОТОВИДНОЙ СОБАКИ, ОБИТАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА С РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

**С.Н. Сушко, А.О. Савин, А.С. Шафорост, С.В. Гончаров, Е.М. Кадукова, Л.Н. Барыбин**

Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь, [svetsu50@mail.ru](mailto:svetsu50@mail.ru)

Дикие животные являются важнейшими компонентами природных и трансформированных экосистем. Дозовая нагрузка от инкорпорированного <sup>137</sup>Cs на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) для дикого кабана

по данным 2005 г., составила 91.8 мГр/год [1], что не отразилось на показателях размножения и численности. Вместе с тем, деструктивные изменения в печени и кроветворных органах, возрастание напряженности иммунной системы, генетических изменений и другой патологии наблюдали многие исследователи у мышевидных грызунов и у других видов диких животных из 30-километровой зоны отчуждения ЧАЭС. Проблема адаптации животных в радиационных биогеоценозах выдвигается сегодня на передний план. При этом недостаточно ограничиваться характеристиками популяции, численности и внешних признаков животных. На уровне организма решение данной проблемы рассматривается в аспекте биохимических, иммунологических, гематологических, цитогенетических и других критериев.

Цель исследований – анализ корреляций между уровнями накопления радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) в различных органах и тканях и изменениями в морфофизиологическом состоянии природных популяций дикого кабана и енотовидной собаки, обитающих на территориях ПГРЭС с различной плотностью радиоактивного загрязнения.

В рамках эксперимента были изъяты 50 особей дикого кабана *Sus scrofa* и 24 особи енотовидной собаки *Nyctereutes procyonoides* с территорий шести лесничеств, различающихся по уровням радиоактивного загрязнения. Полученный материал позволил оценить морфофизиологическое состояние дикого кабана в составе четырех возрастных групп. Возраст животных определяли по спилам реза, декальцинированного и окрашенного гематоксилином с подсчетом годовых колец (метод Клевезаль).

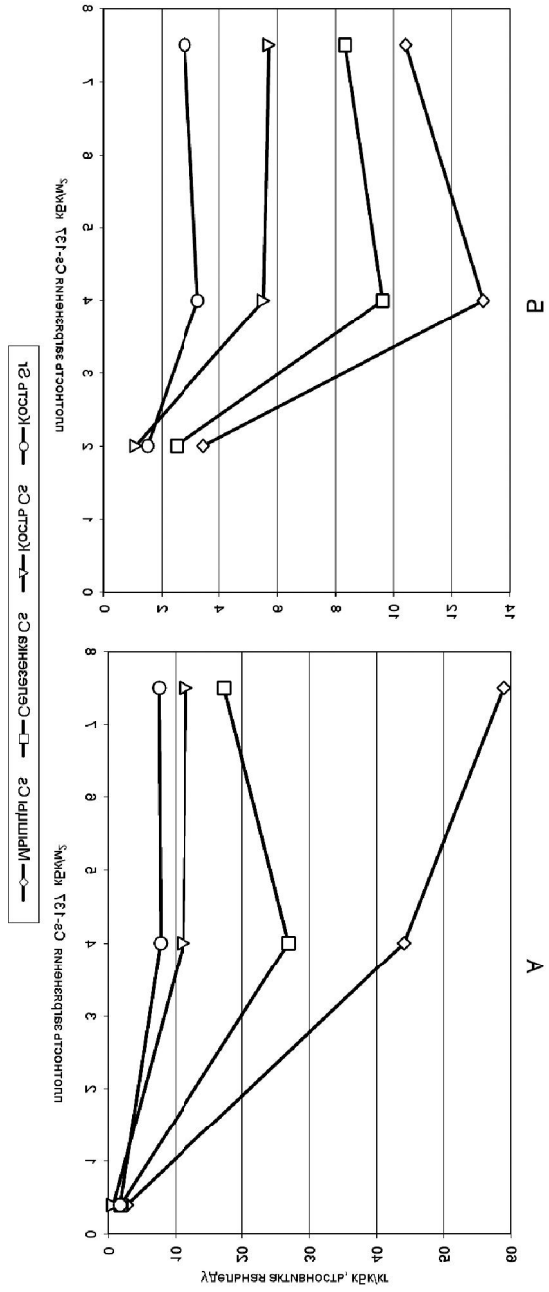
Оценка морфофизиологических показателей кабана показывает наличие всех установленных закономерностей изменения интерьерных признаков в процессе онтогенеза обоих полов. Сравнительный анализ морфофизиологических показателей этого вида на территории ПГРЭС и Национального парка «Беловежская пуца» не позволил выявить существенных различий.

Заметные отклонения морфофизиологических параметров выявлены у 4.0% обследованных особей дикого кабана: абсолютные и относительные показатели селезенки двух особей сеголеток заметно отличались от остальных особей.

С ростом плотности загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  до 4000 кБк/м<sup>2</sup> наблюдается увеличение удельной активности основных дозообразующих радионуклидов, наиболее выраженное в случае содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах (рис. 1).

При дальнейшем увеличении плотности загрязнения территории до 7000 кБк/м<sup>2</sup> величина удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в

БЛОКОВАНА СЪОБЩАВАНАТА РАДИОАКТИВНОСТ НА  $^{137}\text{Cs}$  И  $^{90}\text{Sr}$  В ЛЪННИТЕ ПЛОЩАДИ НА ТЕРАТОРИЯТА НА ПЛЪВНИЦА (А – КЪМН, В – КЪМН, Г – КЪМН)



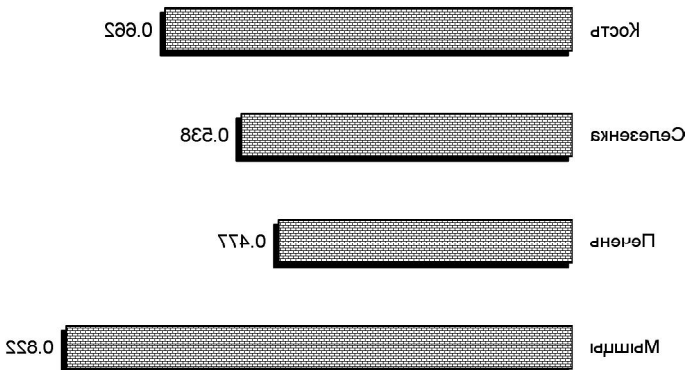


Рис. 2. Коэффициент трансформации дозы в органе и коэффициент эквивалентности в органе для различных органов.

Важным фактором является то, что в настоящее время не существует единой методики расчета дозы в органах. В настоящее время для расчета дозы в органах используются различные методики. В настоящее время для расчета дозы в органах используются различные методики. В настоящее время для расчета дозы в органах используются различные методики.

Следует отметить, что в настоящее время не существует единой методики расчета дозы в органах. В настоящее время для расчета дозы в органах используются различные методики. В настоящее время для расчета дозы в органах используются различные методики.

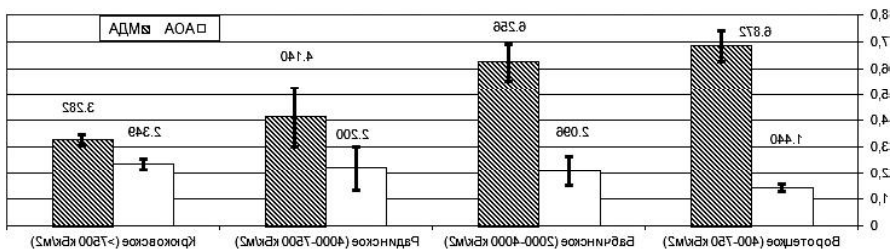


Рис. 3. Коэффициент трансформации дозы в органе и коэффициент эквивалентности в органе для различных органов.

Состояние перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали по уровню содержания малонового диальдегида (МДА) и состоянию общей антиокислительной активности (АОА) в плазме крови енотовидных собак. С ростом загрязненности территории по  $^{137}\text{Cs}$  с 750 до 4000 кБк/км<sup>2</sup> отмечается увеличение значений общей антиокислительной активности и снижение уровня малонового диальдегида в плазме крови, что согласуется с результатами работы [2] и можно рассматривать как результат активации репарационных процессов и утилизации образовавшихся продуктов перекисного окисления липидов (рис. 3).

Величина АОА у диких кабанов практически в два раза ниже, чем у енотовидных собак, и ее значения у обоих видов не изменяются у животных на территориях с различным уровнем радиоактивного загрязнения. Эти данные могут свидетельствовать о приспособлении особей исследуемых видов к условиям окружающей среды с изменившимися радиологическими условиями.

Вместе с тем, интенсивность протекания антиокислительных процессов, оцениваемая величиной АОА, у енотовидной собаки выше, чем у дикого кабана.

Данные по изучению состояния крови, обменных процессов в организме и других морфофункциональных показателей популяций животных, обитающих в условиях радиоактивного загрязнения в ПГРЭС, являются важной составляющей оценки возможности использования территории для сохранения биоразнообразия фауны, а также для выявления закономерностей и прогнозирования последствий воздействия радиологических факторов ПГРЭС на живые организмы.

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ Б13БРУ007.

#### Литература

1. Гулаков А.В. Аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  в организме дикого кабана, обитающего на территории радиоактивного загрязнения // Экологические проблемы западного региона Беларуси. Минск, 2005. С. 127-131.
2. Мирзоев Э.Б., Кобялко В.О. Интенсивность свободнорадикального перекисного окисления липидов, активность аденилатциклазы и проницаемость плазматической мембраны для ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в клетках периферической крови овец, облученных в малых дозах // Радиационная биология. Радиозология, 2009. Т. 49. № 3. С. 261-267.



---

**MORPHOLOGICAL PARAMETERS  
OF WILD BOAR AND RACCOON DOGS NATURAL POPULATIONS  
INHABITING RADIOACTIVELY CONTAMINATED TERRITORIES**

**S.N. Sushko, A.O. Savin, A.S. Shaforost, S.V. Goncharov,  
E.M. Kadukova, L.N. Barybin**

Institute of Radiobiology of NAS of Belarus, Gomel, Belarus, [svetsu50@mail.ru](mailto:svetsu50@mail.ru)

The effects of chronic low-power ionizing radiation on the morphological parameters of wild boar and raccoon dogs were investigated. Increasing territory contamination with  $^{137}\text{Cs}$  from 750 to 4000 kBq/km<sup>2</sup>, an increase of total antioxidant activity and malondialdehyde reduction in blood plasma of raccoon dogs were observed.

---

**СРАВНЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ  
И ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ОРГАНИЗМ**

**Б.В. Тестов, И.А. Ломакин**

Тобольская комплексная научная станция УрО РАН, Тобольск, Россия

Условия жизни, в которых обитает человек на Земле, характеризуются огромным разнообразием. В настоящее время условия жизни называют экологическими. Если раньше они характеризовались только наличием пищи, укрытий, спасающих человека от холода или хищных зверей, то постепенно произошла смена приоритетов. Экологические условия, которые были доминирующими в старину, отошли на второй план, и на первый план выдвинулись такие экологические факторы, о которых раньше не подозревали: электромагнитные излучения, действие разнообразных химических веществ, применяемых в сельском хозяйстве и на производстве, радиационные загрязнения, широкое разнообразие лекарств, используемых при лечении различных заболеваний.

Следует отметить, что каждый экологический фактор обладает собственным механизмом действия на организм. Поэтому достаточно трудно прогнозировать последствия, которые возникают при сочетанном действии нескольких факторов. В настоящее время проводится большое количество научных исследований по сочетанному действию экологических факторов на человека. Однако пока не сформированы теоретические позиции, на основе которых можно было бы проводить сравнение влияния различных экологических факторов на состояние человека.

Нам кажется, что такое сравнение можно было бы проводить на основе влияния экологических факторов на формирование запаса

энергии человека. Запас энергии необходим человеку, как и любому другому животному, для конкурентной борьбы за более удобные условия существования, для спасения от хищников, для переживания в период неблагоприятных условий. Этот запас формируется во время сна. Во время сна в животном организме снижается активность кровообращения в головном мозге (не функционируют зрение и слух) и мышцах, поскольку прекращается движение. Однако сердце, легкие и органы брюшной полости работают, следовательно, организм продолжает вырабатывать энергию, которая идет на формирование запаса. Утром, после ночного отдыха, организм обладает большим запасом энергии, который должен быть израсходован в течение трудового дня, чтобы хорошо спать и сформировать новый запас энергии. Если человек плохо спал ночью, у него снижается производительность труда и портится настроение. Воздействие различных экологических факторов приводит к нарушению гомеостаза, под которым понимают физиологические процессы, поддерживающие устойчивое состояние организма. Так, низкая температура среды приводит к большому расходу энергии на теплопродукцию, трудно перевариваемая пища ухудшает работу кишечника, поступление с пищей или вдыхаемым воздухом химических веществ, требует расхода энергии на их детоксикацию и выведение.

Не совсем понятно, как действуют на организм лекарственные вещества и радиация. Лекарства человек принимает, чтобы улучшить свое здоровье. Они, как правило, являются ксенобиотиками, т.е. чужеродными веществами по отношению к биологической ткани. Они не должны накапливаться в организме, поэтому организм их разрушает и выводит. С другой стороны, они должны вызывать улучшение состояния организма путем активизации каких-то процессов в тканях, клетках организма. Примерно то же самое можно сказать о малых дозах радиоактивных излучений.

Радиоактивные излучения в больших дозах приводят организм к гибели. Причиной гибели по различным теориям могут быть:

- гибель клеток от большого количества повреждений как в геноме, так и при протекании метаболических процессов;
- повышение температуры из-за разрушения большого количества АТФ в клетках организма.

При малых дозах часто наблюдаются процессы стимуляции жизнедеятельности организма, о причине которых у ученых также неоднозначное мнение. Поскольку теоретически трудно прогнозировать о сравнительном действии радиации и лекарственных препаратов, мы решили провести экспериментальное сравнение на основе физиологической реакции лабораторных мышей при введении лекарственных препаратов и облучении небольшими дозами.

Экспериментальные исследования проводили на самцах белых лабораторных мышей, которые находились в стандартных пластмассовых клетках с металлической крышкой. При проведении эксперимента мы регистрировали вес животных и два физиологических показателя: регистрации подвижности животных в клетках и продолжительности плавания животных с грузом в холодной воде (при температуре 20 °С). Выбор тестов обусловлен тем, что подвижность и продолжительность плавания были связаны с запасом энергии, которой располагали животные на следующий день после облучения или введения лекарственного препарата.

Для изучения подвижности животных в клетках мы изменили конструкцию клетки, сделав подвижной металлическую крышку. Известно, что мыши очень часто залезают на решетчатый потолок клетки. Поэтому мы регистрировали продолжительность времени нахождения животных на потолке клетки. Для этого мы сделали потолок подвижным, так чтобы при подъеме на потолок происходило замыкание контактов, связанных с регистрирующим устройством. При уходе животного с потолка контакты размыкались. Подвижность животных определяли отношением времени нахождения животных на потолке к времени нахождения животных в клетке, выраженном в процентах.

Для введения лекарств мы проводили водные вытяжки из таблеток лекарств, продаваемых населению без рецепта. Введение осуществлялось перорально по 0.5 мл на животное один или два раза в сутки. Ежедневно регистрировали вес, состояние животных, подвижность за сутки и периодически продолжительность плавания в воде с грузиком одинакового веса.

Облучение проводили за счет тормозного излучения от бета-излучателя, расположенного под клеткой. Мощность дозы облучения регистрировалась с помощью дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121.

Кофицил-плюс обладает жаропонижающим и противовоспалительным действием, ослабляет боль, особенно вызванную воспалительным процессом. Препарат Кофицил-плюс содержит парацетамол, кофеин, ацетилсалициловую кислоту. В одной таблетке препарата ацетилсалициловой кислоты 0.3 г, парацетамола – 0.1 г и кофеина – 0.05 г; в контурной безъячейковой упаковке. Показания к применению препарата Кофицил-плюс: болевой синдром слабой и умеренной выраженности (различного генеза): головная боль, мигрень, зубная боль, невралгия, миалгия, артралгия, альгодисменорея. Максимальное количество при введении в организм человека  $2.9 \cdot 10^{-5}$  г/г веса [1].

**Сравнительное действие различных экологических факторов на организм**

Действующий фактор	Концентрация вещества, г/г веса	Подвижность животных, %	Продолжительность плавания, сек.
Водопроводная вода	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$6.0 \pm 0.5$	$210 \pm 12$
Анальгин	$0.6 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \pm 1.5$	$226 \pm 24$
Аспирин	$0.6 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \pm 2.5$	$338 \pm 8$
Кофицил	$0.6 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \pm 0.3$	$257 \pm 12$
Облучение	30 мкр/ч (хроника)	$10.0 \pm 1.8$	$240 \pm 20$
Облучение	3000 мкр/ч, 2 ч ежедневно	$4.4 \pm 1.1$	$366 \pm 25$

Анальгин – главный препарат в группе так называемых ненаркотических анальгетиков, т.е. препаратов, способных уменьшать боль без влияния на психику. Активным веществом является метамизол натрия. Анальгин способен уменьшать выраженность воспалительных процессов и снижать повышенную температуру тела [1]. Максимальное количество при введении в организм человека –  $1.2 \cdot 10^{-3}$  г/г веса [2].

Аспирин (ацетилсалициловая кислота). Применяется при болевых синдромах различной локализации (суставные, мышечные, головная, менструальные, зубная боли); лихорадочные состояния. Противопоказания к применению при состояниях, сопровождающихся повышенной склонностью к кровотечению. Для взрослых разовая доза аспирина варьирует от 40 мг до 1 г, суточная – от 150 мг до 8 г [1, 3]. Максимальное количество при введении в организм человека –  $11 \cdot 10^{-5}$  г/г веса.

Анализ результатов эксперимента, приведенных в таблице, показывает, что влияние лекарств и ионизирующего облучения на общее состояние животных различается не очень сильно. Количество вводимого химического вещества и воды было одинаковым – 0.5 мл на каждую мышь. При этом наименьшее влияние на подвижность оказала водопроводная вода, все остальные вещества угнетающее действовали на подвижность. При этом наибольшее влияние оказал кофицил, который обладает меньшей разрешенной величиной при введении в организм человека. Следует отметить, что вещества, сильнее угнетающие подвижность, увеличивали продолжительность плавания в воде (кроме кофицила). Это нам кажется вполне логичным, поскольку при меньшей трате энергии на движение в организме сохранялся запас энергии необходимый для плавания в холодной воде.

В этом плане интересно отметить, что хроническое облучение животных увеличивало подвижность даже больше, чем введение

водопроводной воды. При этом одновременно продолжительность плавания у мышей также была несколько выше, т.е. облучение при малой мощности дозы оказывает на животных благоприятное воздействие.

При двухчасовом действии на мышей облучения мощностью дозы 3 мр/ч мы наблюдали такое же снижение подвижности, как и при введении лекарств. Следует отметить, что при этом действующая мощность дозы 0.06 мЗв была меньше предельно допустимой для людей, не работающих с радиоактивностью, примерно в 100 раз. В то же время животным мы вводили лекарственные препараты в концентрациях, в 5-200 раз превышающих допустимое введение за сутки для человека. Из этого следует, что ионизирующее излучение оказывает сравнимое, в некоторых случаях меньшее, биологическое действие на организм, чем очень распространенные лекарственные препараты.

#### Литература

1. *Машковский М.Д.* Лекарственные средства: пособие для врачей. М.: Новая волна, 2010. С. 164, 169.
2. Последние новости мира медицины и здоровья. (Электронный ресурс) / Медицинская библиотека // <http://www.medlinks.ru> (дата обращения: 20.09.2013).
3. Дозировка аспирина для детей / Форум «Здоровье детей» (Электронный ресурс) // <http://www.etolen.com/index>.

#### LOW DOSE OF IONIZING RADIATION AND DRUGS EFFECTS ON ORGANISM COMPARISON

**B.V. Testov, I.A. Lomakin**

Tobolsk Complex Scientific Station, Urals Division of RAS, Tobolsk, Russia

It was shown that ionising radiation resulted in comparable (in some cases lower) biological effects on organism as compared with common used drugs.

---

#### ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ МАЛЫХ ДОЗ (5-40 сГр) НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ *DROSOPHILA MELANOGASTER*

**М.В. Шапошников, Д.О. Перегудова, Е.Н. Плюснина, А.А. Москалев**

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[mshaposhnikov@mail.ru](mailto:mshaposhnikov@mail.ru)

Ионизирующие излучения в малых дозах характеризуются широким спектром биологических эффектов, начиная от стимулирующих (адаптивный ответ, гормезис) и заканчивая негативными (гиперчувствительность, генетическая нестабильность).

Ранее нами был установлен эффект радиационно-индуцированного гормезиса на таком интегральном показателе жизнеспособности, как продолжительность жизни. Выяснилось, что гормезис может быть опосредован генами *FOXO*, *SIRT1*, *JNK*, *ATM*, *ATR* и *p53*, а также генами белков теплового шока *hsp22*, *hsp67*, *hsp70*, *hsp83* и теплового фактора *hsf*. При анализе уровня экспрессии транскрипта нами установлено, что ионизирующее излучение в дозе 20 сГр вызывает активацию транскрипции генов, положительно влияющих на продолжительность жизни (*Sugarbabe*), однако снижает уровень экспрессии генов, ассоциированных со старением (*Keap1*, *Hormone receptor-like in 38*, *Relish*, *CG6188*, *Peptidoglycan recognition protein LB*). На основании полученных данных нами сделано предположение, что изменение уровня экспрессии генов может быть основным механизмом радиационно-индуцируемого гормезиса.

Цель настоящей работы состояла в исследовании дозовой зависимости эффектов малых доз гамма-излучения (5, 10, 20 и 40 сГр) на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster* и сопоставлении полученных данных с результатами анализа уровня экспрессии генов методом количественной ПЦР в реальном времени (QRT-PCR).

Объектами данного эксперимента были особи *Drosophila melanogaster* линии дикого типа *Canton-S* (Блумингтон, США). Мух разделили на две группы – опытную и контрольную. Все мухи содержались при 25 °С и 12-часовом режиме освещения на дрожжевой питательной среде. Опытную группу мух подвергли воздействию гамма-излучения от источника  $^{226}\text{Ra}$  в дозах 5, 10, 20 и 40 сГр на имагинальной стадии жизненного цикла. Мощность экспозиционной дозы составила 36 мГр/ч, время воздействия – 1 ч 23 мин., 2 ч 47 мин., 5 ч 34 мин. и 11 ч 8 мин. соответственно.

Продолжительность жизни анализировали ежедневно, отдельно у самцов и самок. Функции дожития оценивали с помощью процедуры Каплана-Мейера и представляли в виде кривых дожития. Рассчитывали медианную продолжительность жизни, а также возраст гибели 90% особей. При статистической обработке результатов анализа продолжительности жизни применяли непараметрические методы. Функции дожития оценивали с помощью процедуры Каплана-Мейера и представляли в виде кривых дожития. При сравнении функций дожития использовали модифицированный критерий Колмогорова-Смирнова. Для оценки достоверности различий по медианной продолжительности жизни применяли критерий Гехана-Бреслоу-Вилкоксона и Ментеля-Кокса. Для оценки статистической значимости различий возраста гибели 90% особей использовали тест Ванг-Аллисона. Построение кривых Каплана-Мей-

ера осуществляли с помощью программы Statistica, версия 6.1 (StatSoft, Inc.), расчет параметров продолжительности жизни и их статистический анализ проводили в среде статистического программирования R.

В докладе будут представлены данные по анализу дозовой зависимости эффектов малых доз ионизирующих излучений (5, 10, 20 и 40 сГр) на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster*. Будут рассмотрены возможные механизмы радиационно-индуцированного изменения продолжительности жизни на основании данных QRT-PCR.

Исследования поддержаны целевой Программой РАН «Молекулярная и клеточная биология» № 12-П-4-1005.

#### INFLUENCE OF GAMMA IRRADIATION IN LOW-DOSE RANGE (5-40 CGY) ON THE LIFESPAN OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*

M.V. Shaposhnikov, D.O. Peregudova, E.N. Plyusnina, A.A. Moskalev  
Institute of Biology, Komi Science Centre, Syktyvkar, Russia,  
[mshaposhnikov@mail.ru](mailto:mshaposhnikov@mail.ru)

In the present study, we have investigated the dose-dependent effects of gamma irradiation in low-dose range (5, 10, 20 and 40 cGy) on the lifespan of *Drosophila melanogaster* and compared these effects with the results of analysis of gene expression levels by quantitative real-time PCR.

---

#### РОЛЬ ГЕНОВ РЕПАРАЦИИ В СИСТЕМЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ АКТИВАЦИИ МОБИЛЬНОГО *НОВО-ЭЛЕМЕНТА* У *DROSOPHILA MELANOGASTER*

Е.А. Юшкова<sup>1, 2</sup>, В.Г. Зайнуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[ushkova@ib.komisc.ru](mailto:ushkova@ib.komisc.ru)

<sup>2</sup> Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар, Россия

Не вызывает сомнения тот факт, что возникновение спонтанных мутаций может быть связано с мобильными генетическими элементами (МГЭ). Оно обусловлено как перемещениями мобильных элементов по геному (транспозициями), так и их прямой способностью индуцировать мутации [4]. Большое значение в этом имеют ДНК-транспозоны, в частности, *hobo*-элементы, перемещения которых сопровождаются образованием двойных разрывов клеточной ДНК [6].

Накоплены данные, свидетельствующие о наличии определенного сходства механизмов формирования повреждений ДНК под воздействием облучения и транспозиций МГЭ. В обоих случаях возникают разрывы хромосом и неравномерное распределение их точек вдоль хромосомы. Как при облучении, так и при активации МГЭ включаются клеточные системы репарации [1, 3]. Известны некоторые «универсальные» гены (например, *mei-41*), участвующие в репарации как радиационно-, так и *P*-элемент-индуцированных разрывов ДНК [2, 5] и гены репарации, контролирующие восстановление повреждений ДНК, индуцированные каким-нибудь одним фактором [1].

В настоящей работе представлены сведения об эффектах *mus*-мутаций в системе радиационно-индуцированной активации *hobo*-элемента, отличающихся от других транспозонов тем, что независимо от типа ткани (генеративной/соматической) он активен не только в дисгенных скрещиваниях, при которых его частота транспозиций максимальна, но и недисгенных условиях. Полученные результаты дополняют наши представления о том, какие именно *mus*-гены причастны к процессам восстановления повреждений ДНК, индуцированных перемещениями *hobo*-элементов, и позволяют оценить механизмы взаимодействия систем транспозиции мобильных элементов и клеточной репарации в условиях хронического воздействия облучения.

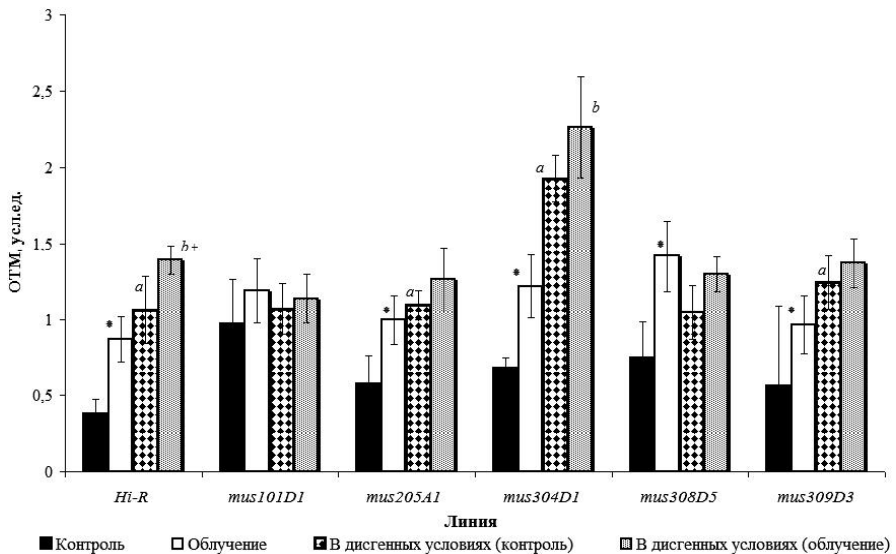
В данном исследовании индукцию *hobo*-элементов проводили путем дисгенных скрещиваний (самцов, имеющих полноразмерные копии *hobo*-элементов (*Oregon-R*), скрещивали с линией дикого типа *Hikone-R* (E-цитотип) и мутантными по репарации самками (*mus101<sup>D1</sup>*, *mus205<sup>A1</sup>*, *mus304<sup>D1</sup>*, *mus308<sup>D5</sup>*, *mus309<sup>D3</sup>*). Часть особей подвергали хроническому  $\gamma$ -излучению от источника  $^{226}\text{R}$  (56 мГр/ч) при мощности экспозиционной дозы 0.42 мГр/ч (накопленная доза составила 120 мГр (в течение всего жизненного цикла, 12 дней). Другую часть использовали в качестве контроля. Все исследуемые варианты содержали в строго контролируемых лабораторных условиях: при фотопериодичности 12 ч свет/12 ч темнота, температуре  $25 \pm 0.1$  °C и стандартном корме. Все линии дрозофилы были ранее охарактеризованы с помощью молекулярного и генетического анализов, позволивших определить цитотип, а также установить в их геномах содержание полноразмерных *hobo*-копий.

Изучали реакцию дрозофил на облучение и индукцию *hobo*-элементов с применением следующих показателей: анализа частоты повреждений ДНК (в нейтральной версии рН) в соматических клетках личинок третьего возраста, уровня доминантных летальных мутаций (ДЛМ) и выживаемости куколок гибридов первого поколения.



Полученные результаты анализа уровня фрагментации ДНК в нейробластах и имагинальных дисках (см. рисунок) показывают, что при индуцирующих Н-Е скрещиваниях число поврежденных клеток выше такового у исследуемых генотипов *mus205<sup>A1</sup>*, *mus304<sup>D1</sup>*, и, как видно из диаграммы, хроническое облучение усиливает эффект гибридного дисгенеза у особей мутантных по репарации линий *Hikone-R*, *mus304<sup>D1</sup>* ( $p < 0.05$ ). У других линий (*mus308<sup>D5</sup>* и *mus309<sup>D3</sup>*) наблюдали лишь тенденцию к повышению. Это частично согласуется с результатами, полученными в ходе оценки доминантных леталей.

По показателю ДЛМ выявлено, что в условиях Н-Е системы ГД для *Hikone-R*, *mus304<sup>D1</sup>*, *mus308<sup>D5</sup>* и *mus309<sup>D3</sup>*, претерпевающих *hobo*-транспозиции, уровень ДЛМ значительно превышает таковой у недисгенных вариантов. При этом мутация *mus304* оказывает значительное влияние на индукцию *hobo*-элементов, повышая их активность в условиях длительного воздействия  $\gamma$ -излучения в малых дозах, что выражается в достоверном ( $p < 0.01$ ) повышении частоты ДЛМ.



Частота радиационно-индуцированных повреждений ДНК (в нейтральных условиях электрофореза) у дрозофил, имеющих нарушения в различных системах репарации и поддерживаемых в условиях хронического низкоинтенсивного облучения и Н-Е гибридного дисгенеза. Различия достоверны при \* $p < 0.01$  по сравнению с собственным контролем; <sup>a</sup>, <sup>b</sup>  $p < 0.05$ ; <sup>a,b</sup>  $p < 0.001$  – между дисгенными и недисгенными вариантами в контроле (a) и после облучения (b).

На уровне жизнеспособности куколок обнаружено, что в дисгенных условиях наименьшее число выживших особей было обнаружено у *mus309<sup>D3</sup>* (около 4-5%) и *Hikone-R* (~30%) независимо от воздействия внешнего гамма-излучения. У других линий дрозофилы по сравнению с недисгенными вариантами либо не наблюдали достоверного изменения (у линий *mus304<sup>D1</sup>*, *mus308<sup>D</sup>*), либо регистрировали значимое повышение (у линии *mus205<sup>A1</sup>*) выживаемости особей. Более того, показано, что присутствие мутации *mus101* существенно усиливает взаимодействие облучения и гибридного дисгенеза, приводя к снижению жизнеспособности мух.

При сопоставлении результатов оценки частоты фрагментации ДНК и выживаемости куколок видно, что индукция *hobo*-элементов у *mus*-мутантов дрозофилы показала неоднозначные эффекты по данным показателям. Только в случае мутантной линии *mus309<sup>D3</sup>* отмечено явное соответствие между наблюдаемой высокой частотой ДНК-разрывов и повышенной смертностью особей, находящихся на стадии куколки. Такая тенденция была выявлена и для линий дикого типа *Hikone-R*. У некоторых мутантных линий нарушения ДНК, возникающие с большой частотой у поздних личинок, не могут объяснить высокую (у *mus205<sup>A1</sup>*) или неотличимую от контроля (*mus304<sup>D1</sup>* и *mus308<sup>D5</sup>*) выживаемость куколок. У линии, мутантной по гену репарации *mus101*, при неизменяющемся уровне поврежденных ДНК выживаемость куколок имеет тенденцию к снижению, особенно в условиях одновременного воздействия облучения и гибридного дисгенеза.

Различия между воздействием радиации и индуцированными перемещениями *hobo*-транспозонов хорошо иллюстрируют результаты анализа доминантных летальных мутаций, характеризующие действие *mus*-мутаций в том и другом случае. При исходном общем уровне мутабельности у данных генотипов частота ДЛМ, вызванная хроническим гамма-излучением, существенно отличается от возникших при *hobo*-транспозиционной активности. Очевидно, что полученные данные отражают особенности действия каждого фактора. Облучение приводит к значительному поражению пролиферирующих клеток предимагинальных стадий (эмбриональной, личиночной, куколочной), при этом последствия определяются не только процессами репарации, но и особенностями развития дрозофилы. Последние обусловлены компенсаторными механизмами и критическим значением поврежденных гистобластов, играющие ключевую роль в новообразовании тканей взрослой особи и процессе выхода ее из куколочного пупариума. Скорее всего, при транспозициях *hobo*-элементов возникают не тотальные, а локальные нарушения генетических структур в отдельных клетках, влияние кото-

рых на организменную выживаемость еще во многом остается невыясненным.

С этой точки зрения примечательны результаты оценки повреждений ДНК в соматических клетках (нейробласты, клетки имагинальных дисков), отражающие события точной репарации разрывов ДНК, возникающих при *hobo*-транспозициях. Повреждения ДНК, вызванные индукцией *hobo*-элементов, залечиваются преимущественно процессами пострепликационной и рекомбинационной репарации (ген *mus304*). Отмечена также значимость других репарационных генов, вовлеченных не только в процессы пострепликационной репарации (ген *mus205*), но и репарации двуцепочечных разрывов ДНК (ген *mus309*) в клетках Н-Е дисгенных особей.

Специфичность включения исследуемых генов репарации прослеживается и при одновременном взаимодействии облучения и гибридного дисгенеза. Так, в условиях хронического низкоинтенсивного облучения эффект мутации *mus304* усиливает частоту повреждений ДНК, претерпевающих *hobo*-транспозиции, что свидетельствует о значимости процессов пострепликационной и рекомбинационной репарации в ответ на совместное действие внутриклеточных (индукции *hobo*) и внешних (хроническое  $\gamma$ -излучение) факторов.

Зная, что перемещения *hobo*-элементов приводят к образованию двуцепочечных разрывов ДНК, нельзя исключить тот факт, что исследуемые *mus*-гены имеют дополнительные функции, связанные с репарацией такого рода ДНК-повреждений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке интеграционного проекта УрО РАН (12-И-4-2006).

#### Литература

1. Чмуж Е.В., Шестакова Л.А., Волкова В.С., Захаров И.К. Разнообразие механизмов действия и функций ферментативных систем репарации повреждений ДНК у *Drosophila melanogaster* // Генетика, 2006. Т. 42. № 4. С. 462-476.
2. Banga S.S., Velazquez A., Boyd J.B. P transposition in *Drosophila* provides a new tool for analyzing postreplication repair and double-strand break repair // Mutat. Res., 1991. Vol. 255. P. 79-88.
3. Bregliano J.C., Laurenson A., Degroote F. Evidence for an inducible repair-recombination system in the female germ line of *Drosophila melanogaster*. I. Induction by inhibitors of nucleotide synthesis and by gamma rays // Genetics, 1995. Vol. 141. № 2. P. 571-578.
4. Gloor G.B., Moretti J., Mouyal J., Keeler K.J. Distinct P-element excision products in somatic and germline cells of *Drosophila melanogaster* // Genetics, 2000. Vol. 155. № 4. P. 1821-1830.

5. Koromyslov Yu.A., Chmuzh E.V., Shestakova L.A. et al. Mutability of unstable sex-linked alleles of *Drosophila melanogaster* and their interaction with mutations of the genes of the repair system // *Drosophila Inform. Serv.*, 2004. № 86. P. 35.

6. Sobels F.H., Eeken J.C.J. Influence of the MR (mutator) factor on X-ray-induced genetic damage // *Mutat. Res.*, 1981. Vol. 83. № 1. P. 201-206.

**THE ROLE OF GENES REPARATION IN SYSTEM  
OF A RADIATION-INDUCED ACTIVATION  
OF THE HOBO-MOBILE ELEMENT IN *DROSOPHILA MELANOGASTER***

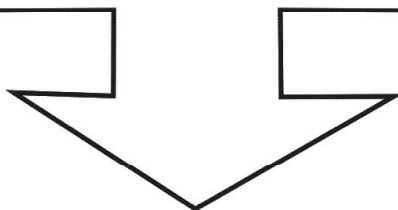
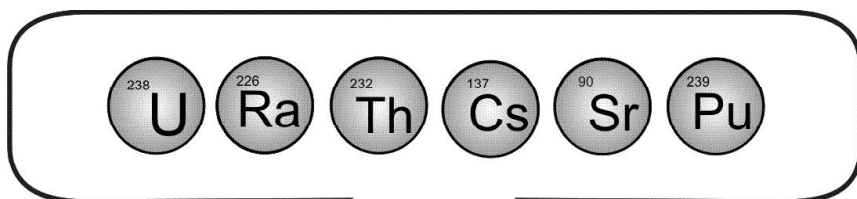
E.A. Yushkova<sup>1, 2</sup>, V.G. Zainullin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of biology of Komi SC UD the Russian Academy of Science,  
[ushkova@ib.komisc.ru](mailto:ushkova@ib.komisc.ru)

<sup>2</sup>Syktvykar State University, Syktvykar, Russia

The roles of *mus*-genes the reparations in system of a radiation-induced activation of the hobo-element are investigated. It is shown that the frequency of DNA damage in cells dysgenic individuals differs from induced by irradiation. By parameters of the frequency of DNA damages and dominant lethal mutations identified an important role of the process post-replication and recombinational repair (*mus304*) in the recovery of DNA breaks caused by a chronic irradiation in a low dozes and induction *hobo*-transposons. Recorded during activation *hobo*-element reduced survival of pupae are not always accompanied by an increased number of cells with damaged DNA.

**Секция 2. МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ  
В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ.  
ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ**





## К ВОПРОСУ МИГРАЦИИ $^{90}\text{Sr}$ И $^{137}\text{Cs}$ В ВОДОЕМАХ СУБАРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ РОССИИ

Н.А. Бакунов, Д.Ю. Большианов, А.С. Макаров

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия, [makarov@aari.ru](mailto:makarov@aari.ru), [bolshyanov@aari.nw.ru](mailto:bolshyanov@aari.nw.ru)

Большая часть полувековых радиоэкологических исследований водной миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  относится к водоемам среднеширотного пояса северного полушария, воды которых используются в системах охлаждения реакторов АЭС. На этот же широтный пояс пришлись основные радиационные аварии прошлого столетия с загрязнением искусственными радионуклидами (ИРН) природных сред.

В XXI столетии авария 2011 г. на АЭС «Фукусима» сопровождалась поступлением в атмосферу радиоактивных аэрозолей йода и цезия. При их инъекции в атмосферу фактор «защиты расстоянием» не гарантирует отсутствия ИРН в биоте наземных и водных экосистем, находящихся на значительном удалении от источника выброса. Загрязнение «чернобыльским»  $^{137}\text{Cs}$  рыб в водоемах Западной Европы [6, 7] зачастую было выше, чем в Киевском водохранилище, находящемся примерно в 30 км от аварийного блока ЧАЭС и принимающем загрязненные  $^{137}\text{Cs}$  воды Днепра. Низкая минерализация вод (<100 мг/л) и невысокая трофия водоемов Скандинавии усилили негативные последствия слабого поступления «чернобыльского»  $^{137}\text{Cs}$  на водосборы озерно-речных систем.

Перенос знаний эмпирического характера по миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  от водоемов средних широт на таковые северных регионов встречает определенные затруднения из-за различий в ландшафтных и климатических условиях. В Субарктике процессы миграции радионуклидов протекают при низких температурах почвенного покрова, поверхностных вод и донных отложений водоемов.

Из-за высокой чувствительности природных комплексов Субарктики к воздействию радиационного фактора [1, 6] изучение закономерностей миграции  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) в водоемах региона и переноса их по трофической цепи коренного населения Севера сохраняют свою актуальность [1, 6].

Задача исследования состояла в изучении отклика системы водосбор–водоем на длительное присутствие в ней  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ), приводя-

щее к изменению во времени скорости естественного очищения вод от этого радионуклида. При такой постановке задачи внимание уделялось связи этого процесса с ландшафтными и климатическими условиями на водосборах рек российского Севера. Часть исследований была направлена на изучение миграции этих радионуклидов в водоемах Восточной Фенноскандии, включающей территории от Кольского п-ова (Россия) и Лапландии (Финляндия) на севере до Финского залива и Карельского перешейка на юге.

Изучение водной миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  проводилось в два этапа. На первом этапе изучалось загрязнение глобальными  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  поверхностных вод и естественная дезактивация их с течением времени. На втором этапе уточнялся характер загрязнения вод и очищения их от «чернобыльского»  $^{137}\text{Cs}$  при разной временной экспозиции радионуклида в водоемах.

Объектом исследования являлись концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в водоемах, многолетняя динамика и связи их уровней содержания с ландшафтными и климатическими условиями на водосборах. К работе привлекались литературные данные по уровням  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде рек, озер, а также результаты собственных определений этих радионуклидов в воде и донных отложениях оз. Ладожского и водах рек Вуокса, Волхов, Свирь, сопряженных с ним по стоку [2-5].

Методология исследования основывалась на признании в миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  ведущей роли геохимической природы элементов Sr и Cs, определившей поведение их радиоактивных аналогов. Элемент Sr является водным мигрантом, а Cs – литофилом. Депо  $^{137}\text{Cs}$  в водоемах – грунты дна [8]. При расчетах выноса  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  с водосборов в реки использовались известные соотношения между запасом радионуклида в почвенном покрове водосбора, содержанием его в воде реки и величиной ее водного стока [2, 3, 5]. Данные наблюдений за динамикой  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в водоемах аппроксимировались одно-двухкомпонентной экспоненциальной зависимостью, позволившей количественно оценить скорость очищения вод от этих ИРН. Применительно к  $^{137}\text{Cs}$  разного генезиса (глобальный, «чернобыльский») проведены определения радионуклида в воде глубоких озер с использованием сорбционно-диффузионной модели поглощения радионуклида дном.

Установлены региональные различия выноса  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов в реки европейского Севера и Восточной Сибири и скорости естественного очищения вод. Вынос  $^{90}\text{Sr}$  с водами рек российской Субарктики изменялся от 0.2 до 0.6% в год от кумулятивного запаса на водосборе. Полупериод времени  $T$  естественной дезактивации вод Онеги, Северной Двины, Печоры, Лены и Индигирки от глобального  $^{90}\text{Sr}$  определены в 15.0, 15.4, 13.9, 10.0, и 7.5 лет соответственно [4]. Изменения в природных особенностях водосборов северных рек



по направлению от западного сектора Субарктики на восток влияли на миграцию  $^{90}\text{Sr}$  в системе водосбор–водоем. От западного сектора российской Арктики на восток усиливается континентальность климата, снижается количество осадков, увеличивается продолжительность снежного покрова и ледостава рек. Вынос  $^{90}\text{Sr}$  из почвенного покрова рек европейского Севера в течение ~20 лет не превышал 0.5-0.6% в год от запаса на водосборе, тогда как у больших рек Восточной Сибири этот показатель составил 0.2-0.3%. Длительность в субарктических регионах холодного сезона и кратковременность теплого позволяют рассматривать температурный фактор в качестве определяющего условия, при котором  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  вовлекаются в водную миграцию. С температурой связаны изменения в коэффициентах распределения и диффузии этих нуклидов в системе почва–почвенный раствор и продолжительность сезона поступления радионуклидов с поверхностно-склоновыми и грунтовыми водами в речную сеть.

Влияние ландшафтных и климатических условий на водную миграцию  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  прослеживается при анализе загрязнения этими ИРН средних рек Восточной Фенноскандии. Вынос глобального  $^{90}\text{Sr}$  в реки за 1979-1985 гг. составил 0.22-0.67% запаса на водосборе с тенденцией уменьшения показателя для рек с водосборами, находящимися в зоне распространения сезоннопромерзающих и мерзлых грунтов. Наибольший вынос  $^{90}\text{Sr}$  (0.57-0.67%) наблюдался для системы водосбор–глубоководное озеро–река. Водные массы глубоких озер (Ладожское, Пяйянне) обновлялись в четыре-пять раз быстрее, чем уменьшалось содержание в их водах глобального  $^{90}\text{Sr}$ . Очищение озерно-речных систем в Восточной Фенноскандии от глобального  $^{137}\text{Cs}$  характеризовалось полупериодом  $T$  около 6.5 лет. Для рек этот показатель изменялся от 6.5 до 10 лет.

С 1969 по 1985 г. загрязнение вод Ладожского озера  $^{90}\text{Sr}$  было близким к псевдоравновесному состоянию, приток в озеро  $^{90}\text{Sr}$  компенсировался стоком Невы. Поэтому полупериод  $T$  очищения вод составил 21.7 года, величину, близкую к  $T_{\text{фин.}}^{90}\text{Sr}$ . Такое состояние водной системы связано с геохимической природой  $^{90}\text{Sr}$  как водного мигранта и буферностью системы водосбор–глубокое озеро–сток.

Физико-географические условия на водосборах рек Восточной Фенноскандии влияли на содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в водах рек. Соотношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в воде финских рек увеличивалось в меридиональном направлении с севера на юг от ~1.3 до ~11.1. Аналогичные величины соотношения  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  для вод рек Нивы и Невы были близки к значениям, полученным для финских рек. Сдвиг соотношения  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  является откликом водного мигранта  $^{90}\text{Sr}$  и литофила  $^{137}\text{Cs}$  на изменения климатических и ландшафтных условий от Кольского п-ова на севере до Карельского перешейка на юге.

Для Онежского озера полупериод времени  $T$  очищения вод от глобальных  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  составил 16.5 и 8.0 лет соответственно.

Оценка по экспериментальным данным запасов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде и донных отложениях Ладожского озера показала, что для  $^{90}\text{Sr}$  запасы в средах находятся в соотношении 2:1, а  $^{137}\text{Cs}$  – 1:10. Обнаружено, что очищение вод Ладожского озера от глобального  $^{137}\text{Cs}$  было более медленным, чем от «чернобыльского» нуклида. При близком поступлении глобального (73.4 ТБк) и «чернобыльского» (74.1 ТБк)  $^{137}\text{Cs}$  в Ладогу на очищение вод озера до уровня 2-3 Бк/м<sup>3</sup> потребовалось ~20 и ~5 лет соответственно. В условиях хронического поступления глобального  $^{137}\text{Cs}$  из атмосферы воды озера очищались медленнее, чем при разовом отложении радионуклида на зеркало вод. Привнос  $^{137}\text{Cs}$  в Ладогу выше со стоком р. Вуоксы, чем с водами других рек бассейна. В сопряженных системах водосбор–глубокое озеро–сток отчетливо прослеживается различие в миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , обуславливаемое геохимической природой их стабильных аналогов. Влияние ландшафтных и климатических условий Субарктики на водную миграцию  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  проявляется масштабно на региональном уровне европейский Север–Восточная Сибирь и локальном – в меридиональном направлении Кольский п-ов–Карелия.

### Литература

1. Бакунов Н.А., Саватюгин Л.М., Фролов И.Е. Вопросы устойчивости природных комплексов Российской Арктики к радиоактивному загрязнению// Арктика: экология и экономика, 2011. № 1 С. 82-93.
2. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Макаров А.С. Сток глобального  $^{90}\text{Sr}$  с водосборов Восточной Фенноскандии// Метеорология и гидрология, 2010. № 10. С. 34-44.
3. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Макаров А.С. Естественная дезактивация вод больших рек российского Севера от глобального  $^{90}\text{Sr}$  // Радиохимия, 2012. Т. 54. № 2. С. 188-192.
4. Бакунов Н.А., Большианов Д.Ю., Макаров А.С. К состоянию загрязнения глобальными  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239, 240}\text{Pu}$  Ладожского озера // Водные ресурсы, 2012. Т. 39. № 5. С. 521-529.
5. Вакуловский С.М., Абдурагимов Е.С., Колесникова Л.В. и др.  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностных водах суши на территории России в 1961-2011 гг. // Атомная энергия, 2013. Т. 114. Вып. 1. С. 57-60.
6. Рахола Т., Саксен К., Костиайнен Э. и др. Техногенная радиоактивность в организме человека и окружающей среде// Радиохимия, 2006. Т. 48. № 6. С. 562-566.
7. Саксен Р., Яаккола Т., Рантаваара А. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в южной части озера Пяйянне и его зонах водосбора // Радиохимия, 1998. Т.40. № 6. С. 504-509.
8. Ilus E., Saxen R. Accumulation of Chernobyl – derived  $^{137}\text{Cs}$  in bottom sediments of some Finnish lakes // Journal of Environmental Radioactivity, 2005. Vol. 82. P. 199-221.

ON THE ISSUE OF  $^{90}\text{Sr}$  AND  $^{137}\text{Cs}$  MIGRATION IN WATER RESERVOIRS  
OF SUBARCTIC REGIONS OF RUSSIA

N.A. Bakunov, D.Yu. Bolschiyanov, A.S. Makarov

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia,  
[makarov@aari.ru](mailto:makarov@aari.ru), [bolshyanov@aari.nw.ru](mailto:bolshyanov@aari.nw.ru)

Regional differences in the  $^{90}\text{Sr}$  transfer from catchment areas to river of the European Russian North and Eastern Siberia and in the rates of natural water clearance were revealed. The annual  $^{90}\text{Sr}$  transfer was 0.5-0.6 and 0.2-0.3%, respectively, of the total inventory in the catchment area. The half-times  $T$  of natural decontamination of Onega, Norten Dvina, Pechora, Lena and Indigirka from global  $^{90}\text{Sr}$  are estimated at 15.0, 15.4, 13.9, 10.0 and 7.5 years respectively. An half-times  $T$  of  $^{137}\text{Cs}$  concentration decrease in the waters of Eastern Fennoscandia rives in 1979-1985 amounted to 4.3-7.5 years. The annual global  $^{137}\text{Cs}$  transfer was 0.12-0.02% respectively, of the total inventory in the catchment area. The half-times  $T$  of natural decontamination of Onega Lake from global  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  estimated at 16. 5 and 8.0 years. The maintenance of the core in water of Ladoga Lake was following:  $^{90}\text{Sr}$  4.9-9.0 Bk/m<sup>3</sup>, and  $^{137}\text{Cs}$  2-6 Bk/m<sup>3</sup> correspondingly.

ВОДНАЯ БИОТА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ:  
ЭФФЕКТЫ ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ОРГАНИЗАЦИИ

Д.И. Гудков<sup>1</sup>, Н.Л. Поморцева<sup>1</sup>, Е.В. Дзюбенко<sup>2</sup>, Н.Л. Шевцова<sup>1</sup>,  
Н.К. Родионова<sup>3</sup>, А.Е. Каглян<sup>1</sup>, А.Б. Назаров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, Украина,  
[diguikov@gmail.com.ua](mailto:diguikov@gmail.com.ua)

<sup>2</sup> Переяслав-Хмельницкий государственный  
педагогический университет, Переяслав-Хмельницкий, Украина

<sup>3</sup> Институт экспериментальной патологии, онкологии и радиобиологии  
им. Р.Е. Кавецкого НАН Украины, Киев, Украина

<sup>4</sup> Чернобыльский спецкомбинат МЧС Украины, Чернобыль, Украина

Замкнутые и слабопроточные водоемы Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) продолжают характеризоваться высокими уровнями содержания радионуклидов во всех компонентах водных экосистем. При этом интенсивное концентрирование радионуклидов водными организмами и/или их обитание в экологических зонах, характеризующихся высокими плотностями радионуклидного загрязнения, могут определять повышенные хронические дозы облучения. Исследования выполняли в период 1998-2013 гг. в оз. Азбучин, Яновском затоне, водоеме-охладителе ЧАЭС, водоемах Красненской поймы р. Припяти – озерах Глубокое, Далекое, Вершина,

Красненской старице, а также в реках Уж (с. Черевач) и Припять (г. Чернобыль). В качестве водоемов для сравнения использовали ряд озер с фоновым уровнем радионуклидного загрязнения, расположенных в г. Киеве и его окрестностях – Вырлица, Голосеевское, Опечень, Подборная. Мощность поглощенной дозы для гидробионтов полигонных водных объектов ЧЗО в период исследований регистрировали в диапазоне  $4.6 \cdot 10^{-3}$ – $3.4$  Гр/год, в контрольных водоемах – до  $1.7 \cdot 10^3$ . Максимальные уровни в ЧЗО отмечены для гидробионтов озер одамбированного участка левобережной поймы р. Припяти, минимальные – для проточных водных объектов. Основным дозообразующим радионуклидом для гидробионтов большинства замкнутых водоемов в настоящее время является  $^{90}\text{Sr}$ , на долю которого приходится до 90-95% мощности внутренней поглощенной дозы.

Цитогенетический анализ эмбрионов пресноводного моллюска прудовика обыкновенного *Lymnaea stagnalis* L. свидетельствует о повышенном уровне aberrаций хромосом у беспозвоночных из замкнутых водоемов ЧЗО по сравнению с контрольными водоемами. За период исследований наибольшие значения зарегистрированы для моллюсков замкнутых водоемов ЧЗО, в клетках которых частоту aberrаций хромосом регистрировали в пределах 18-27%, что в среднем более чем в 10 раз превышает уровень спонтанного мутагенеза для водных организмов. Моллюски рек Уж и Припять характеризовались невысоким средним уровнем aberrантных клеток – соответственно 2.5 и 3.5%. Для моллюсков контрольных озер этот показатель равнялся в среднем 1.5%, с максимальными значениями до 2.3%. Отмечена положительная корреляция между частотой aberrантных анафаз и мощностью поглощенной дозы у эмбрионов прудовика обыкновенного в водоемах ЧЗО. Дозовая зависимость количества aberrантных клеток в эмбриональных тканях моллюсков наиболее соответствует степенной функции.

Частота aberrаций хромосом в клетках апикальных меристематических тканей корней высших водных растений тростника обыкновенного (*Phragmites australis*), телореза алоэвидного (*Stratiotes aloides*), манника большого (*Glyceria maxima*), сусака зонтичного (*Butomus umbellatus*), ежеголовника прямого (*Sparganium erectum*) и стрелолиста стрелолистного (*Sagittaria sagittifolia*) из наиболее загрязненных озер зоны отчуждения составляла 7-17%. В растениях рек Уж и Припять этот показатель равнялся в среднем 3.5-5.0%, а в водоемах с фоновым уровнем радионуклидного загрязнения не превышал 2.6% и составлял в среднем 1.9%. Таким образом, частота хромосомных aberrаций в тканях гидробионтов замкнутых водоемов ЧЗО многократно превышает уровень спонтанного мутагенеза, свойственный водным организмам, и может быть проявлением радиационно-индуцируемой генетической нестабильности.

Установлено, что у рыб, обитающих в исследованных озерах ЧЗО, отмечаются значительные количественные и качественные изменения во всех ростках кроветворения. В водоемах с высоким уровнем радионуклидного загрязнения содержание лейкоцитов в крови рыб существенно ниже их уровня, по сравнению с контрольными водоемами. При этом общее количество тромбоцитов у рыб из загрязненных водоемов выше контрольных показателей. У окуня оз. Глубокое отмечено увеличенное содержание овальных форм тромбоцитов. Эритроциты карася и окуня из оз. Глубокое были наиболее подвержены патологическим изменениям как ядра, так и самой клетки. Общее количество нарушений клеток в этом водоеме регистрировали на следующем уровне: для карася обыкновенного – 59.5‰, окуня – 22.6, что значительно превышает показатели нарушений для рыб из контрольных водоемов (рис. 1). Среди исследованных рыб ЧЗО особи без клеточных патологий нами не обнаружены. Обращает на себя внимание снижение процентного содержания лимфоцитов в периферической крови карася и окуня, обитающих в ЧЗО, по сравнению с контрольными водоемами. При этом происходит увеличение количества гранулоцитов. Так, в гемограмме окуня, наиболее высокое относительное содержание гранулоцитарных элементов – нейтрофилов и псевдоэозинофилов (выполняющих фагоцитарную функцию и участвующих в аллергических и аутоаллергических реакциях) – отмечали в крови рыб из оз. Глубокое и Яновского затона по сравнению с контрольными водоемами. В то же время наблюдали отсутствие псевдобазофилов в крови окуня из всех исследуемых водоемов. Относительно высокий процент моноцитов (фагоцитирующих клеток, поглощающих бактерий, а также продукты распада клеток и тканей) у окуня из оз. Глубокое свидетельствует об увеличении количества поврежденных клеточных элементов.

Анализ гемограммы карася показал аналогичную зависимость между высоким содержанием гранулоцитов и низким – агранулоцитов в крови рыб из водоемов ЧЗО. При этом в крови рыб из оз. Азбучин, характеризующихся наиболее интенсивным накоплением  $^{90}\text{Sr}$ , относительное количество лимфоцитов и моноцитов составляло 48.8%, что 1.6 раза меньше по сравнению с данными для рыб из контрольных водоемов. Высокий процент эозинофилов в периферической крови карася обыкновенного из оз. Глубокое может свидетельствовать о физиологическом неблагополучии рыбы, проявившемся в аллергической реакции. Необходимо отметить, что сочетание эозинофилии с лимфопенией – неблагоприятный признак, свидетельствующий о хроническом стрессе у рыб. Часто встречающиеся на мазках бластные формы белой крови являются свидетельством интенсивной деятельности кроветворных органов. Высокое со-

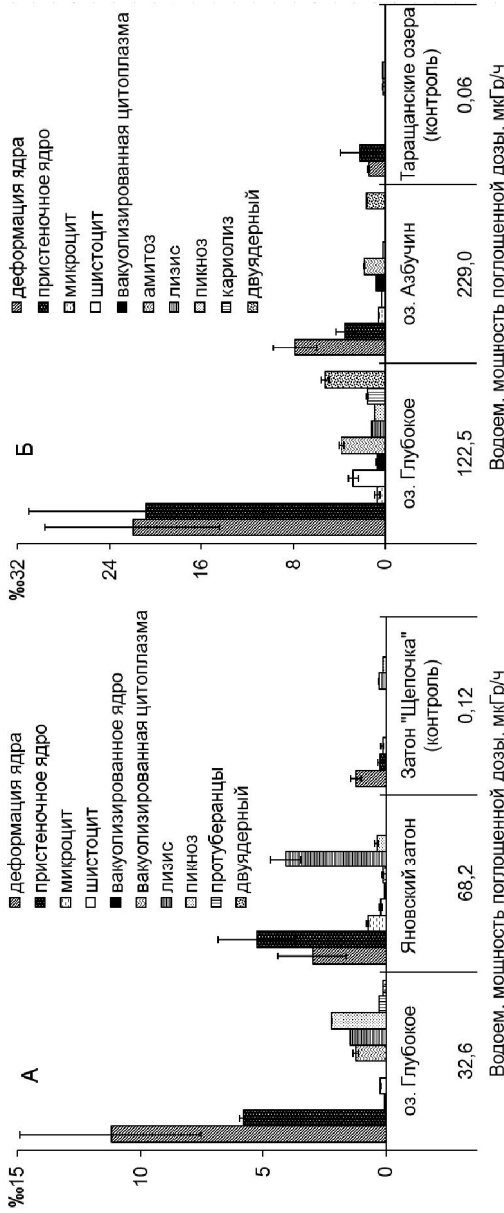


Рис. 1. Нарушения морфологии эритроцитов окуня речного (А) и карася обыкновенного (Б) в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения.

держание нейтрофилов в крови рыбы, обитающей в водоемах ЧЗО, указывает на зараженность рыбы гельминтами. При этом инвазия, в данном случае, не первопричина, а лишь фактор, усиливающий повреждающее воздействие на фоне снижения иммунных реакций организма.

Сравнительный анализ состава форменных элементов гемолимфы прудовика обыкновенного показал, что у моллюсков из замкнутых водоемов ЧЗО доля мертвых агранулоцитов в среднем составляет 43%, а количество фагоцитов – 42%. Аналогичные показатели у моллюсков из контрольных водоемов были значительно ниже и составили соответственно в среднем 6 и 4%. Количество молодых амебоцитов у моллюсков ЧЗО, наоборот, оказалось невысоким – в среднем 15%, в то время как у моллюсков контрольных водоемов достигало 90% (рис. 2).

Морфологические показатели кладок (размерные показатели и количество яиц в кладке) моллюсков из водоемов ЧЗО были достоверно ниже контрольных. В импактных водных объектах зарегистрирован также высокий процент следующих типов аномалий: отсутствие яйцеклетки в яйцевой капсуле; слабая спирализация тяжа

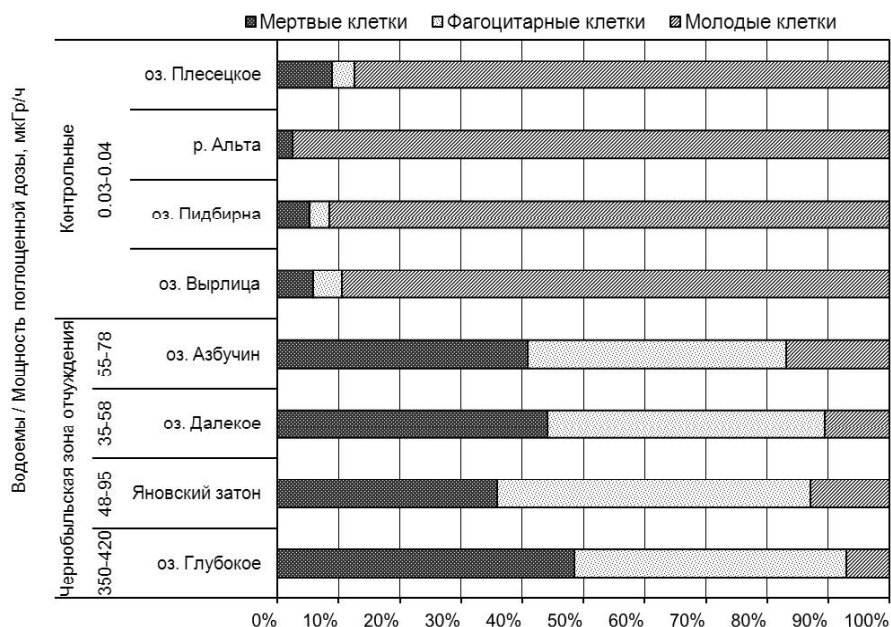


Рис. 2. Состав форменных элементов мантийной жидкости прудовика обыкновенного в водоемах ЧЗО и контрольных водных объектах.

с яйцевыми капсулами; многозиготность яйцевых капсул; однорядное размещение яйцевых капсул; малое количество яйцевых капсул в синкапсуле; наличие яйцеклеток и яйцевых капсул за пределами синкапсулы. Соотношение количества нарушений в строении кладок прудовиков из водоемов ЧЗО в сравнении с контрольной группой в среднем составило 12:1.

У тростника обыкновенного в водоемах ближней ЧЗО с 2000–2002 гг. регистрируется высокий уровень поражения метелок паразитическими грибами *Claviceps purpurea* и галлообразующими членистоногими, в особенности клещами *Steneotarsonemus phragmitidis* (до 100% побегов тростника в водоеме). В пораженных клещом куртинах тростника формируются низкорослые побеги с пораженной верхушкой, образующие ветвления вплоть до третьего порядка. При этом в некоторых наиболее пораженных клещом водоемах (Яновский затон, оз. Далекое) к 2013 г. наблюдали практически полную гибель отдельных куртин тростника и их постепенное замещение другими видами. Предполагается, что одной из возможных причин массового поражения и последующей гибели растений может быть снижение их паразитарной стойкости в условиях хронического радиационного воздействия.

**AQUATIC BIOTA CHERNOBYL ZONE:  
RADIATION EFFECTS OF CHRONIC EXPOSURE  
TO DIFFERENT LEVELS OF ORGANIZATION**

**D.I. Gudkov<sup>1</sup>, N.L. Pomortseva<sup>1</sup>, E.V. Dzybenko<sup>2</sup>, N.L. Shevtsova<sup>1</sup>,  
N.K. Rodionova<sup>3</sup>, A.E. A.E. Kaglyan<sup>1</sup>, A.B. Nazarov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Hydrobiology of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine,  
[digudkov@gmail.com.ua](mailto:digudkov@gmail.com.ua)

<sup>2</sup> Pereyaslav-Khmelnytsky State Pedagogical University,  
Pereyaslav-Khmelnytsky, Ukraine

<sup>3</sup> Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology named  
RE Kavetsky NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

<sup>4</sup> State enterprise “Chernobyl special works”, Chernobyl, Ukraine

Cytogenetic and hematologic effects as well as decrease in producing capacity and parasitic diseases of aquatic biota due to long-term radiation exposure in lakes, crawls, cooling pond as well as rivers within the Chernobyl accident exclusion zone during 1998–2013 were studied. Chromosome aberration rate in tissue of hydrobionts from the closed water bodies of the exclusion zone repeatedly exceeds a spontaneous mutagenesis level for aquatic biota and can be display of radiation-induced genetic instability.



## ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНВЕРСИИ В СРАВНИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАДИОЭКОЛОГИИ

О.Л. Зарубин, Н.Е. Зарубина

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина,  
[oleg.zarubin2011@mail.ru](mailto:oleg.zarubin2011@mail.ru), [natalie.zarubina@mail.ru](mailto:natalie.zarubina@mail.ru)

В 1987-2009-2011 гг. изучали удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  у рыб Каневского водохранилища и водоема-охладителя ЧАЭС (рис. 1).

Для сравнительной оценки динамики удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  у гидробионтов, которая представляет собой нелинейный процесс, вместо не совсем подходящего по нашему мнению для этих целей термина «скорость» (снижения или увеличения), авторы предлагают использовать коэффициент инверсии:  $K_{\text{инв}} = A_0/A_t$ , где  $A_0$  – удельная активность радионуклида в нулевой момент времени;  $A_t$  – активность радионуклида в момент времени  $t$ . По сути  $K_{\text{инв}}$  отражает кратность изменения (инверсии) удельной активности радионуклидов за любой произвольный отрезок времени, т.е. во сколько раз снизилась (или увеличилась) удельная активность в любой выбранный для изучения отрезок времени. Если  $K_{\text{инв}} > 1$  – удельная активность радионуклида снижается,  $K_{\text{инв}} < 1$  – увеличивается.  $K_{\text{инв}}$  можно использовать для сравнения динамики удельной активнос-

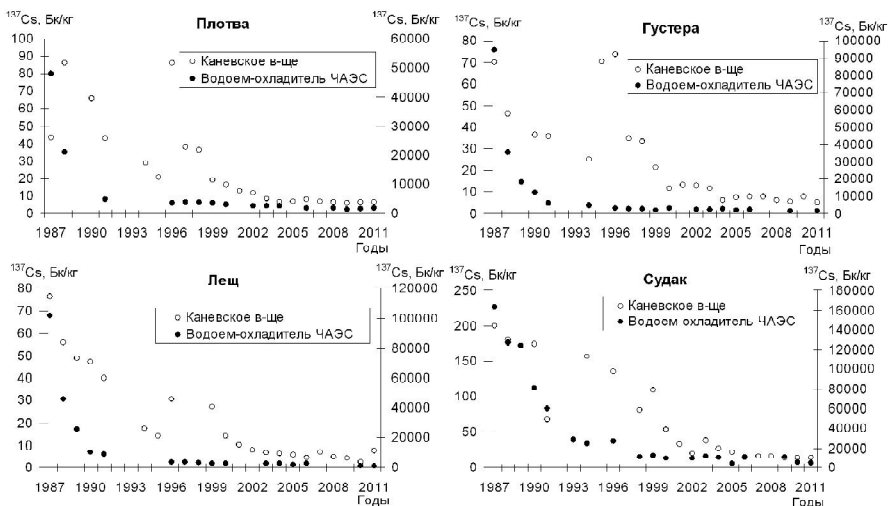


Рис. 1. Динамика удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  у рыб Каневского водохранилища и водоема-охладителя ЧАЭС (Бк/кг).

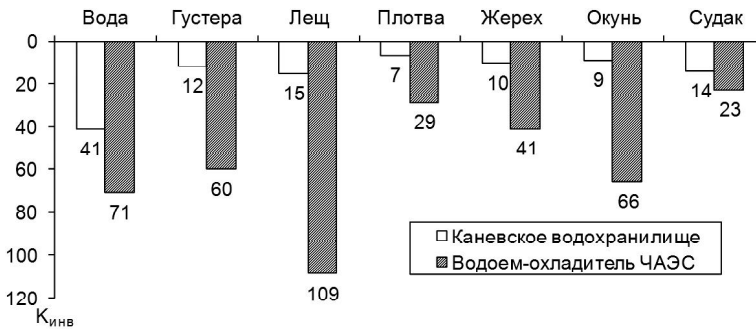


Рис. 2.  $K_{инв}^{137Cs}$  у рыб и воды изучаемых водоемов за период 1987-2009-2011 гг.

сти  $^{137}Cs$  (и не только) в одинаковый отрезок времени при решении различных радиозэкологических задач.

На рис. 1 видно, что снижение удельной активности  $^{137}Cs$  у рыб водоема-охладителя ЧАЭС происходит значительно быстрее по сравнению с рыбами Каневского водохранилища, что особенно ярко проявляется у рыб-бентофагов в первые годы после аварии. Причины этого явления не рассматриваются в данных материалах; авторы предполагают их рассмотреть в последующих статьях.

В отдельные годы вместо снижения удельной активности  $^{137}Cs$  у рыб Каневского водохранилища наблюдается ее увеличение (плотва, густера). Так, за период 1987-1996 гг.  $K_{инв}^{137}Cs$  у плотвы в Каневском водохранилище составил 0.57, в водоеме-охладителе – 13.33; у густеры соответственно 0.95 и 29.61. За период 1987-2009-2011 гг. удельная активность  $^{137}Cs$  у рыб водоема-охладителя снизилась в десятки (до сотни и более) раз, в то же время у рыб Каневского водохранилища это снижение было меньшим (рис. 2).

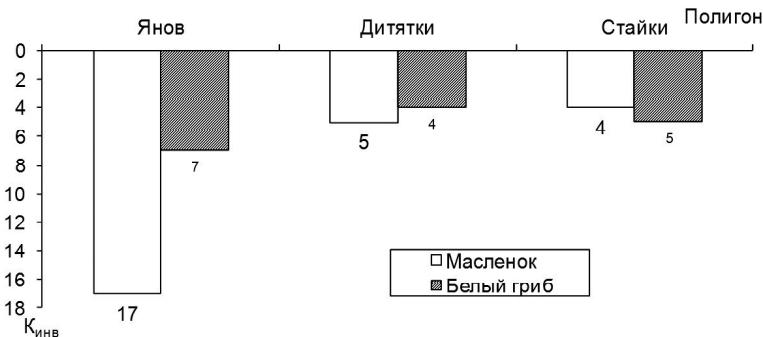


Рис. 3.  $K_{инв}^{137}Cs$  у грибов изучаемых водоемов за период 1997-2008 гг.

Также  $K_{\text{инв}}$  можно использовать для решения других задач, например, для сравнения снижения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в грибах на разных полигонах (рис. 3) и др.

Таким образом, этот универсальный и простой  $K_{\text{инв}}$  можно использовать для решения широкого круга задач, связанных с оценкой и сравнением динамики одинаковых процессов за любой, произвольно выбранный отрезок времени.

#### THE USE OF INVERSION COEFFICIENTS FOR THE COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC PROCESSES IN RADIOECOLOGY

O.L. Zarubin, N.E. Zarubina

Kiev Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine,  
[oleg.zarubin2011@mail.ru](mailto:oleg.zarubin2011@mail.ru), [natalie.zarubina@mail.ru](mailto:natalie.zarubina@mail.ru)

Authors suggest to use factor of inversion for the decision of problems connected with an estimation and comparison of dynamics of identical processes for any interval of time. Factor of inversion of  $K_{\text{inv}} = A_0 / A_t$ , where  $A_0$  – numerical value of parameter during the zero moment of time;  $A_t$  – numerical value of parameter at the moment of time  $t$ .  $K_{\text{inv}}$  reflects order of change (inversion) of studied parameters for any interval of time.

#### ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ВЕЛИЧИНУ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ $^{137}\text{Cs}$ В ПОЧВАХ 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧАЭС

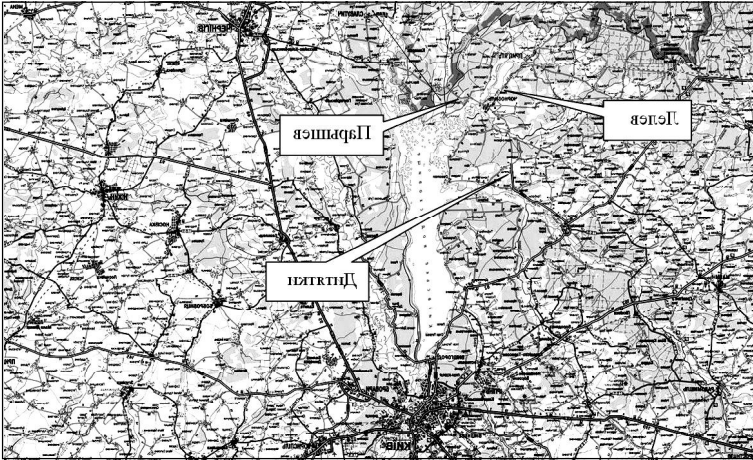
Н.Е. Зарубина, О.Л. Зарубин, И.О. Павленко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина,  
[natalie.zarubina@mail.ru](mailto:natalie.zarubina@mail.ru)

Исследования содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах (послойно) на территории зоны отчуждения ЧАЭС показали значительные колебания уровней удельной активности этого радионуклида на протяжении календарного года [1].

Цель нашей работы – исследование влияния метеорологических условий (количества осадков и максимальной дневной температуры воздуха) на протяжении года на колебания содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве лесных экосистем на территории зоны отчуждения и зоны безусловного (обязательного) отселения ЧАЭС (ЗО).

Пробы почв отбирались на трех полигонах ЗО: полигон «Лелев» – 10-километровая зона, «Парышев», «Дитятки» – 30-километровая (см. рисунок). Почвы относятся к одному типу – дерново-подзолистые. Более подробное описание типов почв приведено в работе [1].



Яное йовортёмолнк-0Э ннротнррэт вн дорп вродто вонотнпоп хынвонсо втрэК  
.ЧЭАР рннэджурто

т 700С я рдртнэс с донрп я онррэмэжэ вэплндоворп дорп родто  
«нктртнД» н «явешіа» хвотнпоп вн т 2012 рдрвжэд денож оп  
с вннрвн онррэмэжэ аэплврдндо идвзрдо «явэл» энотнпоп вн  
т 2012 рдрвжэд денож оп т 800С рнон  
ндотэм онэвлтос аэплндоворп явроп дорп вэвотчдоп н родто  
н дорп вэвотчдоп втрэвноя модотэм аэплврдндо удорп [2, 3] мвн  
-уэы явроп хвнвопчдэ хынрвотвродвч я аэплндоворп мннэемн  
-осаврв, аэплврдндо томот мвсрв йоху-оншдвдо од аэплвнш  
вдвпо влд т 30-01 :йокэоян с удвдоп оунавворднвч я аэплвнш  
хншвжэлэжн влд - т 082-01 н нклтдоп йонэп влд - 02-08  
-орп я в<sup>137</sup>с рннвжрэдос эннэрэмн (мэ 01-2 н 2-0) яеолэ хыннэроп  
-рднвтс оп яннвч<sup>137</sup> НАН NRN я аэплндоворп (онйолэс) вроп хвд  
ннртёморчкэпс-вмвч мвчндотэм мннт  
-эрплож о хыннвд вояннротсн хннтвллэсд хннпүтсод ондлрв эН  
втрэвр влд 0Э ннротнррэт вн вхдвс хврүтврпмэт н вондэс вэто  
-орп вл дрч втйэ вхрв нрднч влд нндлррдо воннннффеос  
(эфіс тМ) ннвтнрдожнлэс в моэфО тМ ртоивнпавтотдоп йзонт  
эыннвД нннннп йшонувтэтэятоос оп этйэс вн ртоивнпавтотдэрп н  
хкжэрпложорэтэм хынмэвн с тоивпүтсод эдотоп йокжэрпнлрф о  
-оротэм внемдо олондороднвджем олондодово үмэтэс эерер йннвтэ  
эднч я внлэвтсдэрп этйэс вн рнпаврорфнН нмннвд нмнжэрплож  
ннмэрч воннмом хынрот мннвзвчү с пндвт  
хролэ хынэвр я в<sup>137</sup>с нннрлүмүжч вннвводэлэсн эннтэлотонМ  
отр нлвзвчоп ЧЭАР рннэджурто яное ннротнррэт вн вроп хынэп  
-эл.Я рстөрнэмн вннрплэч вте врот олонрдвнлэч нннэжрторп вн

оп ,жылгындоп ,дыпо в эС<sup>781</sup> нтсонянткя йоналгудү йннөрвнэ рннэд  
 ваддроп олокернтэмэтэм олондо твчнтсод тудом мэ 0Г-д н д-0 эв  
 .[Г] ннрнлгя  
 -эртлолоорэтэм (рнэтэтүэто отэ нлн) рннрнлгя рннөгэдэрпо рлд  
 -эжлторп вх хвароп в эС<sup>781</sup> рннжжрдод эннэнэмен вх водотлвф хнж  
 үджэм (ч) нндрлгэррж йтнэнпффож йнвтнрссар нлгэд влот хнн  
 нмнжсэрнтлоорорэтэм н йвароп хрогс хннрнлгя в эС<sup>781</sup> мөннжжрдод  
 вад) ннэмэр вдрерп өнэр вэ вэ вождэсэ мовтсэрнлжж – нмжжотлжж  
 -эшдрерп , (нэд ннд о нрт , втвп , нлгэдэн внд н вад , вдрср ннд о н  
 йорүтүвэрпэмт йонвэнд йонатлмнжж н , үрүдоттоороп нмншавэвэ  
 -эдэвэр вэтэр вэр хнннэдэвэр өннннвД . врдот тнэмом вх вхүдэс  
 .8-Г . лдвт в нн  
 атсомнжжэс рннннл 8.0 > ч > 8.0 – нрп отр , втвтнрэ отрннрП  
 > д.0 – ; тевүтүэто нжсэрнткярп нмжжтэмвэрп нмжжүдөлсөн үджэм  
 .[4 , 5] нярэ йодвлс ннншавэвэшүс о тнрвот д.0 > ч > 8.0 н 8.0 – > ч  
 йтнэнпффож йнншавөдөлсөн ханотлжж хэсэ вх нжсэрнткярп  
 -эрп в вртүдохн нмжжтэмвэрп нмнншавөдөлсөн үджэм нндрлгэррж  
 нрт йодвлс өнрнлн вртүкяр мөннөрнжж . 8.0 > ч > 8.0 – хлгэд  
 амэс н 4Г , 08 , 0д вэ вождэсэ мовтсэрнлжж үджэм нярэ йонлэтв  
 , «вэлл» өнотлжж вх мс д-0 йвароп өолс в эС<sup>781</sup> мөннжжрдод н йндр  
 -рдод н рнд нрт н 4Г , 08 , 0д вэ вождэсэ мовтсэрнлжж үджэм эжлжт в  
 . лдвт) «нжртнД» өнотлжж вх жылгындоп йонсөл өолс в эС<sup>781</sup> мөннжж  
 -рлгэррж вонтннпффож внрнлгя оланд . (оннэвтсэвтэоос 8 н 5  
 рлд д.0 > ч н «вэлл» өнотлжж рлд ч > д.0 – хларүгс хнтэ в ннн  
 . «нжртнД» өнотлжж  
 отр , втвжжрүтү онжом , вонтннпффож хнннөрүгөс өн вдохсН  
 -лжж вх хрогс хнннээрп хннээр в эС<sup>781</sup> рннжжрдод үннрнлгя вх  
 н вождэсэ вятсэрнлжж вроп рнннэррлжж нмншавүр нмннээр с ханот  
 -рнлжж өн нжсэрнткярп вхүдэсэ вртүвэрпэмт рннвэнд рннлмнжж  
 . то

1 өрлүдэТ

вароп в эС<sup>781</sup> олтсонянткя йоналгудү үджэм нндрлгэррж йтнэнпффож  
 («вэлл» өнотлжж) нмжжотлжж нмнжсэрнтлоорорэтэм н (оннпозоп)

вароп		вчлчтсодл	двпо	мм , нкдсО
мс 0Г-д	мс д-0			
180.0	170.0	111.0	071.0	йнд 08
825.0	125.0	910.0	780.0	йнд 08
125.0	871.0	701.0	890.0	йнд 41
250.0-	250.0	120.0	120.0	йнд 7
200.0	270.0	200.0	0137.0	йнд 5
0.015	0.091	0.051	0.121.0	рнд 8
140.0	280.0	800.0	181.0	янд 1
820.0-	740.0-	120.0	820.0-	° , вхүдэсэ вртүвэрпэмт

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в почве (послойно) и метеорологическими факторами (полигон «Пелев»)**

Осадки, мм	Опад	Подстилка	Почва	
			0-5 см	5-10 см
60 дней	0.051	0.166	-0.379	0.060
30 дней	0.072	0.204	-0.415	-0.210
14 дней	-0.023	0.261	-0.356	-0.162
7 дней	-0.059	0.087	-0.311	-0.046
5 дней	0.074	0.078	-0.212	0.050
3 дня	0.115	0.072	-0.234	0.001
1 день	0.013	0.099	-0.226	-0.033
Температура воздуха, °C	-0.067	0.136	-0.055	-0.056

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в почве (послойно) и метеорологическими факторами (полигон «Дитятки»)**

Осадки, мм	Опад	Подстилка	Почва	
			0-5 см	5-10 см
60 дней	-0.141	0.365	-0.031	-0.013
30 дней	-0.144	0.471	-0.146	-0.023
14 дней	-0.118	0.379	-0.107	-0.037
7 дней	-0.013	0.258	-0.060	-0.125
5 дней	0.007	0.284	-0.084	-0.126
3 дня	-0.033	0.319	-0.008	-0.158
1 день	-0.037	0.272	-0.088	-0.124
Температура воздуха, °C	-0.262	0.250	0.029	-0.226

Отсутствие влияния таких абиотических факторов, как количество осадков и температура воздуха, на колебания содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве говорит о вероятном существовании какого-то до сих пор не определенного биологического фактора, который оказывает влияние на содержание этого радионуклида в разных почвенных слоях на протяжении календарного года.

Не было установлено достоверной зависимости влияния метеорологических факторов (количества осадков и максимальной дневной температуры воздуха) на уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почве (послойно) на территории полигонов ЗО ЧАЭС.

### Литература

1. *Зарубина Н.Е.* Изменение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в профиле почв в годичном цикле на территории зоны отчуждения ЧАЭС // Зб. наук ст. VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення», 10-14 вересня 2012 р., м. Алушта, АР Крим, Україна. м. Харків, 2012. Т. 1. С. 142-147.

2. *Лакін Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.

3. Методичні рекомендації «Пробовідбір повітря, води, ґрунту, донних осадів та атмосферних випадань для визначення вмісту радіонуклідів». К., 1998. 29 с.

4. *Минашкин В.Г., Гусынин А.Б., Садовникова Н.А., Шмойлова Р.А.* Курс лекций по теории статистики. М., 2003. 189 с.

5. *Хомутинин Ю.В., Каширов В.А., Жебровская Е.И.* Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге. Киев: УкрНИИСХР, 2001. 160 с.

### METEOROLOGIC CONDITIONS INFLUENCE ON $^{137}\text{CS}$ SPECIFIC ACTIVITY IN SOILS FROM CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

N.E. Zarubina, O.L. Zarubin, I.O. Pavlenko

Kiev Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine,  
[natalie.zarubina@mail.ru](mailto:natalie.zarubina@mail.ru)

Researches of influence of weather conditions (an amount of precipitation and the maximum day's temperature of air) on levels of specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in different soil layers on sampling areas of an alienation zone of ChNPP have been carries out from 2007 till 2012. Reliable dependence between the content of  $^{137}\text{Cs}$  in soils (layer-by-layer) and weather conditions was not determined.

### РЫБЫ В ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ УРОВНИ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ

А.Е. Кагрян<sup>1</sup>, Д.И. Гудков<sup>1</sup>, В.Г. Кленус<sup>1</sup>, А.Б. Назаров<sup>2</sup>, Н.А. Поморцева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, Украина,  
[alex\\_kt983@mail.ru](mailto:alex_kt983@mail.ru)

<sup>2</sup>Государственное специализированное предприятие  
«Чернобыльский спецкомбинат», Чернобыль, Украина

Миграция радионуклидов в бассейнах речных систем определяется преимущественно динамикой гидрологических и биогеохимических процессов перемещения веществ в окружающей среде. Наряду с седиментационным и сорбционным депонированием радионуклидов донными отложениями, а также осаждением со взвешенным веществом, важной составляющей процессов их распределе-

ния в пресноводных экосистемах является аккумуляция гидробионтами. При этом особое внимание уделяется рыбному населению водоемов, занимающему в гидробиоценозах верхние трофические уровни и входящему в рацион питания человека.

Исследования выполняли в 2009-2013 гг. в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) с различной степенью проточности. Основные водные объекты – русловой участок р. Припять вблизи г. Чернобыля, речные затоны «Щепочка» (открытый, но с замедленным водообменом) и Яновский (отсеченный от р. Припяти после аварии на ЧАЭС намывной дамбой), а также оз. Глубокое – один из наиболее загрязненных радионуклидами водоемов ЧЗО, расположенный на территории левобережной поймы реки. Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  анализировали для пяти хищных видов (облигатных и факультативных ихтиофагов): судак (*Sander lucioperca* L.), сом европейский (*Silurus glanis* L.), щука (*Esox lucius* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), чехонь (*Pelecus cultratus* L.) и семи «мирных» видов рыб: зоопланктонофаг – синец (*Ballerus ballerus* L.), бентофаг – карась (*Carassius carassius* L.), лещ (*Abramis brama* L.), густера (*Blicca bjoerkna* L.), линь (*Tinca tinca* L.), плотва (*Rutilus rutilus* L.), а также фитофаг красноперка (*Scardinius erythrophthalmus* L.). Возраст рыб составлял от двух до 12 лет. Оценку мощности поглощенной дозы для рыб от внешних и внутренних источников облучения выполняли при помощи программного комплекса ERICA Assessment Tool 1.0 (November, 2012).

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  у представителей хищных видов рыб руслового участка р. Припяти в период исследований была соответственно в пределах 25-224 и 3-16 Бк/кг (здесь и далее удельная активность приведена на килограмм сырой массы), а «мирных» видов рыб – 12-60 и 3-14 Бк/кг (табл. 1). В затоне «Щепочка» содержа-

Таблица 1

**Удельная активность рыб Чернобыльской зоны отчуждения  
в 2009-2013 гг., Бк/кг**

Водный объект	Рыбы по типу питания	$^{137}\text{Cs}$		$^{90}\text{Sr}$	
		Пределы содержания	Средние величины	Пределы содержания	Средние величины
Река Припять (русловой участок)	«Мирные»	16-60	36	16-60	36
	Хищные	22-224	45	22-224	45
Затон «Щепочка»	«Мирные»	27-159	63	27-159	63
	Хищные	25-151	85	25-151	85
Яновский затон	«Мирные»	517-3385	760	517-3385	760
	Хищные	1210-3400	2422	1210-3400	2422
Озеро Глубокое	«Мирные»	1175-31859	4920	1175-31859	4920



ние  $^{137}\text{Cs}$  у представителей как хищных, так и «мирных» видов рыб практически не отличалось от рыб руслового участка реки, однако содержание  $^{90}\text{Sr}$  у ихтиофагов было существенно выше – 11-113, а у «мирных» – 51-221 Бк/кг. При этом максимальные значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  более чем в шесть раз превышали допустимый уровень (ДУ) радионуклида для рыбной продукции в соответствии с действующими в Украине нормативами – 150 Бк/кг для  $^{137}\text{Cs}$  и 35 – для  $^{90}\text{Sr}$  [1]. В Яновском затоне содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  у «мирных» видов рыб превышало ДУ соответственно в 3.4-22.5 и 22.7-109.3 раза, у хищных – соответственно в 9.9-21.0 и 17.9-47.4. Еще более загрязнена радионуклидами ихтиофауна оз. Глубокое, в котором удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  превышала ДУ у «мирных» видов соответственно в 7.8-212.0 и 210.0-665.0, у хищных – в 30.0-146.0 и 132.0-445.0 раз [5]. При этом следует отметить, что если  $^{137}\text{Cs}$  накапливается преимущественно в мышечной ткани рыб, то  $^{90}\text{Sr}$  практически весь сосредоточен в несъедобной части рыбы – чешуе, плавниках, костях и голове. Соотношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  у хищных рыб руслового участка Припяти составляло 0.06-0.52, у «мирных» – 0.15-0.23. В затоне «Щепочка» для ихтиофагов такое соотношение уже составляло 0.25-1.33, для представителей «мирных» видов рыб возросло до 1.01-2.46. В закрытом Яновском затоне и оз. Глубоком соотношение удельной активности радионуклидов  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  у «мирных» видов рыб составило 1.73-6.58.

Кроме того, в затонах и старицах р. Припяти с замедленным водообменом, очевидно, происходит накопление растворимых, биологически доступных форм  $^{90}\text{Sr}$ , которые в настоящее время продолжают поступать с загрязненных радионуклидами территорий водосбора и вовлекаться в биогеохимический круговорот, концентрируясь в биотических компонентах водных экосистем. Собственные исследования подтвердили, что в большинстве проточных водоемов общее содержание  $^{137}\text{Cs}$  в теле рыб значительно превышает этот показатель для  $^{90}\text{Sr}$ . Это соответствует традиционным представлениям о соотношении радионуклидов, поступивших в водные объекты с глобальными выпадениями [6], но такая закономерность не всегда наблюдается для рыб слабопроточных участков рек, находящихся в пределах ЧЗО и имеющих специфическое соотношение физико-химических форм радионуклидов, обусловленное аварийными выбросами [2-4].

Результаты расчета мощности поглощенной дозы для рыб ЧЗО показали, что диапазон дозовых нагрузок, обусловленных внешними и внутренними источниками облучения, у исследованных видов руслового участка р. Припяти составил 0.011-0.042, затона «Щепочка» – 0.040-0.120, для представителей ихтиофауны Яновского затона и замкнутого оз. Глубокое эти величины достигли значений

1.6-9.3 и 7.5-22.4 мкГр/ч соответственно (табл. 2). Вклад в мощность поглощенной дозы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , инкорпорированных в тканях рыб оз. Глубокое, составил 33-87% от общей дозы, при этом для большинства видов на долю  $^{90}\text{Sr}$  приходится 43-75% общей мощности поглощенной дозы.

Таким образом, процессы естественного самоочищения замкнутых и слабопроточных водоемов ЧЗО протекают крайне медленно, в результате чего удельная активность основных дозообразующих радионуклидов в представителях ихтиофауны большинства озер, стариц и затонов продолжает оставаться на достаточно высоком уровне. Содержание радионуклидов в рыбах русловой части р. Припяти находится значительно ниже ДУ, действующих в Украине, и только в отдельных случаях незначительно превышает этот показатель (преимущественно у рыб-хищников). Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе слабопроточного затона «Щепочка» превышает ДУ в среднем в два-три раза. Удельная активность радионуклидов в ихтиофауне Яновского затона и оз. Глубокое превышает ДУ по  $^{137}\text{Cs}$  в 3.4-212.0, по  $^{90}\text{Sr}$  – в 17.9-665.0 раз. Диапазон мощности общей поглощенной дозы у рыб оз. Глубокое составил 7.53-22.40 мкГр/ч, условно непроточного Яновского затона – 1.60-9.28, полупроточного затона «Щепочка» – 0.04-0.12 и русловой части р. Припяти – 0.01-0.04 мкГр/ч. В большинстве водоемов Украины, расположенных за пределами ЧЗО, эта величина не превышает 0.01 мкГр/ч. При-

Таблица 2

**Мощность поглощенной дозы у рыб Чернобыльской зоны отчуждения  
с различным типом питания, мкГр/ч**

Водоем	Рыбы по типу питания	Общая доза	Внутренняя доза
Река Припять (русловой участок)	Бентофаги	0.024-0.026	0.008-0.010
	Хищные	0.011-0.042	0.007-0.018
Затон «Щепочка»	Бентофаги	0.079-0.080	0.053-0.062
	Зоопланктонофаги	0.045-0.049	0.041-0.043
	Фитофаги	0.117-0.120	0.112-0.114
	Хищные	0.040-0.069	0.036-0.069
Яновский затон	Бентофаги	7.300-7.380	1.350-1.370
	Зоопланктонофаги	3.480-3.500	1.850-1.870
	Фитофаги	3.590-3.610	1.870-1.900
	Хищные	1.600-9.280	0.781-1.610
Озеро Глубокое	Бентофаги	17.00-22.40	5.67-11.00
	Фитофаги	14.59-14.60	12.35-12.40
	Хищные	7.530-14.60	6.540-7.910

нимая во внимание, что для рыб замкнутых, условно непроточных и полупроточных водоемов на долю  $^{90}\text{Sr}$  приходится более половины общей мощности поглощенной дозы, можно сделать вывод, что  $^{90}\text{Sr}$  в настоящее время является основным дозообразующим радионуклидом для рыб большинства водоемов ЧЗО.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела пресноводной радиоэкологии Института гидробиологии НАН Украины В.В. Беляеву и Л.П. Юрчук за выполненный гамма-спектрометрический анализ проб.

### Литература

1. Допустимые урени содержания радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в продуктах питания и питьевой воде (ДУ-97). Министерство охраны здоровья Украины. Комитет НКРЗУ. Киев, 1997. 38 с. (на укр. яз.).

2. Гудков Д.И., Киреев С.И., Каглян А.Е. и др. Особенности накопления основных дозообразующих радионуклидов рыбой в водоемах зоны отчуждения // Чернобыльский научный вестник. Бюллетень экологического состояния зоны отчуждения, 2007. № 2 (30). С. 34-43. (на укр. яз.).

3. Гудков Д.И., Каглян А.Е., Назаров А.Б. и др. Динамика содержания и распределение основных дозообразующих радионуклидов у рыб зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Гидробиол. журн., 2008. Т. 44. № 3. С. 95-113.

4. Каглян А.Е., Гудков Д.И., Кленус В.Г. и др. Радионуклиды в аборигенных видах рыб Чернобыльской зоны отчуждения // Ядерная физика и энергетика, 2012. № 3. С. 306-315.

5. Каглян А., Гудков Д., Кленус В. и др. Радионуклидное загрязнение рыб пресных водоемов Украины после аварии на ЧАЭС // Двадцать пять лет Чернобыльской катастрофы. Безопасность будущего: Сб. докладов, выводы и рекомендации Междунар. конф. Киев: КиМ, 2011. Ч.2. С. 301-306.

6. Кузьменко М.И., Гудков Д.И., Киреев С.И. и др. Техногенные радионуклиды в пресноводных экосистемах. Киев: Наукова думка, 2010. 263 с. (на укр. яз.).

### FISHES FROM CHERNOBYL EXCLUSION ZONE: MODERN RADIOACTIVE CONTAMINATION LEVELS AND DOSES

A.E. Kaglan<sup>1</sup>, D.I. Gudkov<sup>1</sup>, V.G. Klenus<sup>1</sup>, A.B. Nazarov<sup>2</sup>, N.A. Pomortceva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Hydrobiology of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine,  
[alex\\_kt983@mail.ru](mailto:alex_kt983@mail.ru)

<sup>2</sup> State enterprise "Chernobyl special works", Chernobyl, Ukraine

The results of studies of radioactive contamination levels and radiation dose assessment of ichthyofauna of water bodies of the Pripyat River Basin within Chernobyl exclusion zone have been presented. The specific ratio of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  concentration in fishes of various trophic levels in lakes, crows, old river beds etc. with low and high flowage as well as different distance from the Chernobyl NPP has been determined.

## ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ОВОЩНЫХ КУЛЬТУРАХ В ЗОНЕ АРМЯНСКОЙ АЭС

Л.М. Калачян, А.З. Асатрян

Институт проблем гидропоники им. Г.С. Давтяна НАН РА, Ереван,  
Армения, [ani199@yandex.ru](mailto:ani199@yandex.ru), [hydrop@netsys.am](mailto:hydrop@netsys.am)

Поступление искусственных радионуклидов (ИРН,  $^{90}\text{Sr} - T_{1/2} = 28.6$  года,  $^{137}\text{Cs} - T_{1/2} = 30.1$  года) в аграрные экосистемы является следствием техногенной деятельности человека [1-3]. Армянская атомная электрическая станция (АЭС, рис. 1) размещена в густонаселенном районе интенсивного земледелия (Арагатской долине) и использует воду р. Мецамор (рис. 2). После утилизации вода поступает обратно в реку и используется для орошения земель. В условиях жаркого и сухого климата Арагатской долины это экономически выгодно, а с точки зрения радиоэкологии – нет. Начиная с 1996 г. нами проводились радиоэкологические исследования процессов миграции и накопления ИРН в системе поливная вода–почва–растение в зоне ААЭС радиусом 2-15 км [4] и разработка практических рекомендаций, применение которых на агроценозах позволит получать экологически безопасные продукты. С 2011 г. работы выполнены при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта № 11-1f262.

Исследования показали, что содержание ИРН в овощных культурах (базилик, петрушка, сельдерей, салат, перец, томат, капуста

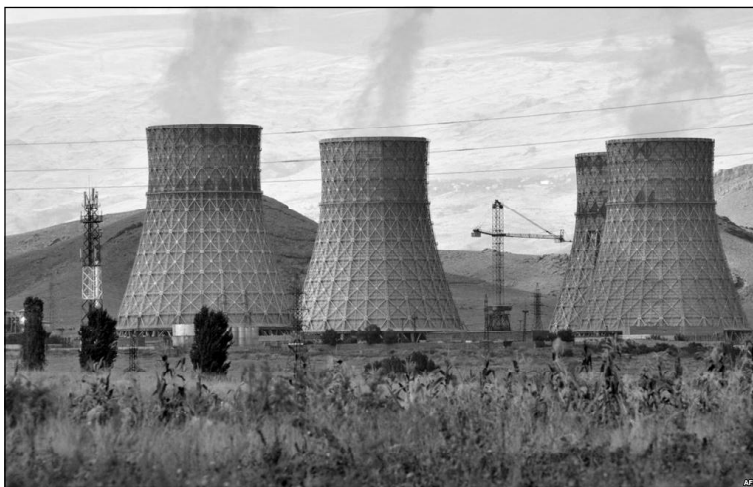


Рис. 1. Армянская атомная электрическая станция.



Рис. 2. Арагатская долина.

кочанная, лук репчатый, арбуз, капуста цветная, картофель, фасоль зеленая) варьировало для  $^{90}\text{Sr}$  в пределах 1.0-8.8,  $^{137}\text{Cs}$  – 3.5-13.1 Бк/кг. В поливной воде оно составило в среднем для  $^{90}\text{Sr}$  0.08 и  $^{137}\text{Cs}$  – 0.009 Бк/л, а в почве (0-30 см) – 8.9 и 9.8 Бк/кг соответственно. Можно полагать, что в Арагатской долине основным фактором, определяющим поступление ИРН в растения, является режим орошения (число, норма и время поливов) овощных культур. Выяснилось, что количество ИРН в почве с увеличением глубины уменьшается, а урана, наоборот, – увеличивается. Можно предположить, что количество ИРН в овощных культурах также зависит от характера распределения в почве корневых систем. Во всех овощных культурах, выращенных с использованием воды р. Мецамор на бурых почвах зоны ААЭС, содержание ИРН ниже ПДК [5].

Наши расчетные данные показали, что величина наблюдаемых отношений (НО) для пары  $^{90}\text{Sr}$ – $^{137}\text{Cs}$  варьировала в пределах 0.3-0.9 [2]. Коэффициенты накопления (КН)  $^{137}\text{Cs}$  для растений в 1.2-3.0 раза выше, чем  $^{90}\text{Sr}$ . Выявлено, что между НО и КН  $^{90}\text{Sr}$  существует сильная положительная существенная связь ( $r = 0.81 \pm 0.14$ ) и слабая отрицательная несущественная связь между НО и КН  $^{137}\text{Cs}$  ( $r = -0.30 \pm 0.23$ ) [6].

На основании приведенных данных можно заключить, что ААЭС не представляет серьезной радиоэкологической опасности для населения, живущего близ ААЭС.

Практические рекомендации: выращивать засухоустойчивые культуры, корни которых проникают в глубокие слои почвы, а также корнеплоды; исключить полив растений дождеванием и перед уборкой урожая; применять технологию закапывания загрязненного (0-30 см) слоя почвы в более глубокие слои, где отсутствует основная масса корней.

### Литература

1. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А.* и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: Изд-во АТ, 2001. 752 с.
2. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.
3. Remediation Strategies for Contaminated Territories Resulting from the Chernobul Accident: Final report /Contract B7-5200/97/000646/MAR/C3/Eds P. Jacob. S. Fesenco, S.K. Firsacova et al. GSF-Forschungszentrum, ISSN 0721. 1694, Neuherberg, 2001. 300 p.
4. *Павлоцкая Ф.И.* Методы определения  $^{90}\text{Sr}$  и других изотопов // Физико-химические методы исследования почв. М., 1966. 126 с.
5. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: ФГУП «Интер-СЭН», 2002. 168 с.
6. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М., 1985. С. 223-228.

### ACCUMULATION PECULIARITIES OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN VEGETABLE CROPS IN ARMENIAN NPP ZONE

L.M. Kalachyan, A.Z. Asatryan

Institute of Hydroponics Problems, NAS RA, Yerevan, Armenia,  
[ani199@yandex.ru](mailto:ani199@yandex.ru), [hydrop@netsys.am](mailto:hydrop@netsys.am)

Accumulation peculiarities of artificial radionuclides ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) in Armenian NPP zone in some crops (basil, parsley, celery, lettuce, pepper, tomato, cabbage, onion, watermelon, cauliflower, potato, string beans), grown in grey calcareous lands and irrigated with the water of the Metsamor River were studied. It turned out that controlled artificial radionuclide content in crops does not exceed the allowed concentration limits. Practical recommendations were made, the application of which in this region will give an opportunity to get ecologically pure agricultural products. The researches have been implemented since 2011 in the context of project 11-1f 262 of Ministry of Science of RA.

---

### ГЕОХИМИЧЕСКИЙ БАРЬЕР НА $^{90}\text{SR}$

В.А. Копейкин

Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия,  
[vkopeikin@ugtu.net](mailto:vkopeikin@ugtu.net)

В связи с работами по ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы перед автором была поставлена задача – разработать искусственный геохимический барьер на путях миграции радиоактивного  $^{90}\text{Sr}$ . Этот изотоп стронция имеет период полураспада 29.12 лет, является  $\beta$ -излучателем и независимо от формы и путей поступления его в организм накапливается, главным образом, в скелете.

В первые же месяцы после Чернобыльской аварии произошло радиационное загрязнение вод Днепра как выпавшей радиоактивной пылью, так и растворенными радионуклидами, особенно  $^{90}\text{Sr}$ . Набор первоначальных радионуклидов был весьма большой, но с течением времени их число сокращалось по мере распада.

Радиоактивный цезий ( $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ) хорошо сорбировался глинистыми грунтами (иллитами), и дальнейшей водной миграции цезия не отмечалось. В то же время миграция  $^{90}\text{Sr}$  с грунтовыми водами была весьма значительной.

Проведенные опыты по строительству защитных фильтрующих дамб из цеолитов показали довольно быстрое заполнение возможного сорбционного объема цеолита, и дамбы прекращали сорбировать нуклиды через две-три недели, превращаясь сами в радиоактивные отходы. Такие же результаты дали сорбенты практически всех типов из всех главных месторождений бывшего СССР.

Опытные работы по испытанию предложенных составов геохимического барьера проводились нами начиная с 1988 г. на грунтовых водах из вскрытого могильника с закопанным погибшим от радиации радиоактивным сосновым «рыжим» лесом в 2-3 км на юго-запад от четвертого блока ЧАЭС. Координаты этого раскопа –  $51^{\circ}23'02.4''$  с.ш. и  $30^{\circ}03'55.8''$  в.д.

Захоронение погибшей от радиации сосны производилось в 1986-1987 гг. непосредственно в выкопанные траншеи без всякого глинистого экрана. В районе наших работ грунтовые воды стоят практически у поверхности земли и воду для натуральных экспериментов мы просто черпали ведром из сделанного раскопа.

В природных условиях наиболее типичными минералами стронция являются стронцианит  $\text{SrCO}_3$  и целестин  $\text{SrSO}_4$ . Расчет условий по предотвращению миграции радиоактивного стронция был смоделирован методом физико-химического моделирования на ЭВМ по программе И.К. Карпова «Selector». Расчеты растворимости стронцианита и целестина показали, что стронцианит устойчив в щелочной среде, а для существования целестина необходимо наличие в водах сульфатов.

Чернобыльская АЭС расположена в районах Припятского Полесья, воды которого имеют кислый характер и практически бессульфатны. Поэтому искусственное создание новообразованных карбоната и сульфата стронция на путях миграции радиоактивного стронция не может дать положительного эффекта из-за отсутствия геохимической обстановки для образования этих минералов.

Известен также природный минерал апатит  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH}, \text{CO}_3)$ , который может содержать стронций, но уже в изоморфной форме, поскольку радиусы ионов  $\text{Ca}^{+2}$  и  $\text{Sr}^{+2}$  близки (0.99 и 1.12 А соответственно). Апатит вообще отличается широким изоморфным

составом как в катионной, так и в анионной части. Поэтому основная идея создания геохимического барьера на  $^{90}\text{Sr}$  заключалась в образовании непосредственно на пути миграции этого радиоактивного нуклида искусственного новообразованного апатита, в кристаллическую решетку которого и должен был бы войти радиоактивный стронций. К тому же апатит очень плохо растворим.

Для подтверждения осуществимости предложенных составов геохимического барьера нами из указанного выше раскопа отбиралось 4 л загрязненной радионуклидами воды. Весь объем делили на две равные части, в одной растворяли 4 г нитрата бария  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , в другой части – 2.174 г сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Оба раствора сливали при перемешивании, при этом выпадал осадок сульфата бария  $\text{BaSO}_4$  (барита). Вес осадка составил 3.572 г.

200 мл раствора отбирали на определение содержания радионуклидов.

Оставшиеся 3.8 л снова делили на две равные части и в первую добавляли 3.8 г нитрата бария, во вторую – 2.068 г сульфата натрия. Оба раствора сливали при перемешивании, вес выпавшего осадка составил 3.394 г. 200 мл раствора отбирали на определение содержания радионуклидов.

Оставшиеся 3.6 л снова делили на две части. В первой части растворили 3.6 г нитрата бария, а во второй – 1.957 г сульфата натрия. Оба раствора вновь сливали при перемешивании. Вес выпавшего осадка сульфата бария составил 3.215 г.

После отбора 200 мл раствора для анализа оставшиеся 3.4 л раствора снова делили на две равные части и в первой растворяли 3.4 г нитрата бария, а во второй – 1.848 г сульфата натрия. После смешивания обоих растворов вес образовавшегося осадка барита составил 3.036 г.

Таким образом, всего за время опыта нами было получено 13.217 г новообразованного сульфата бария – барита.

Полученный осадок отфильтровывался и высушивался на воздухе в течение двух месяцев, а затем проверялся на десорбцию радионуклидов из осадка во внешнюю среду. Для этого высушенный осадок новообразованного барита заливался дистиллированной водой, перемешивался и отстаивался в течение 18 месяцев.

По истечении этого срока воду над осадком анализировали на содержание радионуклидов. Вода удовлетворяла нормам ДК<sub>в</sub> (НРБ 76/87). Результаты очистки радиоактивной воды представлены в табл. 1.

Аналогичным образом нами были испытаны составы из оксида кальция и фосфата или дигидрофосфата калия, которые также использовали в виде 0.1%-ных растворов при их мольном соотношении 1 : 1. Результаты очистки воды от радионуклидов представлены в табл. 2.



Таблица 1  
Результаты очистки воды от радионуклидов сульфатным барьером

Радионуклиды	Активность исходной воды, Ки/л	Активность воды после обработки сульфатным барьером, Ки/л	Кристаллизационный захват радионуклида, %	Допустимая концентрация радионуклида в воде, Ки/л
Ce-144	$2.9 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$	97.56	$1.2 \times 10^{-8}$
Ru-106	$3.7 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$	98.3	$1.2 \times 10^{-8}$
Sr-90	$7.2 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-11}$	99.75	$4 \times 10^{-10}$
Суммарная активность $\beta$ -излучения	$\sum 1.38 \times 10^{-7}$	$\sum 2.0 \times 10^{-9}$	98.6	$\sum 2.4 \times 10^{-8}$

Таблица 2  
Результаты очистки воды от радионуклидов фосфатным барьером

Радионуклиды	Активность исходной воды, Ки/л	Активность воды после обработки фосфатным барьером, Ки/л	Кристаллизационный захват радионуклида, %	Допустимая концентрация радионуклида в воде, Ки/л
Ce-144	$2.5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$	96.0	$1.2 \times 10^{-8}$
Ru-106	$2.1 \times 10^{-8}$	$6.7 \times 10^{-10}$	96.8	$1.2 \times 10^{-8}$
Sr-90	$9.5 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-10}$	99.64	$4 \times 10^{-10}$
Суммарная активность $\beta$ -излучения	$\sum 1.41 \times 10^{-7}$	$\sum 2.01 \times 10^{-9}$	98.6	$\sum 2.4 \times 10^{-8}$

Натурные испытания геохимического фосфатного барьера проводили вблизи вышеуказанного раскопа на той же радиоактивной воде.

Испытания проводились в металлических ящиках размером 2000×500×350 мм, разделенных перегородками на восемь секций. Три перегородки (через одну) не достигали дна ящика 90 мм, три другие (также через одну) не достигали верха ящика 95 мм. Ящик на высоту 30 см засыпался местным песком, взятым из специально вырытого рядом неглубокого шурфа.

В первую секцию последовательно добавляли дигидрофосфат калия и оксид кальция, затем наливали воду из вскрытого могильника с погибшей от радиации сосной. Фильтрация воды через песок из одной секции ящика протекала медленно. В последней, восьмой секции вода показалась через 15 дней.

После появления воды соответственно во второй, четвертой и шестой секциях в нее добавлялись реагенты из расчета 0.1% -ной концентрации в растворе при мольном соотношении 1 : 1.

В последнюю, восьмую секцию поступала вода, удовлетворяющая нормам ДК<sub>Б</sub>, что показано в табл. 3.

В периоды, когда не проводилось непосредственной работы на раскопе, ящик целиком покрывали металлическим листом для предотвращения заноса пыли. Эти три ящика и сегодня находятся на месте испытаний в 30 м от раскопа.

Результаты натурных испытаний исходных составов из сульфата натрия и нитрата бария приведены в табл. 4.

Из приведенных выше данных видно, что радиоактивность воды после прохождения через защитный геохимический барьер снижается до норм допустимой концентрации радионуклидов в воде.

Проведенные лабораторные и натурные испытания составов геохимических барьеров в зоне Чернобыльской АЭС позволили нам рекомендовать как рабочий состав фосфатного геохимического барьера на <sup>90</sup>Sr, поскольку Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – исходный компонент сульфатного барьера – токсичен и взрывоопасен.

На практике вокруг пункта захоронения радиоактивных отходов (РАО) по направлению стока грунтовых вод рекомендуется пробурить в шахматном порядке четное количество рядов скважин, фронтально расположенных относительно направления миграции радионуклидов.

Таблица 3

**Натурные испытания фосфатного барьера по очистке воды от радионуклидов в ближней зоне Чернобыльской АЭС**

Радионуклиды	Активность исходной воды, Ки/л	Активность воды после обработки фосфатным барьером, Ки/л	Допустимая концентрация радионуклида в воде, Ки/л
Ce-144	$2.5 \times 10^{-8}$	Ниже чувствительности	$1.2 \times 10^{-8}$
Ru-106	$2.1 \times 10^{-8}$	$6.7 \times 10^{-10}$	$1.2 \times 10^{-8}$
Sr-90	$9.5 \times 10^{-8}$	$6.4 \times 10^{-11}$	$4 \times 10^{-10}$

Таблица 4

**Натурные испытания сульфатного барьера по очистке воды от радионуклидов в ближней зоне Чернобыльской АЭС**

Радионуклиды	Активность исходной воды, Ки/л	Активность воды после обработки сульфатным барьером, Ки/л	Допустимая концентрация радионуклида в воде, Ки/л
Ce-144	$2.5 \times 10^{-8}$	Ниже чувствительности	$1.2 \times 10^{-8}$
Ru-106	$2.1 \times 10^{-8}$	Ниже чувствительности	$1.2 \times 10^{-8}$
Sr-90	$9.5 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-11}$	$4 \times 10^{-10}$

Диаметр и глубина скважин, глубина перфорации обсадной трубы (для закачки барьерных растворов), расстояние между скважинами и от стенок пункта захоронения РАО определяются конкретными геолого-гидрогеологическими условиями. Так, для могильника РАО «Подлесный», расположенного недалеко от четвертого блока ЧАЭС (северный след выброса), предложено использовать скважины диаметром 130-150 мм и глубиной 20 м. Расстояние между скважинами должно составлять от 5 до 10 м, удаление первого ряда скважин от стенок могильника – 20-30 м. Концентрация барьерных растворов составляет 0.1%.

При наличии в районе радиоактивных вод с кислой реакцией ( $\text{pH} < 7$ ) первыми по фронту следует вводить водорастворимые соединения кальция для создания щелочной среды, в которой наиболее полно происходит образование фосфатного (апатитового) геохимического барьера, в кристаллическую решетку которого входят за счет изовалентного изоморфизма ионы  $^{90}\text{Sr}$ .

Результаты работы по созданию геохимических барьеров на путях миграции радиоактивного  $^{90}\text{Sr}$  защищены патентами Российской Федерации.

Автор проводил экспериментальные и натурные испытания предложенных составов геохимических барьеров при активном участии своих товарищей из ЦНИИгеолнеруда (г. Казань). Всем им, не один год работавшим в зоне ЧАЭС, и живым, и погибшим от радиоактивного облучения (водитель Р.Я. Марданов, научные сотрудники – кандидат географических наук А.П. Пленкин и кандидат геолого-минералогических наук В.М. Федотов), моя глубокая благодарность и признательность. Все они прекрасно понимали, где работали и чем это им грозило. Ни у кого из них не было и 10 БЭР, в том числе и у автора (за 90 черныбыльских вахт в течение 8.5 лет).

#### Литература

1. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 248 с.
2. Копейкин В.А. Поведение фосфора в процессе выветривания // ДАН СССР, 1983. Т. 268. № 2. С. 432-435.
3. Копейкин В.А. Геохимические последствия Чернобыльской катастрофы // Геохимия, 1993. № 11. С. 1510-1516.
4. Копейкин В.А. Радиоактивное загрязнение вод могильника радиоактивных отходов «Рыжий лес» ближней зоны Чернобыльской АЭС // ДАН РФ, 1996. Т. 351. № 5. С. 709-711.
5. Копейкин В.А. Накопление радионуклидов в древесине живых деревьев ближней зоны Чернобыльской АЭС // ДАН РФ, 1996. № 6. С. 841-843.
6. Копейкин В.А. Способ локализации радиоактивных загрязнений почв. Патент РФ от 09.10.92. № 180 6411.
7. Копейкин В.А. Способ локализации радиоактивных загрязнений почв и грунтовых вод. Патент РФ от 27.11.96. № 2069905.

8. *Копейкин В.А.* Биогеохимический способ обнаружения плутония на изучаемых территориях. Патент РФ от 20.09.2000 г. № 2156482.

### GEOCHEMICAL BARRIER TO $^{90}\text{Sr}$

**V.A. Kopeikin**

Uchta State Technical University, Uchta, Russia, [vkopeikin@ugtu.net](mailto:vkopeikin@ugtu.net)

Mixtures of different components are proposed and tested on radioactive waters from burials with pine woods died as a result of the Chernobyl accident. The main idea on prevention  $^{90}\text{Sr}$  water migration is based on formation of apatite (or barite) that includes the radionuclide into matrix due to isomorphism. Particular construction of the geochemical barrier surrounding radioactive waste storage cells in Chernobyl exclusion zone is supposed.

---

### ПРОБЛЕМЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕК САМСОНОВСКАЯ–ЛЕВ–ВАНДРАС НА ТЕРРИТОРИИ НЕФТЕЮГАНСКОГО РАЙОНА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

**А.В. Коржавин<sup>1</sup>, А.В. Трапезников<sup>1</sup>, В.Н. Трапезникова,  
А.П. Платаев<sup>1</sup>, Е.И. Попова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт экологии растений и животных УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Тобольская комплексная научная станция УрО РАН, Тобольск, Россия

Указанная речная экосистема расположена в южной части Ханты-Мансийского автономного округа в бассейне р. Обь. В работе представлены результаты радиоэкологических исследований воды, донных и пойменных отложений. Изучение данной экосистемы проводится регулярно на протяжении последних четырех лет, при этом масштабные радиоэкологические исследования Обь-Иртышской речной системы Отдел континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН на территории Ханты-Мансийского автономного округа осуществляет с 2004 г. Основным выводом данных работ является неопровержимый факт, что радиоэкологическая ситуация на Оби и Иртыше не стабильна. На протяжении указанного периода в воде Оби и Иртыша на территории Ханты-Мансийского автономного округа были отмечены случаи повышения объемной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  почти на порядок величин по сравнению с исходными данными 2004 г. Представленная работа является неотъемлемой частью крупномасштабных научно-мониторинговых исследований Обь-Иртышской речной системы на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры.

Таблица 1  
Содержание цезия-137, стронция-90 и плутония-239, 240 в воде рек

№ пп	Место отбора проб, река	Содержание, Бк/л		
		<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239, 240</sup> Pu
1	Самсоновская	0.0027±0.00021	0.014±0.001	(2.07±0.08)·10 <sup>-5</sup>
2	Лев	0.0034±0.00085	0.018±0.0026	(2.20±0.17)·10 <sup>-5</sup>
3	Вандрас	0.0031±0.00032	0.037±0.0015	(1.96±0.15)·10 <sup>-5</sup>
4	Демьянка	0.0015±0.0006	0.009±0.001	(1.86±0.06)·10 <sup>-5</sup>

Как показано в табл. 1, содержание <sup>137</sup>Cs в воде рек Самсоновская, Лев, Вандрас несущественно различалось и составило соответственно 2.7, 3.4 и 3.1 Бк/м<sup>3</sup>, что примерно в два раза выше, чем в воде контрольной р. Демьянка (1.5 Бк/м<sup>3</sup>). При этом наблюдается определенный градиент возрастания содержания в воде <sup>90</sup>Sr. Его концентрация возросла с 14 Бк/м<sup>3</sup> в воде р. Самсоновская до 37 в р. Вандрас, т.е. в 2.6 раза, в результате чего содержание <sup>90</sup>Sr в воде р. Вандрас было в четыре раза выше, чем в р. Демьянка. Изотопное отношение <sup>90</sup>Sr/<sup>137</sup>Cs в воде р. Самсоновская равно 5.2, в р. Лев – 5.3, а в р. Вандрас возрастает до 11.9, что вызвано разными геохимическими свойствами <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr. Известно, что <sup>137</sup>Cs, не обладая высокой миграционной активностью, быстро вступает в стойкие химические соединения в донных и пойменных отложениях, в значительной степени депонируется в последних и в очень малой степени из них вымывается. Согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [1], уровни вмешательства при содержании в воде отдельных радионуклидов составляют: <sup>137</sup>Cs – 11, <sup>90</sup>Sr – 4.9, <sup>239, 240</sup>Pu – 0.55 Бк/кг. Таким образом, содержание радионуклидов в воде указанных рек на два-три порядка величин ниже уровня вмешательства.

Плотность загрязнения пойменных почв обследованных рек представлена в табл. 2.

Фоновый уровень радионуклидного загрязнения почвенно-растительного покрова сформировался в основном за счет глобально-

Таблица 2  
Плотность загрязнения пойменных почв

№ пп	Пойменные участки рек	Плотность загрязнения, Бк/м <sup>2</sup>		
		<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>239, 240</sup> Pu
1	Самсоновская	5809	1886	27.4
2	Лев	1075	1666	15.8
3	Вандрас	1557	1849	12.08
4	Демьянка	1301	1855	8.64

го загрязнения биосферы в период массированного испытания ядерного оружия (50-60-е гг. XX в.). По данным UNSCEAR (1993), в поясе между 50 и 60° с.ш. интегральная плотность загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  с учетом радиоактивного распада составляет 1.5 кБк/м<sup>2</sup>. Соответственно, уровень содержания  $^{137}\text{Cs}$  в 1.6 раза выше – 2.4 кБк/м<sup>2</sup>. Средняя для большого периода наблюдений (с 1960 по 1971 г.) величина соотношения  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в глобальных выпадениях равна 0.6 [2]. При этом содержание радионуклидов в почвах и их соотношение может существенно различаться в зависимости от условий региона и характера антропогенных нагрузок. Так, по данным А.В. Трапезникова и др. [3], проводивших исследования в различных почвенно-климатических зонах, в зоне средней тайги (Республика Саха, Якутия), в меньшей степени испытывающей антропогенное воздействие, запас радионуклидов в 0-30-сантиметровом слое для  $^{90}\text{Sr}$  составил 1.7-3.0, для  $^{137}\text{Cs}$  – 2.3-3.7 кБк/м<sup>2</sup>, величина соотношения  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  варьировала от 1.2 до 1.5, приближаясь к таковым в глобальных выпадениях.

Пойма р. Самсоновская подвержена дополнительному радиоактивному загрязнению цезием-137 из неустановленных пока источников. Плотность запасов данного радионуклида в пойме реки составила 5809 Бк/м<sup>2</sup>, что превышает уровень глобальных выпадений и в 4.5 раза выше плотности загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$  контрольной точки – поймы р. Демьянка. Плотность загрязнения пойменных участков рек Лев и Вандрас по  $^{137}\text{Cs}$  – 1075 и 1557 Бк/м<sup>2</sup>, что сопоставимо с уровнем загрязнения поймы р. Демьянка, равным 1301 Бк/м<sup>2</sup>. Изотопное отношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в пойме Самсоновской составляло 0.3, в пойме Демьянки отношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  было равно 1.4.

Таблица 3

**Содержание техногенных радионуклидов в рыбе р. Самсоновская  
(вес пробы – 3.0 кг)**

№ пп	Вид рыбы	Повторность	Содержание, Бк/кг		
			$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{239, 240}\text{Pu}$
1	Язь	1	1.60±0.09	1.49±0.11	н.п.о.
		2	1.30±0.10	2.31±0.15	
		3	1.25±0.09	2.54±0.10	
Среднее значение (M±m)			1.38±0.09	2.10±0.12	н.п.о.
2	Окунь	1	3.30±0.16	6.18±0.29	0.80±0.11
		2	1.60±0.09	5.43±0.22	
		3	2.40±0.13	5.83±0.24	
Среднее значение (M±m)			2.43±0.12	5.81±0.25	0.80±0.11

Согласно Гигиеническим требованиям безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01) [4], содержание  $^{90}\text{Sr}$  не должно превышать 100 Бк/кг,  $^{137}\text{Cs}$  – не выше 130. Более высокое содержание  $^{137}\text{Cs}$  установлено в пробе окуня (равное 3.3 Бк/кг), выловленного в р. Самсоновская. Для сравнения, содержание  $^{137}\text{Cs}$  в пробах окуня, выловленного в Иртыше в текущем году, в среднем составило  $0.95 \pm 0.13$  Бк/кг.

Ярким примером крупномасштабного регионального загрязнения радиоактивными веществами служит сброс в р. Течу в 1949-1951 гг. порядка 100 ПБк (2.75 млн Ки) радиоактивных отходов ПО «Маяк» на Южном Урале. Часть радионуклидов транзитом прошла через р. Течу и поступила в р. Исеть, входящую, как и первая река, в Обь-Иртышскую речную систему. Другая значительная часть нуклидов была депонирована в донных отложениях рек и в пойменных почвах. Этой теме посвящено значительное число публикаций отечественных и зарубежных исследователей. Безусловно, масштабы загрязнения реки Теча по количественным показателям несравнимы с уровнем загрязнения поймы р. Самсоновская, но при этом следует отметить, что и степень изученности данной проблемы в настоящее время существенно отличается. Отсутствуют данные об оценке переноса радионуклидов по системе рек Самсоновская–Лев–Вандрас и его влияния на Обскую речную систему, что делает эту работу весьма актуальной.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта УрО РАН № 12-И-4-2045, проекта ОФИ УрО РАН №13-4-006-ЯЦ, проекта «Арктика» № 12-4-3-016.

#### Литература

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) СП 2.6.1. 758-99: Гигиенические нормативы. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009. 116 с.
2. Марей А.Н., Бархударов Р.М., Книжников В.А. и др. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека. М.: Атомиздат, 1980. 250 с.
3. Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Трапезникова В.Н. Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2007. Т. 2. 400 с.
4. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов // Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.3.2.1078-01. М., 1978. С. 13-35.

## QUESTIONS OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE OB-IRTYSH RIVER SYSTEM IN NEFTEYUGANSK DISTRICT OF THE TYUMEN REGION

A.V. Korzhavin<sup>1</sup>, A.V. Trapeznicov<sup>1</sup>, V.N. Trapeznicova<sup>1</sup>, A.P. Plataev<sup>1</sup>, E.I. Popova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Division of RAS, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Tobol'sk Complex Scientific Station, Urals Division of RAS, Tobol'sk, Russia

There are presented the results of radioecological research of the system of rivers Samsonovskaya-Lion-Vandras. It is shown that the river floodplain Samsonovskaya subject to additional radioactive contamination with cesium-137 of undetermined until sources. The density of this radionuclide in the floodplain of the river was 5809 Bq/m<sup>2</sup>, which exceeds the level of global fallout and 4.5 times higher than the density of contamination by 137Cs checkpoint – floodplain of the river Demyanka. The density of contamination of river floodplains lion and Вандрас 137Cs was 1075 Bq/m<sup>2</sup> and 1557 Bq/m<sup>2</sup>, which is comparable with the level of contamination of the Irtysh river Demyanka, equal 1301 Bq/m<sup>2</sup>.

---

## ОЦЕНКА И ДИАГНОСТИКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И СОПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ

**Г.В. Лаврентьева**

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия,  
[Lavrentyeva\\_G@list.ru](mailto:Lavrentyeva_G@list.ru)

В настоящее время в ядерно-промышленном комплексе сохраняются серьезные экологические проблемы. Особого внимания заслуживают хранилища радиоактивных отходов (РАО), введенные в эксплуатацию в 50-70-е гг. прошлого столетия, которые находятся на консервации и, как правило, не отвечают современным требованиям по обращению с РАО. В отдельных случаях наблюдается утечка радионуклидов из емкостей хранилищ, поступление их в окружающую среду, активная миграция в почве, грунтовых и поверхностных водах, накопление компонентами флоры и фауны. Подобная ситуация сложилась в бассейне р. Протва на севере Калужской области, где расположено региональное хранилище РАО, сооруженное в 50-е гг. предыдущего столетия. В период с 1998 по 1999 г. обнаружено увеличение удельной активности <sup>90</sup>Sr от десятых долей до 109 Бк/л в наблюдательных скважинах, что в дальнейшем обосновано утечкой радионуклидов из одной из емкостей хранилища, в результате чего был сформирован в геологических средах объемный нерегулируемый радиоактивный источник [1].



В настоящее время хранилище находится на стадии вывода из эксплуатации, поэтому экологическая диагностика территории размещения объекта и прилегающей территории является актуальной проблемой. Однако, несмотря на многочисленные исследования в области экологического мониторинга территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, до сих пор не существует общепринятой концепции их экологической диагностики, нет отработанной нормативно-правовой и методической базы, и даже не создан единый понятийный аппарат в этой области знаний. Данная работа посвящена комплексной экологической диагностике территории размещения проблемного хранилища РАО, включающая несколько направлений.

В 2010 г. были проведены измерения объемной активности  $^{90}\text{Sr}$  в пробах воды, отобранных посезонно из наблюдательной скважины и контролируемых водных объектов – в ручье, протекающем ниже территории хранилища, и болоте, в которых ранее была отмечена наибольшая активность радионуклида.

Объемная активность воды в пробе, отобранной из скважины, с изменением гидрологических сезонов варьирует в малом диапазоне. Значение активности  $^{90}\text{Sr}$  в грунтовой воде, равное 34 Бк/л, отмечается в период окончания зимней межени и начала снеготаяния и весенних дождей. Проба воды, отобранная 15 июня, характеризует период завершения весеннего снеготаяния. Анализ воды в этот период показал положительную тенденцию уменьшения объемной активности радионуклида, очевидно, за счет остаточного разбавления грунтовых вод дождевыми осадками. Величина активности  $^{90}\text{Sr}$  в грунтовой воде в период сухой погоды летней межени одинакова по содержанию  $^{90}\text{Sr}$  в пробе, отобранной в зимнюю межень. Незначительное повышение изучаемого показателя до 38 Бк/л в скважине наблюдается в начале периода осенних ливней, вероятно, из-за того, что в скважине фиксируется фронт осеннего стока.

Сравнение содержания радионуклидов в подземной воде с объемной активностью техногенных радионуклидов в подземных водах средней полосы европейской части России показывает, что концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в контролируемой скважине превышает допустимый уровень в 5.8-7.6 раз в разные гидрологические сезоны. В воде ручья, протекающего ниже по склону, после половодья объемная активность  $^{90}\text{Sr}$  составила 5 Бк/л. В этот же день в болоте, расположенном в долине того же ручья, активность была 1.5 Бк/л. В сезон летней межени после сухого периода активность  $^{90}\text{Sr}$  в пробе из ручья возросла до 34 Бк/л, в пробе из болота снизилась до 0.75 Бк/л. Очевидно, что дождевые осадки разбавили исходную концентрацию  $^{90}\text{Sr}$  в июне. 19 октября начались осенние дожди, которые обогатили поверхностный сток  $^{90}\text{Sr}$ , скопившимся в период сухого лета в

застойных водах траншей. Концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в воде ручья в 6.8-7.6 раз превышает уровень вмешательства для открытых водоемов (5 Бк/л) в период летней межени и осенних ливней соответственно.

На основе анализа результатов многолетнего (с 1998 по 2010 г.) мониторинга  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностных и подземных водах был построен временной тренд, показывающий, что за 12 лет мониторинга концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в водных объектах изменялась неоднократно. Однако во временной интервал, охватывающий 2005-2010 гг., радиоактивность грунтовых вод понизилась, а ее связь с метеоусловиями стала неопределенной [3].

Проведение радиоэкологической оценки состояния территории сталкивается с определенной проблемой: в настоящее время содержание техногенных радионуклидов в грунтах не нормируется действующими санитарно-законодательными документами. Поэтому, как и ряд исследователей, содержание радионуклидов в исследуемых грунтах оценивали путем сравнения с региональными фоновыми содержаниями радионуклидов в почвах 30-километровой зоны вокруг обнинских реакторов и уровнями глобальных выпадений в результате техногенных выбросов и аварии на ЧАЭС: для  $^{90}\text{Sr}$  эта величина 1.2-1.8 Бк/кг. При этом учитывался показатель удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в грунтах – 1 кБк/кг, установленный Госкорпорацией для вывода земель из сельхозоборота.

Анализ многолетних данных (2004-2012 гг.) по содержанию радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  в грунтах исследуемой территории позволил выявить ряд факторов, благоприятствующих миграции и распространению радионуклидов за пределы объекта: внутрипочвенное поступление и перемещение с почвенными водами, фиксация радионуклидов органической и глинистой фракцией почв и донных отложений, антропогенное нарушение почвенного покрова территории хранилища РАО в ходе вскрышных работ [2].

В связи со значительной неравномерностью загрязнения изучаемой территории  $^{90}\text{Sr}$  были проведены измерения удельной активности радионуклида отдельно для различных подслоев грунтов в точках пробоотбора.

На территории объекта удельная активность радионуклида распределяется относительно равномерно и не превышает значения 250 Бк/кг.

Однако за территорией хранилища РАО максимальная удельная активность  $^{90}\text{Sr}$ , достигающая 1.7 кБк/кг, зафиксирована в верхнем горизонте мощностью 2 см. В средней части профиля значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в три-восемь раз меньше. При этом стоит отметить, что радионуклид достаточно интенсивно мигрирует в более глубокие слои. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  даже на глубине 2 м достигает величины, в 80-100 раз превышающей показатель срав-

нения (1.2–1.8 Бк/кг). Такое концентрирование радионуклида может быть обусловлено некоторыми факторами: во-первых, пробы грунта в верхнем слое точек пробоотбора представляют собой иловатый суглинок, что способствует минимизации процессов миграции радионуклида из-за его активной сорбции; во-вторых, может происходить нанос илистых частиц с загрязненных участков во время паводка, а также со стоком с загрязненной территории хранилища. В следующих слоях грунтов наблюдается тенденция снижения величины активности радионуклида вплоть до равномерного распределения на глубинах 25 см и ниже. При этом площадь территории с поверхностным загрязнением  $^{90}\text{Sr}$  более 1 кБк/кг составляет 2400 м<sup>2</sup>.

Полученные результаты позволяют заключить, что аварийная ситуация на небольшом радиационно-опасном объекте может привести к образованию больших количеств очень низко активных радиоактивных отходов (ОНАО), к которым в соответствии с СП 2.6.6.2572-2010 относятся грунты рассматриваемой территории. При этом распределение ОНАО достаточно обширно по площади.

Учитывая рекомендации МКРЗ в публикации 2007 г. о необходимости обеспечить прямые доказательства защищенности живых организмов, а не только человека при разработке стратегии радиационной безопасности окружающей среды, было определено содержание Sr в компонентах биоты.

В 2010, 2011, 2012 гг. на площадке расположения хранилища и прилегающей к нему территории была произведена серия отборов не только проб почв, но и биоты. Отобраны пробы растительности – крапива двудомная (*Urtica dioica*) и живых организмов – улитка кустарниковая (*Bradybaena fruticicola fruticum*), обитавшая либо на крапиве двудомной, либо непосредственно под ней. Для образцов почвы, растительности и моллюсков проводилось радиохимическое выделение и последующее определение радиоактивности естественных и техногенных радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ).

Функциональные зависимости удельных активностей  $^{90}\text{Sr}$  в моллюсках и пробах растительности от его увеличивающейся удельной активности в почве указывают на то, что сухопутные моллюски отличаются способностью активно накапливать  $^{90}\text{Sr}$  в раковинах, что может характеризовать их как индикатор радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова.

#### **Основные выводы**

1) Аварийная ситуация на небольшом радиационно-опасном объекте может привести к образованию больших количеств очень низко активных радиоактивных отходов (ОНАО), к которым в соответствии с СП 2.6.6.2572-2010 относятся грунты рассматриваемой

территории. При этом распределение ОНАО обширно по площади (в радиусе около 50 м) и объему (на глубину более 2 м).

2) Благодаря сформировавшемуся природному геохимическому барьеру за территорией хранилища РАО, угрозы попадания радионуклидов в организм человека по пищевым цепям через сельскохозяйственную продукцию в настоящее время нет. При этом применение каких-либо дополнительных мер по предотвращению дальнейшей миграции радионуклидов на исследуемой территории реально не представляется возможным. Единственным способом снижения радиационной нагрузки на человека и окружающую среду в данной ситуации является применение контрмер, широко опробованных в чернобыльской зоне.

3) Результаты мониторинга природных вод в районе размещения хранилища РАО позволили установить наиболее динамичные периоды изменения объемной активности  $^{90}\text{Sr}$ , которым должно уделяться повышенное внимание.

#### Литература

1. *Васильева А.Н.* Эколого-техническая оценка состояния хранилища радиоактивных отходов на примере регионального объекта в бассейне реки Протва на севере Калужской области: Дис. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2007. 152 с.

2. *Лаврентьева Г.В., Козьмин Г.В.* Изучение формирования техногенной литохимической аномалии  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в районе размещения хранилища радиоактивных отходов // Сахаровские чтения 2012 года: экологические проблемы XXI века: Матер. XII Междунар. науч. конф. Минск, 2012. С. 263.

3. *Лаврентьева Г.В., Силин И.И., Козьмин Г.В.* и др. Динамика сезонного поведения  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностных и подземных водах района размещения хранилища радиоактивных отходов // Вода: химия и экология, 2012. № 12. С. 26-31.

#### ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AND DIAGNOSIS OF THE TERRITORY OF THE PLACEMENT OF RADIOACTIVE WASTE STORAGE AND ADJACENT AREAS

G.V. Lavrentyeva

Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia,  
[Lavrentyeva\\_G@list.ru](mailto:Lavrentyeva_G@list.ru)

It is shown that as a result of the natural geochemical barrier formation there is no risk for human from radionuclide migration from radioactive waste storage cell territory along the food chains including agricultural production.

## ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ НЕПТУНИЯ В ПОЧВАХ

Е.А. Лавринович, Т.А. Горяченкова, И.Е. Казинская,  
А.В. Абрамова, А.П. Новиков

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,  
Москва, Россия, [goryach@geokhi.ru](mailto:goryach@geokhi.ru)

Поведение нептуния в природных объектах слабо изучено из-за более низкой удельной радиоактивности долгоживущего  $^{237}\text{Np}$  по сравнению с изотопами Pu и Am и методических трудностей при его определении. Однако изучение распределения и форм нахождения  $^{237}\text{Np}$  в объектах окружающей среды представляет большой интерес с точки зрения радиоэкологии этого элемента, отличающегося от других трансуранов большей подвижностью в экосистемах и относительно высокой биологической доступностью для живых организмов.

Изотопы  $^{237}\text{Np}$  образуются в результате захвата нейтронов изотопами урана, а также при распаде  $^{241}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$ . С экологической точки зрения в основном интересен альфа-излучатель  $^{237}\text{Np}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 2.14 \cdot 10^6$  лет, удельная радиоактивность которого составляет 25 Бк/мкг. Изотопы Np, аналогично другим искусственным радионуклидам (РН), поступают в окружающую среду в результате испытаний ядерного оружия и ядерных взрывов, проводившихся в мирных целях, формирующих глобальные радиоактивные загрязнения, а также с выбросами и сбросами предприятий ЯТЦ.

Содержание  $^{237}\text{Np}$  в объектах окружающей среды колеблется в широких пределах. В морской воде Северного, Баренцева, Гренландского морей найдено (0.3-10.5)  $10^{-6}$  Бк/л  $^{237}\text{Np}$ , в почвах США содержание глобального  $^{237}\text{Np}$  составляет (1.2-2.2)  $\cdot 10^{-3}$  Бк/кг. В зонах воздействия предприятий ЯТЦ содержание  $^{237}\text{Np}$  существенно выше: в донных отложениях промышленных водоемов В-10 и В-11 ПО «Маяк» – 400-13300 Бк/кг; в донных отложениях р. Енисей, отобранных ниже сбросов Сибирского химического комбината, – 0.1-5.0 Бк/кг, в грунтовых водах наблюдательных скважин вокруг оз. Карачай ПО «Маяк» найдено 0.01-0.11 Бк/л  $^{237}\text{Np}$ . В некоторых почвах Японии (1985-1986 гг.) и почвах Атолла Бикини (1976 г.) содержится 1.5-5.9  $\cdot 10^{-2}$  и 1.15 Бк/кг  $^{237}\text{Np}$  соответственно. В воде Ирландского моря вблизи от сбросов завода по переработке ядерного топлива в Селлафильде содержание  $^{237}\text{Np}$  составляет 9  $\cdot 10^{-3}$  Бк/л. В зоне воздействия аварийного взрыва «Кратон-3», который был произведен в 1978 г. на берегу р. Марха (левый приток р. Виллой), содержание  $^{237}\text{Np}$  в почвах колеблется в пределах 1.5-5.0 Бк/кг.

Особенностью химии Np является сравнительно большая устойчивость в растворах в степени окисления +5 с образованием нептунаил-иона  $\text{NpO}_2^+$ , вероятно, склонного к реакциям комплексообразования и гидролиза в объектах природной среды. Из-за низкого содержания Np в природных средах диспропорционирование  $\text{Np}^{(V)}$  на  $\text{Np}^{(IV)}$  и  $\text{Np}^{(VI)}$  маловероятно. Соединения Np могут образовывать комплексы с органическими и неорганическими лигандами, гуминовыми (ГК) и фульвокислотами (ФК), входящими в состав природных объектов, таких как почвы, донные отложения, водные среды и др.

Миграция Np в экосистемах определяется преимущественно формами его поступления и нахождения в природных биогеоценозах, которые, в свою очередь, определяются ландшафтно-геохимическими свойствами и абиотическими особенностями последних.

Объектами исследования для изучения форм нахождения нептуния служили гумусовые горизонты дерново-подзолистой почвы и чернозема, отобранные в европейской части России, а также супесчаные почвы (0-10 см) территории, загрязненной в результате промышленной деятельности Кирово-Чепецкого химического комбината (КЧХК). В растертые в ступке и пропущенные через сито с диаметром пор 1 мм воздушно-сухие почвы в лабораторных условиях был внесен раствор  $^{237}\text{Np}$  в минимальном объеме. Почвы тщательно перемешивали в течение длительного времени и выдерживали в воздушно-сухом состоянии. Для сравнения в работе приведены результаты изучения форм нахождения  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в тех же почвах. Содержание органического углерода в почвах уменьшается в ряду: чернозем (68.9 мг/г) > дерново-подзолистая (34.3) > супесчаная (23.9).

Для изучения форм нахождения  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  использовали общепринятые в почвоведении методы. Подвижные и кислоторастворимые формы РН определяли методом последовательной обработки почв дистиллированной  $\text{H}_2\text{O}$  (водорастворимая форма), 1М  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , рН = 4.8 (обменная и легкорастворимая формы), 1М  $\text{HCl}$  (подвижная форма) и 6М  $\text{HCl}$  (кислоторастворимая форма). Распределение Np по группам и фракциям органического вещества почв изучали после их декальцирования по методу Д.С. Орлова.

Определение  $^{237}\text{Np}$  в почвах и вытяжках проводили люминесцентным методом с использованием кристаллофосфоров. Стандартная методика люминесцентного определения  $^{237}\text{Np}$ , разработанная в ГЕОХИ РАН, включает нанесение анализируемого раствора на помещенную в кварцевый тигель основу кристаллофосфора; высушивание и последующее прокаливание образца в тигле при  $900^\circ$ , изменение интенсивности люминесценции на люминесцентном фильтровом фотометре.

В результате эксперимента было установлено, что тип почвы существенно влияет на распределение РН по формам их нахождения. Так, содержание  $^{237}\text{Np}$  в водорастворимой форме уменьшается в зависимости от увеличения содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  в образцах: супесчаная почва (56.7%) > дерново-подзолистая (37.6) > чернозем (7.4). По сравнению с Np содержание Pu и Am в водной вытяжке значительно ниже и составляет 0.2-2.1% от содержания их в почвах. В труднорастворимых формах чернозема найдено более высокое содержание РН по сравнению с супесчаной и дерново-подзолистой почвами, что связано с аккумулятивной и протекторной функциями гумусовых кислот, входящих в состав органического вещества этой почвы. В черноземе Np распределяется достаточно равномерно между обменной и кислоторастворимыми формами, в целом на их долю приходится 86.8% Np, это, по всей вероятности, указывает на роль специфических по своему составу и свойствам гумусовых кислот чернозема, которые способствуют снижению миграционной подвижности Np.

Аналогично другим РН Np связан со всеми группами и фракциями органического вещества почв (см. таблицу).

Содержание РН в группе ФК изменяется в порядке убывания независимо от типа почв и составляет для дерново-подзолистой почвы: Np (90.3%) > Am (85.7) > Pu (23.0), для чернозема: Np (71.0%) > Am (42.0) > Pu (7.8). В группе ФК 99.6% Np в дерново-подзолистой почве и 89.7% в черноземе найдено в сумме фракции 1а (декальцинат, в составе которого находятся фульво- и неспецифические низкомолекулярные органические кислоты, свободные и связанные с подвижными  $\text{R}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  и другими элементами, а также легкорастворимые неорганические соединения) и фракции 1 (ФК и низко-

Содержание  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$   
в группах и фракциях органического вещества в почвах

Элемент	Гуминовые кислоты, фракции				Фульвокислоты, фракции					Остаток
	1	2	3	Сумма	1а	1	2	3	Сумма	
Дерново-подзолистая										
$^{237}\text{Np}$	8.1/94.2	0.1/1.1	0.4/4.7	8.6/100	57.5/63.7	32.4/35.9	н/о	0.4/0.4	90.3/100	1.0
$^{239}\text{Pu}$	17.3/45.5	12.7/33.5	8.0/21.0	38.0/100	3.7/16.1	8.4/36.5	3.4/14.8	7.5/32.6	23.0/100	49.0
$^{241}\text{Am}$	4.0/100	н/о	н/о	4.0/100	57.7/67.3	27.0/31.5	н/о	1.0/1.2	85.7/100	10.3
Чернозем										
$^{237}\text{Np}$	7.5/40.1	5.6/30.0	5.6/29.9	18.7/100	39.4/55.5	24.3/34.2	5.6/7.9	1.7/2.4	71.0/100	10.3
$^{239}\text{Pu}$	2.4/9.2	18.8/71.8	5.0/19.0	26.2/100	0.4/5.1	1.2/15.4	2.7/34.6	3.5/44.9	7.8/100	66.0
$^{241}\text{Am}$	6.8/18.5	21.5/58.4	8.5/23.1	36.8/100	15.3/36.4	2.7/6.4	23.0/54.8	1.0/2.4	42.0/100	21.2

Примечание. В числителе – процент удельной активности в почве, в знаменателе – во фракциях гумусовых кислот.

молекулярные органические кислоты, свободные и связанные преимущественно с подвижными  $R_2O_3 \cdot nH_2O$  и другими элементами). В группе ГК, выделенной из чернозема, содержание Np выше, чем в ГК серовато-подзолистой почвы (18.7 и 8.6% от содержания в почвах соответственно), что указывает на роль  $C_{орг}$  почв.

В результате эксперимента установлено, что определяющую роль в миграции  $^{237}Np$  играют подвижные почвенные низкомолекулярные неспецифические органические вещества разной природы, а также фульвокислоты, связанные по различным механизмам с минеральными компонентами почв. На это указывает высокое содержание  $^{237}Np$  в водорастворимой и обменной формах, а также во фракциях 1a и 1 группы ФК. Невысокое содержание Np в группе ГК почв указывает на достаточно низкую вероятность образования органоминеральных комплексов этого элемента с высокомолекулярными ассоциациями ГК. Из литературных источников известно, что химические элементы поступают в растения через корни не только в ионной форме, но и в составе относительно низкомолекулярных органоминеральных соединений, поэтому можно ожидать, что для растений коэффициенты биологического накопления Np будут достаточно высокими.

Полученные данные по формам нахождения  $^{237}Np$  и других РН показали, что физико-химические свойства природной среды (климатические условия; тип почв, их механический и химический составы; содержание, состав и свойства органического вещества и другие природные факторы), а также химические свойства самих РН определяют их поведение в почвах, что, в свою очередь, должно быть учтено при разработке мероприятий по дезактивации загрязненных РН территорий.

## FORMS OF THE NEPTUNIUM IN SOILS

E.A. Lavrinovich, T.A. Goryachenkova, I.E. Kazinskaya,  
A.V. Abramova, A.P. Novikov.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian  
Academy of Sciences, Moscow, Russia, [goryach@geokhi.ru](mailto:goryach@geokhi.ru)

It was established that in soils the content of neptunium in water-soluble and exchange forms depended on the type soils and decreased in the sandy loom soil > sod- podzolic > chernozem. The neptunium content in more mobile forms decreased while the content of organic carbon in soils increased. The main quantity of neptunium in soils communicates with the group of fulvic acids (FA) and composes for sod-podzolic soil and chernozem – 90.3% and 71.0% from the radionuclide content respectively.



## МИГРАЦИЯ ПРИРОДНОГО РАДИОНУКЛИДА ПОЛОНИЯ-210 В ЭКОСИСТЕМЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Г.Е. Лазоренко

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского НАНУ,  
Севастополь, Украина, [g.e.lazorenko@gmail.com](mailto:g.e.lazorenko@gmail.com)

Поведение химических элементов и их радиоактивных изотопов в морской среде зависит от ее окислительных и восстановительных свойств, регулирующих вместе с гидрологическими и гидрофизическими процессами их потоки в донные отложения, пространственное распределение в которых позволяет оценивать суммарное взаимодействие факторов, влияющих на их транспорт. Наиболее зависимыми от изменяющихся условий морской среды являются поливалентные элементы, в том числе полоний, семь естественных изотопов которого входят в состав трех основных радиоактивных рядов  $^{238}\text{U}$ – $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Среди природных изотопов полония наибольшее внимание уделяют исследованию  $^{210}\text{Po}$  в морских экосистемах, так как этот изотоп характеризуется самым большим периодом полураспада (138.4 сут.), высокой энергией излучения его альфа-частиц (5.305 МэВ), одними из самых высоких значений дозового конверсионного фактора и высокими уровнями аккумуляции биотой [1].

Основной природный источник поступления  $^{210}\text{Po}$  в морскую среду – атмосферные осадки. К техногенным источникам загрязнения этим радионуклидом воздушного пространства и морской среды относятся отрасли химической промышленности, связанные с добычей и переработкой руд, содержащих уран, торий, фосфор и редкоземельные элементы, а также нефти и газа. В морской воде  $^{210}\text{Po}$  связывается растворенным и взвешенным органическим веществом (ВОВ), а его аккумулятивное фитопланктоном и мелкими зоопланктонными организмами, продуктами их метаболического обмена позволяет применять этот радионуклид в качестве трассера их потоков на дно моря [2, 3]. Перспективность использования  $^{210}\text{Po}$  в качестве трассера биогеохимических и гидрофизических процессов в морях и океанах продемонстрирована в работе [2].

Среди морских регионов наиболее интересным объектом для изучения миграции радионуклидов разного происхождения является Черное море, благодаря наличию в нем самой большой в мире сероводородной зоны [4] и определением его как самого крупного на Земле метанового водоема [5].

В наших исследованиях для оценки потоков  $^{210}\text{Po}$  в донные отложения Черного моря использовали его концентрации в субстратах и скорости осадконакопления взвешенного органического вещества.

Выделение  $^{210}\text{Po}$  из образцов проводили в соответствии с радиохимической методикой [6]. Трассером служил изотоп  $^{208}\text{Po}$  (производство компании АЕА Technology, Великобритания) с периодом полураспада 2.898 г. и энергией альфа-частиц 5.114 МэВ. Изотопы полония осаждались на серебряные диски, а их измерение проводили на альфа-спектрометре фирмы EG&G ORTEC ОСТКТК РС (США). Калибрование энергетических спектров и определение эффективности детекторов выполняли с использованием стандартов, регулярно поверяемых в метрологическом центре г. Харьков. Суммарный счет количества импульсов в области энергий изотопов полония происходит автоматически с помощью программы MAESTRO™ II, модель А64-В1 фирмы EG&G ORTEC. Результаты измерений обрабатывали статистически [7], ошибка определения не превышала 10% от средней величины, рассчитанной для каждой группы данных. Концентрации  $^{210}\text{Po}$  в исследованных пробах приведены в Бк·кг<sup>-1</sup> сухой массы.

Нами установлено, что диапазон концентраций  $^{210}\text{Po}$  в поверхностном (0-1 см) слое донных отложений Черного моря составил 11.3-496.5 Бк·кг<sup>-1</sup> сухой массы для северо-западной и 4.5-240.5 – для восточной частей акватории, что обусловлено разными скоростями оседания на дно этого радионуклида, ассоциированного с органическим веществом [8]. Показано, что величины потоков  $^{210}\text{Po}$  (F) с поверхности моря на его дно зависят от скоростей осадконакопления (x) (рис. 1, 2) [8, 9].

Кривые, представленные на рис. 1, 2, имели экспоненциальный вид и описывались уравнением  $F = ae^{bx}$ , где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, характеризующие количественный и качественный состав взвешенного вещества. Величина  $a$  в уравнении количественно оценивает общее содержание взвешенного вещества,  $b$  – содержание биогенной составляющей в пробе.

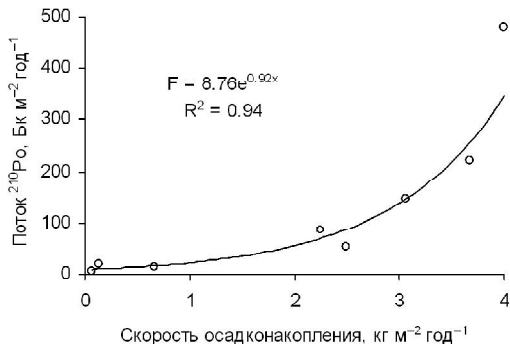
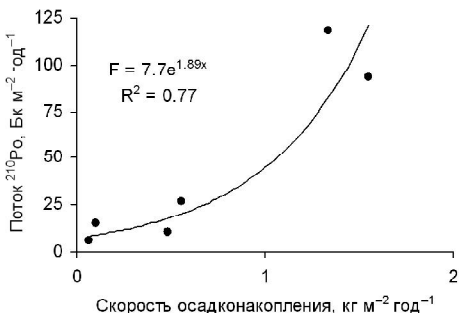


Рис. 1. Зависимость потока  $^{210}\text{Po}$  в донные отложения от скорости осадконакопления.

Рис. 2. Зависимость потоков  $^{210}\text{Po}$  в донные отложения от скорости накопления биогенной составляющей взвешенного вещества.



## Выводы

1. Оценены потоки  $^{210}\text{Po}$  в донные отложения Черного моря.

2. Зависимость потоков  $^{210}\text{Po}$  от скоростей осадконакопления позволяет оценивать количественный и качественный состав органического вещества, аккумулированного в донных отложениях Черного моря.

3. Полученные данные свидетельствуют об индикаторных свойствах  $^{210}\text{Po}$  при изучении распределения биогенного вещества, оседающего в донные отложения Черного моря.

## Литература

1. *Cherry R.D., Fowler S.W., Beasley T.M., Heyraud M.* Polonium-210: Its vertical oceanic transport by zooplankton metabolic activity // *Mar. Chem.*, 1975. Vol. 3. Iss. 2. P. 105-110.

2. *Rutgers van der Loeff M.M., Geiber W.* U- and Th-series nuclides as tracers of particle dynamics, scavenging and biogeochemical cycles in the oceans // *U-Th series nuclides in aquatic systems*. Amsterdam: Elsevier, 2008. Chapter 7. P. 227-268.

3. *Stewart G.M., Cochran J.K., Xue J. et al.* Exploring the connection between Po-210 and organic matter in the northwestern Mediterranean // *Deep-Sea Res.*, 2007. Vol. 54. P. 415-427.

4. *Скопинцев Б.А.* Формирование современного химического состава вод Черного моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 336 с.

5. *Лешн А.Ю., Иванов М.И.* Крупнейший на Земле метановый водоем // *Природа*, 2005. № 2. С. 19-26.

6. *Chen Q., Aarkrog A., Nielsen S.P., Dahlgaard H.* Procedures for determination of  $^{239}, ^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{234}, ^{238}\text{U}$ ,  $^{228}, ^{230}, ^{232}\text{Th}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ - $^{210}\text{Po}$  in environmental materials // *Riso National Laboratory (Roskilde (Denmark), December 2001): Pitney Bowes Management Services, Denmark A/S, 2001. Riso-R-1263(EN). 34 p.*

7. *Mayer K.* Basics and essentials of statistics // *IAEA Regional advanced training course on quality management in environmental applications of nuclear analytical techniques*. Karlsruhe: Center for Advanced Technological and Environmental Training (FTU), 1999. 320 p.

8. *Лазоренко Г.Е.* Распределение природного радионуклида  $^{210}\text{Po}$  в компонентах экосистемы Черного моря // *Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 311-337.

9. Лазоренко Г.Е., Гулин С.Б., Егоров В.Н. и др. Оценка потоков природного радионуклида  $^{210}\text{Po}$  в донные отложения Черного моря // Наукові праці: науково-методичний журнал «Техногенна безпека», 2013. Вип. 198, Т. 210. С. 84-88.

#### MIGRATION OF NATURAL RADIONUCLIDE POLONIUM-210 IN THE BLACK SEA ECOSYSTEM

G.E. Lazorenko

The Institute of Biology of the Southern Seas of NAS of Ukraine, Sevastopol,  
Ukraine, [g.e.lazorenko@gmail.com](mailto:g.e.lazorenko@gmail.com)

The flows of natural radionuclide  $^{210}\text{Po}$  from the surface to bottom sediments of the Black Sea were evaluated. They depend on mass accumulation rates as total suspended matter and its biogenic component. It was shown that  $^{210}\text{Po}$  might be used as an indicator of quality of organic matter in marine environment.

#### СОВРЕМЕННОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (РАО)

А.В. Пастухов, И.И. Шуктомова

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[alpast@mail.ru](mailto:alpast@mail.ru)

С 1931 по 1957 г. в пос. Водный Республики Коми действовал один из самых крупных заводов по добыче радия из подземных высокоминерализованных вод, а также привозной отработанной урановой руды. По технологии производства радия, помимо отработанной воды, образовывались два типа твердых РАО: «черные отвалы» – при получении радионуклида из пластовых вод, и «красные отвалы» – при выделении радия из урановой руды. Эти отходы стихийно сбрасывали в течение 25 лет на заболоченный берег р. Ухта. Фактически хранилище находится на пойме и первой надпойменной террасе р. Ухта и представляет собой свалку радиоактивных отходов, которую дезактивировали насыпным методом в 1962 г. Через территорию хранилища протекают два ручья, загрязняя р. Ухта радионуклидами. В 1960 г. активность воды в этих ручьях составляла 111 Бк/л, отчего содержание радия в р. Ухта в районе хранилища увеличилось до 2.85 Бк/л [3], что в 5.8 раз превышает ныне действующие санитарные нормативы (НРБ-99/2009) [5].

Исследования включали в себя заложение регулярной сети почвенных прикопок и разрезов с шагом 20 м в пределах ключевого участка хранилища РАО с отбором почвенных образцов.

Для изучения миграции радионуклидов с поверхностными и грунтовыми водами отбирали пробы воды из устьев ручьев, протекающих по территории участка и впадающих в р. Ухта, из самой реки и семи наблюдательных скважин, расположенных на территории хранилища и за его пределами.

Для изучения потенциальной подвижности радионуклидов в окружающей среде исследовали их формы нахождения в почвах методом последовательных вытяжек: для определения водорастворимой формы использовали  $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист.}}$ , обменной –  $1\text{M NH}_4\text{Ac}$ , кислоторастворимой –  $1\text{M HCl}$ . Уран в пробах определяли люминесцентным [2], радий – эманационным [6] методами.

Почвенный покров хранилища представлен болотно-подзолистыми и аллювиальными почвами, не затронутыми хозяйственной деятельностью человека, природными химически загрязненными, а также техногенными почвами, имеющими механическое и химическое загрязнение – эмбриоземами (см. таблицу). Радиационный фон на участке в настоящее время достигает  $35 \text{ мкЗв/ч}$  [7].

#### Систематический список почв участка хранилища радиевых отходов в пос. Водный

Группы, типы, подтипы почв	Индекс
Природные почвы	
1. Болотно-подзолистые почвы: торфянисто-подзолистые глееватые	Пб,
2. Аллювиальные дерновые	Ад
3. Аллювиальные дерново-глеевые	Адг
4. Аллювиальные болотные	Аб
Природные химически загрязненные почвы	
5. Аллювиальные дерновые химически загрязненные	Ад_х
6. Аллювиальные болотные химически загрязненные	Аб_х
Молодые почвы на техногенных грунтах – эмбриоземы	
Формируются на нетоксичных природных насыпных минеральных грунтах:	
7. Эмбриоземы дерновые литостраты	ЭДл
8. Эмбриоземы торфянистые литостраты	ЭТл
Формируются на нетоксичных искусственных материалах промышленного и урбаногенного происхождения:	
9. Эмбриоземы дерновые индустраты	ЭДи
Формируются на токсичных природных насыпных минеральных грунтах:	
10. Эмбриоземы дерновые токсилитостраты	ЭДтл
11. Эмбриоземы торфянистые токсилитостраты	ЭТтл
12. Эмбриоземы оподзоленные токсилитостраты	ЭПтл
Формируются на токсичных искусственных материалах промышленного и урбаногенного происхождения:	
13. Эмбриоземы дерновые токсиндустраты	ЭДи

Природные почвы на территории хранилища сохранились только на пойме и первой надпойменной террасе, тогда как на второй надпойменной террасе находятся техногенные почвы. За прошедшие 50 лет с момента проведения дезактивационных мероприятий эти почвы имеют слабо развитые горизонты – дерновый, торфянистый, подзолистый.

Все описанные природные почвы сформированы на песчаных породах, подстилаемых средними суглинками, обладают низкой емкостью поглощения и слабой устойчивостью к загрязнению различными поллютантами.

На подчиненных участках рельефа – подножие и склон второй надпойменной террасы, а также полосы стока ручьев, почвы в течение более 40 лет подвергались загрязнению отходами радиевого производства, тем более что основные запасы радиевых отходов сконцентрированы на второй надпойменной террасе. По технологии производства радий в отходах частично оставался в виде растворимого хлорида –  $Ba(Ra)Cl_2$ . При длительном воздействии атмосферных осадков, ветра, грунтовых и паводковых вод попавшие в окружающую среду отходы радиевого производства подвергались физическому и химическому выветриванию. При этом находящийся в форме легкорастворимого хлорида радий мигрировал в более низкие области хранилища [4].

Химически загрязненные почвы – почвы с естественным профилем, но высокими концентрациями загрязнителя (радионуклидами), которые по принятым нормативам оцениваются как чрезвычайно опасные. Для диагностики почв применяются методы геоботанической биоиндикации по косвенным признакам, например, изменению проективного покрытия по сравнению с фоновым участком, выпадению отдельных видов, развитию фитопатологических отклонений, изменениям в лесной подстилке и опаде [1]. Диагностика подтверждается аналитическими методами.

Радиоактивные отвалы, перекрытые слоем песка и/или строительного мусора, в основном находятся на второй надпойменной террасе. С 1956 г., с момента прекращения производства, данная территория заросла сосново-березовым лесом и луговой растительностью, а почвы прошли начальную стадию почвообразования и к настоящему времени имеют маломощный, но достаточно выраженный профиль, характерный для зональных почв. Формируются аккумулятивные маломощные почвы с профилем O-(E)-C – эмбриоземы. Эмбриоземы имеют органогенный слабо развитый верхний горизонт (дерновый или торфянистый) мощностью менее 5 см. Под лесной растительностью может выделяться маломощный (1-3 см) подзолистый горизонт. Нижние слои-горизонты представлены в них системой различных насыпных слоев песка, строительного мусора

или непосредственно «черные» или «красные» отвалы. Механизмом преобразования породы в эмбриоземы выступает минерализация и трансформация органического вещества микробиологическими процессами, а неполное развитие эмбриоземов обусловлено недостаточной продолжительностью педогенного преобразования материнской породы. И хотя процессы синтеза и разрушения органического вещества и его взаимодействия с минеральным субстратом проходят в эмбриоземах в течение короткого времени, техногенные почвенные образования постепенно начинают приобретать вид природных почв.

В настоящее время удельная активность урана и радия в воде из ручьев, протекающих по территории хранилища, укладывается в нормативы, определяемые нормами радиационной безопасности [1]. Удельная активность радия достигала уровня вмешательства (УВ) при отборе воды в мае. Во время этого же отбора наблюдали максимальную концентрацию  $^{238}\text{U}$  в воде. В среднем за весь период наблюдений содержания урана и радия в пробах воды поверхностных водоемов составили  $0.17 \pm 0.05$  и  $0.20 \pm 0.03$  Бк/л.

Для исследования миграции радия с изучаемого участка было проведено измерение удельной активности радия в воде и донных осадках р. Ухта. В результате выявлено, что концентрация радионуклида в пробах не превышает значений, определяемых НРБ-99/2009, хотя наблюдалась разница в удельных активностях радия в пробах воды и донных отложений, отобранных выше и ниже по течению. Таким образом, хранилище РАО оказывает негативное влияние, загрязняя радием р. Ухта.

Важной миграционной характеристикой радионуклида, определяющей его поступление в грунтовые и поверхностные воды из мест локализации, является его подвижность в окружающей среде. Как показали результаты, в настоящее время радий в радиоактивных отходах большей частью находится в фиксированном состоянии. В черных отвалах на долю прочносвязанных соединений радионуклида приходится 62-96% его валового содержания, в красных отвалах – 72-87%. На водорастворимую и обменную фракции в обоих типах отвалов приходится <1% его общего содержания.

Таким образом, за прошедшие 50 лет с момента закрытия производства радиоактивность отходов значительно уменьшилась, однако существующее хранилище РАО продолжает оказывать негативное влияние на окружающую природную среду. На территории хранилища в настоящее время формируются аккумулятивные маломощные почвы-эмбриоземы, обладающие слабой устойчивостью к загрязнению различными поллютантами. Наблюдается повышение концентрации радионуклидов в поверхностных и грунтовых водах хранилища, особенно в период паводков. Полученные резуль-

таты в совокупности с данными предыдущих лет о содержании радия и урана в воде и почве свидетельствуют о выносе радионуклидов с территории хранилища РАО и их рассеянии в окружающей среде.

Работа получила целевую поддержку в рамках проекта 12-С-4-1008 «Сравнительный анализ влияния радиоактивного загрязнения воды крупных рек Сибири и Урала на качество питьевой воды населенных пунктов: мониторинг и биондикация».

### Литература

1. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Учебное пособие / Под ред. Г.В. Добровольского. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
2. Добролюбская Т.С. Люминесцентный метод / Аналитическая химия урана. М.: Наука, 1962. С. 143-165.
3. Кичигин А.И., Таскаев А.И. «Водный промысел»: история производства радия в Республике Коми (1931–1956 гг.) // Вопросы истории естествознания и техники, 2004. № 4. С. 3-30.
4. Носкова Л.М., Шуктомова И.И. Оценка запасов радия на территории хвостохранилища бывшего радиевого промысла // Геохимия биосферы: Докл. Междунар. науч. конф. (Москва, 15-18 ноября 2006). Смоленск: Ойкумена, 2006. С. 267-270.
5. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
6. Старик И.Е. Основы радиохимии. Л.: Наука, 1969. 247 с.
7. Шуктомова И.И., Носкова Л.М. Распределение  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  на территории хранения отходов радиевого производства // Радиохимия, 2006. Т. 48. № 2. С. 533-537.

## ENVIRONMENTAL CURRENT STATUS OF RADWASTE TAILING POND

A.V. Pastukhov, I.I. Shuktomova

Institute of biology Komi SC UD RAS, Syktyvkar, Russia, [alpast@mail.ru](mailto:alpast@mail.ru)

The monitoring results of the of the existing radwaste tailing on the environment are revealed. The radwaste has significantly decreased over the past 50 years from the closing of Radium production. The embryozems – accumulative thin soils develop on the tailing area. They have weak resistance to contamination by various pollutants. Increase in the concentration of radionuclides in surface and groundwater is observed, especially during floods. The results on the content of Uranium and Radium in water and soil, combined with data from previous years, suggest removal and dispersion of radionuclides outside the radwaste tailing to the environment.



## ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИХТИОФАУНЫ ПРЭСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ РОССИИ И УКРАИНЫ

Н.И. Полякова, Л.А. Пельгунова

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,  
Москва, Россия, [polyakova.nat@mail.ru](mailto:polyakova.nat@mail.ru)

До настоящего времени существуют водоемы с высокой удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в гидробионтах, в частности, рыбах, являющихся одним из основных источников поступления радионуклида по пищевым цепям к человеку. В результате многочисленных исследований выявлена высокая удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в тканях рыб водоемов России, Украины и Белоруссии [1, 2, 5].

Настоящая работа посвящена анализу данных радиоэкологического мониторинга водоемов России и Украины, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Особое внимание уделялось исследованиям радиационного загрязнения ихтиофауны оз. Кожановское (Россия) и Киевского водохранилища (Украина).

После аварии на ЧАЭС оз. Кожановское является одним из наиболее загрязненных радионуклидами озер России [1, 3, 6]. Загрязнение озера и его водосборного бассейна произошло в 1986 г. вследствие осаждения радиоактивных аэрозолей, выброшенных в атмосферу в результате Чернобыльской аварии. В озере были обнаружены высокие уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в воде (9-15 Бк/л в 1992-1993 гг.), сравнимые с уровнями загрязнения озер в 10-километровой зоне Чернобыльской АЭС [1, 3]. Оценка радиационного загрязнения ихтиофауны Киевского водохранилища проводилась для северной части водохранилища на границе 30-километровой зоны ЧАЭС у пос. Страхолесье. Данный участок является местом повышенного накопления радионуклидов, выносимых р. Припять.

В качестве модельных объектов для исследований были выбраны виды рыб, относящиеся к разным трофическим уровням: щука (*Esox lucius*), судак (*Sander lucioperca*), плотва (*Rutilus rutilus*), линь (*Tinca tinca*), серебряный карась (*Carassius auratus gibelio*), золотой карась (*Carassius carassius*), густера (*Blicca bjoekna*), красноперка (*Scardinius erythrophthalmus*) и лещ (*Abramis brama*).

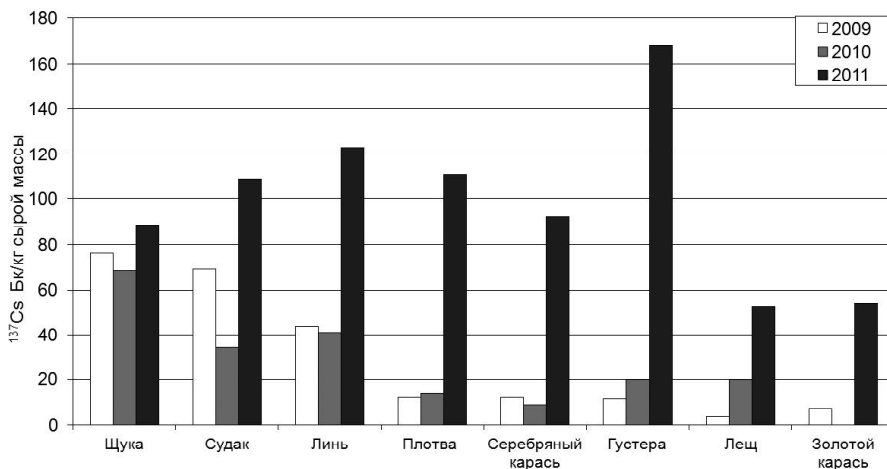
Для радиоспектрометрического анализа проб рыб использовали гамма спектрометрическую установку DSPec-jr-3.0 ORTEK (АМЕТЕК, США). Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  рассчитывали в Бк/кг сырой массы (с.м.) мышц. Погрешность определения  $^{137}\text{Cs}$  составляла  $\pm 5\%$ . Биологический анализ рыб проводили по общепринятым в ихтиологии методикам.

По данным 2004 г. установлено, что у основных видов рыб оз. Кожановское удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в послеварийный период

снизилась, но остается на высоком уровне. В частности, максимальные уровни загрязнения рыб, отмеченные в северной части Киевского водохранилища в 2004 г., были в 89 раз ниже максимальных показателей у рыб оз. Кожановское, а именно у хищных видов: щуки и окуня. Так, в мышцах окуня удельная активность цезия достигала 16040 Бк/кг с.м. Среди мирных видов рыб удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  была ниже и составляла у отдельных особей плотвы 5360 Бк/кг с.м., что в два раза выше максимальных показателей у этого вида из пруда-охладителя ЧАЭС. К 2009 г. средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  у плотвы в этом водоеме снизилась в среднем до 1892 Бк/кг с.м. при максимуме 3981 Бк/кг с.м., что в 30 раз выше установленного предельно-допустимого уровня. Сходный характер в накоплении выявлен и у других видов. Так, удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах леща была сравнима с уровнем загрязнения в 1998 г. и составила по данным 2009 г. в среднем 1478 Бк/кг с.м. при максимуме 3351.

В ходе исследований установлен относительно низкий уровень удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах рыб из оз. Круглое, расположенного в 3 км от оз. Кожановское. Средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в тканях рыб III (высшего) трофического уровня (окунь) из этого водоема, по данным 2004 г., составляла 210 Бк/кг с.м., а у рыб II трофического уровня (серебряный и золотой караси) варьировала в пределах от 29 до 49 Бк/кг с.м.

Радиоэкологический мониторинг Киевского водохранилища показал, что удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в тканях рыб исследуемого водоема в послеаварийный период существенно снизилась. Исключение составили 1996 и 1999 гг., когда произошло значительное вторичное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  у рыб и других гидробионтов водохранилища [5]. У щуки показатели удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  к 2004 г. уменьшились в 20 раз и составили в среднем 87 Бк/кг с.м. [4]. Более низкие показатели удельной активности радионуклида отмечались у особей «мирных» видов рыб. Так, в мышцах линя показатели  $^{137}\text{Cs}$  в среднем были на уровне 83 Бк/кг с.м., плотвы – 53, красноперки – 48. К 2007 г. удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в тканях рыб продолжала снижаться и регистрировалась в диапазоне 32-142 Бк/кг с.м., при этом максимальные уровни отмечались у крупных окуней, питающихся преимущественно рыбными объектами. В этот период установлены большие внутривидовые различия между максимальными и минимальными значениями  $^{137}\text{Cs}$ . Максимальная разница в накоплении отмечалась у хищных видов рыб (окунь, щука) и линя. При проведении радиоэкологических работ на Киевском водохранилище в 2011 г. установлен факт вторичного увеличения (от 1,5 до 10 раз) удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в организме промысловых видов рыб по сравнению с показателями 2009 и 2010 гг. (см. рисунок).



Средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг с.м.) в мышцах рыб Киевского водохранилища (пос. Страховское) (по материалам 2009-2011 гг.).

В результате этого процесса загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  мышечной ткани у некоторых промысловых видов рыб превысило ПДУ, т.е. 130 Бк/кг с.м. Максимальные показатели загрязнения были отмечены у «мирных» видов рыб – густеры (168 Бк/кг с.м.), линя (127.6) и плотвы (112.9), минимальные – в мышцах леща (55.6 Бк/кг с.м.) и золотого карася (53.6). У хищных видов рыб отмечено менее интенсивное увеличение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах. Так, у щуки показатели  $^{137}\text{Cs}$  увеличились с 2010 г. в 1.5 раза – в среднем до 88.6 Бк/кг с.м., у судака – в три: до 108 при максимуме 125.6 Бк/кг с.м. и минимуме – 92.2. По данным исследований, проведенных в весенне-летний период 2013 г., удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах рыб не превысила 74.1 Бк/кг с.м.

В целом, полученные результаты радиологических исследований свидетельствуют о неустойчивом балансе радионуклидов в водных экосистемах в районе следа Чернобыльской аварии. За период, прошедший с момента аварии, у всех видов рыб удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  снижалась. Результаты проведенных исследований ихтиофауны оз. Кожановское показали, что снижение удельной активности в тканях рыб в этом водоеме происходит более медленными темпами. Учитывая, что допустимая норма удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  для рыбной продукции в России составляет 130 Бк/кг с.м. (НРБ-99), можно предположить, что для таких бессточных озер, как оз. Кожановское, очищение рыб до предельно допустимого уровня произойдет только через несколько десятилетий.

### Литература

1. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Бовкун Л.А. и др. Загрязнение цезием-137 и стронцием-90 водных объектов Российской Федерации в зоне влияния аварийного выброса ЧАЭС // Метеорология и гидрология, 1996. № 4. С. 18-24.
2. Кудельский А.В., Смит Дж.Т., Хаддеринг Р.Х. и др. Последствия Чернобыльской катастрофы: накопление  $^{137}\text{Cs}$  рыбами, населяющими озера, расположенные на загрязненных территориях Беларуси // Фундаментальные и прикладные аспекты радиобиологии: биологические эффекты малых доз и радиоактивное загрязнение среды: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Минск, 1998. С. 138.
3. Крышев А.И., Рябов И.Н. Модель расчета загрязнения рыб  $^{137}\text{Cs}$  и ее применение для озера Кожановское (Брянская область) // Радиационная биология. Радиоэкология, 2005. Т. 3. С. 244-252.
4. Полякова Н.И., Пельгунова Л.А., Рябов И.Н., Рябцев И.А. Особенности накопления  $^{137}\text{Cs}$  у рыб высшего трофического уровня из водоемов, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология, 2009. Т. 49. № 3. С. 330-337.
5. Рябов И.Н. Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. М., 2004. 215 с.
6. Ryabov I.N., Belova N.V., Polyakova N.I., Haddering R. Radioecological phenomena of the Kojanovskoe Lake // The radiological consequences of the Chernobyl accident, Proceedings of the fish international conference. Minsk, 1996. P. 213-216.

### ESTIMATION OF THE MODERN RADIOECOLOGICAL CONDITIONS OF THE FRESHWATER ICHTHYOFAUNA FROM RESERVOIRS OF THE RUSSIA AND UKRAINE

N.I. Polyakova, L.A. Pelgunova

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS, Moscow, Russia,  
[polyakova.nat@mail.ru](mailto:polyakova.nat@mail.ru)

In this paper, we analyze results of long-term investigations of  $^{137}\text{Cs}$  accumulation in the fish from the reservoirs suffered as a result of the ChNPP. These investigations were carried out by the members of the Combined Radioecological Expedition of the Russian Academy of Sciences. Investigations were realized in the Kiev reservoir and the Kozhanovskoe Lake. The considerable differences in accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  in fish were established on the species level. After the damage on ChNPP Kozhanovskoe Lake is one the most polluted by radionuclides the lakes of Russia. In fish muscles of Kozhanovskoe Lake was revealed an abnormal  $^{137}\text{Cs}$  specific activity. In a result of researches of Kozhanovskoe Lake was revealed the fact that  $^{137}\text{Cs}$  specific activity of general species of fish decreased, but is still on a high level. Particularly maximum level of fish contamination, noted in Northern part of Kiev reservoir in 2004, was in 89 times lower of maximum indicators in fish of Kozhanovskoe Lake, namely in predator species: pike and perch. In 2011 during radioecological researches on Kiev reservoir was estimated the fact of secondary increase (from 1.5 to 10 times) of  $^{137}\text{Cs}$  specific activity in the organisms of field species of fish in comparison with indicators in 2009 and 2010.

## ПРИМЕНЕНИЕ *ALLIUM*-ТЕСТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ ВОДЫ С РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

С.В. Пяткова<sup>1</sup>, С.А. Гераськин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ) НИЯУ МИФИ,  
Обнинск, Россия, [svpyatkova@mail.ru](mailto:svpyatkova@mail.ru)

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт  
сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии (ВНИИСХРАЭ),  
Обнинск, Россия, [stgeraskin@gmail.com](mailto:stgeraskin@gmail.com)

Увеличение площадей техногенно загрязненных территорий на планете требует постоянного экологического контроля. При этом особое внимание должно уделяться методикам контроля и оценки опасности загрязняющих веществ для живых организмов. В связи с этим весьма актуальным является разработка и усовершенствование методов биотестирования природной среды, позволяющих дать интегральную оценку ее качества.

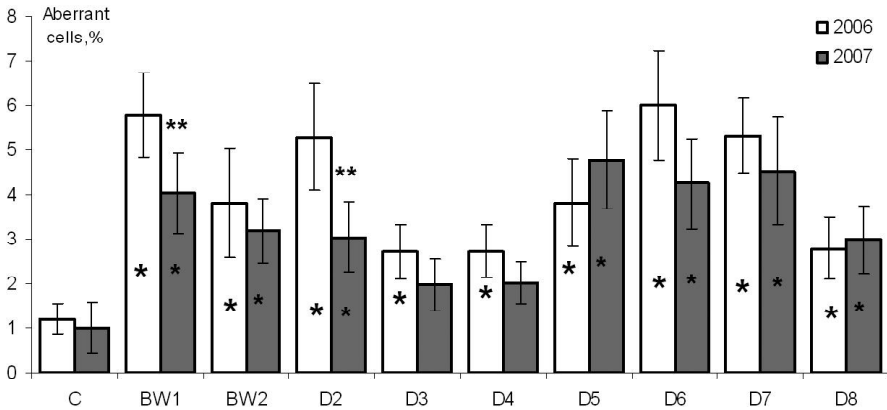
Цель настоящей работы – оценка токсичности образцов воды с территорий, имеющих радиоактивное загрязнение, методом биотеста.

В работе применялся *Allium*-тест, который хорошо зарекомендовал себя в подобных исследованиях [1, 2]. Этот метод характеризуется высокой чувствительностью к мутагенным факторам, позволяет регистрировать достаточно информативные тест-реакции, тест-объект легко культивируется в лабораторных условиях.

Образцы воды для тестирования были отобраны с территорий, контрастных по уровню и спектру радиоактивного загрязнения: Атомное озеро и подземные воды горного массива Дегелен, расположенных на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) (Республика Казахстан).

Территория СИП характеризуется высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Основными дозообразующими радионуклидами являются <sup>137</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, заметную роль играют <sup>154</sup>Eu, <sup>60</sup>Co, <sup>239, 240</sup>Pu и <sup>241</sup>Am. Мощность экспозиционной дозы на отдельных его участках составляет от 20 до 3000 мкР/ч [3, 4]. Разноплановый уровень загрязнения стал основой для проверки степени информативности этой тест-системы для экологической оценки состояния техногенно загрязненных территорий.

При проведении исследования учитывали два аспекта токсичности. Цитотоксичность определяли с помощью показателя митотической активности клеток корневой меристемы. Оценку генотоксичности водной среды проводили с учетом аберрантных клеток на стадии ана-телофазы, анализировали спектр зарегистрированных нарушений в клетке. Наиболее результативным и информативным показателем можно считать проявление генотоксического эффекта.



Сравнительный анализ генотоксичности образцов воды за 2006-2007 гг. \* различие с контролем достоверно при  $p = 0.05$ ; \*\* различие достоверно между вариантами за разные годы при  $p = 0.05$ .

Результаты оценки генотоксичности проб воды с территории СИП (см. рисунок) демонстрируют проявление генотоксического эффекта практически во всех тестируемых вариантах (за исключением образцов D3, D4, отобранных в 2007 г.). Для двух точек пробоотбора BW1 (Атомное озеро) и D2 (горный массив Дигилен) характерны более высокие и достоверно значимые показатели частоты aberrантных клеток при тестировании воды.

При анализе спектра aberrаций отмечено присутствие всех типов нарушений в тестируемых вариантах. Значительный вклад в сумму регистрируемых изменений вносят хроматидные (одиночные) и хромосомные (двойные) мосты. При проращивании лука в воде из источников горного массива Дегелен во всех вариантах зарегистрирован весомый вклад (до 25%) фрагментов хроматид. Во всех вариантах тестирования отмечены геномные нарушения в виде отставания хромосом, причем в образцах D2, D5, D7 их доля заметно повышается (до 30%). Тестируемый образец воды D2 выделяется примерно равным соотношением всех присутствующих типов aberrаций хромосом. Нарушения деления, связанные с изменением веретена деления (С-митозы и трехполюсные митозы) отмечены в большом количестве для вариантов D2, D5 (горный массив Дегелен) и BW1 (Атомное озеро). В контрольном варианте тестирования многополюсные и С-митозы отсутствуют.

Таким образом, оценка генотоксичности проб воды с территории СИП с помощью *Allium*-теста показала их высокую мутагенную активность. Отмечена возможность верификации результатов при использовании цитогенетических методов в оценке качества воды, подтверждена возможность первичного обнаружения наиболее загрязненных участков в районе пробоотбора.

Исследования проводились при поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ), грант К-1328.

#### Литература

1. Rank J., Nielsen M.H. Genotoxicity testing of waste water studge using the *Allium cepa* anaphase – telophase chromosome aberration assay // Mutat. Research, 1998. № 12.

2. Kovalchuk O., Kovalchuk I., Arkhipov A. The *Allium cepa* chromosome aberration test reliably measures genotoxicity of soils of inhabited areas in the Ukraine contaminated by the Chernobyl accident // Mutat. Research, 1998. Vol. 415. P. 47-57.

3. Артемьев О.И., Ахметов М.А., Птицкая Л.Д. Радионуклидное загрязнение территории бывшего Семипалатинского испытательного ядерного полигона // Вестник НЯЦ РК, 2001. Вып. 3. С. 12-20.

4. Мозолин Е.М., Гераськин С.А., Минкенова К.С. Радиобиологические эффекты у растений и животных Семипалатинского испытательного полигона (Казахстан) // Радиационная биология. Радиоэкология, 2008. Т. 48. № 4. С. 433-442.

#### APPLICATION OF ALLIUM-TEST FOR WATER GENOTOXICITY ASSESSMENT FROM RADIOACTIVE CONTAMINATION TERRITORY

S.V. Pyatkova<sup>1</sup>, S.A. Geraskin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Obninsk institute for Nuclear Power Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Russia, [svpyatkova@mail.ru](mailto:svpyatkova@mail.ru)

<sup>2</sup>Russian institute for Agricultural Radiology and Ecology, Obninsk, Russia, [stgeraskin@gmail.com](mailto:stgeraskin@gmail.com)

The purpose of the present work was the estimation cytotoxicity and genotoxicity of natural water from Semipalatinsk Test territory with the using of the biotest – *Allium*-test. Such form of biotesting has shown the mutagenic activity of high level. The results allow to use this methods for highlighting the most polluted areas.

#### ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В АБИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ ТЕРРИТОРИИ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К БАЗЕ ХРАНЕНИЯ МОНАЦИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Н.Г. Рачкова

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[rachkova@ib.komisc.ru](mailto:rachkova@ib.komisc.ru)

Законы распределения естественных радионуклидов уранового и ториевого рядов распада между твердой и жидкой фазами хорошо известны. Однако их использование для прогнозирования поведения радиоактивных элементов в загрязненных экосистемах ос-

ложняется высокой степенью и комплексным характером нарушения экологической обстановки на этих территориях, которая выражается в трансформировании не только состава природных вод и сопредельных с ними сред, но и изменении самого ландшафта, структуры почв и грунтов, видового богатства живых организмов.

В сообщении приводятся рекогносцировочные данные о радиоэкологической обстановке на территории, прилегающей к площадке складирования монацита в Красноуфимском районе Свердловской области. На оборудованных в 1960-1964 гг. складах этого пункта хранения сосредоточено более 80 тыс. т монацитового концентрата, представляющего собой безводную смесь ортофосфатов редкоземельных металлов и тория с содержанием 3.5-10.0%  $\text{ThO}_2$  и 0.1-1.0%  $\text{U}_3\text{O}_8$ . Исследована удельная активность радионуклидов уранового и ториевого рядов распада в дренажных водах, донных отложениях и грунтах исследуемой территории.

Площадка расположена между железнодорожным полотном ст. Зюрья и закрытой базой складирования монацита. Внешний осмотр участка (80×700 м) указывает на проведение здесь в прошлом рекультивационных мероприятий, о чем свидетельствуют однородная рыхлая структура и равномерная окраска верхнего 30-сантиметрового слоя почвы. Предположительно он был насыпан в ходе реабилитации исследуемой площадки или обустройства ее дренажной системы. По-видимому, дополнительно к этому проводили гипсование почвы, поскольку и поверхностные воды, и грунты в настоящее время содержат повышенные относительно фоновых показателей содержания кальция и сульфатов. Кратность превышения для последних достигает 15 раз. Максимальное содержание сульфатов в водах составляет около 300 мг/л, что не превышает, но в значительной мере приближено к нормативной величине (500 мг/л). Отчасти именно концентрациями сульфатов и кальция обусловлена высокая минерализованность дренажных вод с удельной электропроводностью до 800 мкСм/см.

Вдоль охраняемой территории складирования монацита, в 10 м от ее границы, проложена мелиоративная канава, являющаяся частью общей системы отведения поверхностных вод от железнодорожного полотна и с площадки базы хранения монацита. Несмотря на наличие обустроенной дренажной сети, территория частично заболочена и находится в небольшой низине по отношению к пункту хранения радиоактивного материала. Водородный показатель как для вод, так и для почв и седиментов приходится на область слабощелочных-щелочных рН. Мощность дозы внешнего облучения на высоте 1 м от поверхности земли варьирует от 0.2 до 0.8 мкЗв/ч.



Измеренные содержания радионуклидов в опробованных дренажных водах, почве, донных отложениях, в целом, не указывают на радиоактивное загрязнение территории. Удельные активности изотопов тория с массовыми числами 228, 230, 232, природных изотопов урана (235, 234, 238), радия-226, полония-210, свинца-210 в воде находятся в пределах установленных нормативных показателей. Концентрации радионуклидов в донных отложениях и почве не зависят от ландшафтных особенностей точки отбора и ее удаленности от базы хранения радиоактивного материала. Тем не менее случаются отдельные заметные повышения содержания радионуклидов в абиотических компонентах исследуемой экосистемы, которые обуславливают общую высокую вариабельность измеряемых показателей удельной активности в объектах окружающей среды. Она характерна больше для почв и донных отложений. Так, крайние члены вариационного ряда удельной активности донных отложений по изотопам тория отличаются от 50 до 75, свинца-210 и полония-210 – до 20 раз. Поскольку приведенные радионуклиды не относятся к водным мигрантам, можно предполагать, что источником их поступления в верхний 20-сантиметровый слой донных отложений и грунта является радиоактивно загрязненная погребенная почва.

Для всех исследованных вод характерны значительные содержания радия-226, варьирующие в диапазоне величин от 0.2 до 0.35 Бк/л. Они высоки по отношению к соответствующим фоновым показателям для зоны вне влияния базы хранения монацита (менее 0.1 мБк/л) и существенны в сравнении с установленным уровнем вмешательства радионуклида (0.49 Бк/л). Важным свидетельством загрязнения исследуемой территории радионуклидами является повышенный (более 0.3 мкЗв/ч) радиоактивный фон, сохраняющийся на значительном удалении (60-80 м) от складов монацита.

Таким образом, проведенных рекогносцировочных исследований недостаточно для однозначного вывода об отсутствии радиоактивного загрязнения территории вблизи базы хранения монацитового концентрата. Для более точной и корректной оценки радиоэкологической обстановки необходимо изучение распределения радионуклидов в почвенном профиле с целью выявления скрытых очагов радионуклидного загрязнения грунта, погребенного на глубине более 20 см.

Исследования поддержаны проектами № 12-С-4-1008 и № 12-И-4-2006 УРО РАН.

**NATURAL RADIONUCLIDES IN ECOSYSTEM'S ABIOTHIC COMPONENTS  
IN THE VICINITY MONACITE CONCENTRATE STORAGE CELL****N.G. Rachkova**Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Division, Syktyvkar, Russia,  
[rachkova@ib.komisc.ru](mailto:rachkova@ib.komisc.ru)

Results of radioecological research on territory in the vicinity of monacite concentrate storage cell were presented. It was shown, that activity concentrations of radionuclides of uranium and thorium decay series in waters, sediments and 0-20 cm soil layer vary in a wide range. So, studies of radionuclide distribution in soil profile are required.

**МИГРАЦИЯ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ УРАНА И РАДИЯ  
В ВОДОЕМАХ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ  
БЫВШИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИЕВОГО ПРОМЫСЛА****Н.Г. Рачкова, И.И. Шуктомова**Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[rachkova @ib.komisc.ru](mailto:rachkova@ib.komisc.ru)

Радий и уран относятся к числу активных водных мигрантов, способных мигрировать в составе истинного раствора, коллоидов и псевдоколлоидов, твердофазных продуктов выветривания горных пород. Особенности этого распределения заметно влияют на миграционную способность радионуклидов и их биологическую доступность.

В работе представлены данные о содержании и фазовом распределении в воде урана и радия-226, их удельной активности в донных отложениях рек Ухта, Ярега и Лыаель, а также ручьев и канав, дренирующих территории хранилища радиоактивных отходов (РАО) и бывших заводов № 3, 7, 10, 12 недействующего предприятия по добыче радия. Все исследованные водотоки относятся к бассейну р. Печора.

Воду, взятую из поверхностного слоя (ручьи) или глубины 20-50 см водного потока (реки), сразу после отбора фильтровали с последовательным отделением грубой взвеси (частицы более 3.5 мкм) и взвешенного вещества крупностью 0.45-3.5 мкм. Донные отложения отбирали из верхнего 20-сантиметрового слоя седиментов. Содержание урана в образцах определяли люминесцентным методом [2], радия-226 – по эманации радона-222 [8].

Площадка бывшего завода № 7 (1 га) находится на окраине поселка в 285 м от р. Ухта. Она дезактивирована насыпным способом в 1961-1962 гг., мощность экспозиционной дозы (МЭД) достигает 8.5

мкЗв/ч. В 300 м от этого участка на площади 4.6 га, составленной двухуровневой речной террасой и поймой р. Ухта, расположено хранилище РАО. Его территория также дезактивирована, частично заболочена, МЭД может превышать 20 мкЗв/ч. В радиоактивном грунте содержится в среднем урана 1.4, радия – 300 Бк/г [6]. Воды р. Ухта нейтральные со слабоокислительной обстановкой и удельной электропроводностью до 300 мкСм/см. Содержание гидрокарбонатов не превышает 79, сульфатов – 52, кальция – 38, фосфатов – 0.05 мг/л. Воды с территории хранилища отличаются высокой электропроводностью (до 1900 мкСм/см), в частности, за счет значительного содержания (мг/л) гидрокарбонатов (180-50), кальция (100-165), силикатов (4.6-7.9), органического углерода (3.0-12.1), сульфатов (96-179), фосфатов (0.007-0.110), железа (0.07-0.38). Участки заводов № 10 и 12 площадью 2.2 и 1.1 га соответственно удалены от населенных пунктов и не дезактивированы – МЭД достигает 6.2 и 11.7 мкЗв/ч. Завод № 10 находится на огибаемой р. Ярега высокой гряде, № 12 – на левобережье р. Лыаель. Кратчайшее расстояние от промплощадок до рек составляет около 60 м. Летом удельная электропроводность воды на этом участке русла р. Ярега достигает 900, р. Лыаель – 250 мкСм/см.

Физико-химические свойства поверхностных вод исследуемых промплощадок, а именно нейтральный-слабощелочной водородный показатель, высокие содержания сульфатов, кальция, фосфатов и карбонатов должны способствовать фиксации радия, но одновременно могут интенсифицировать миграцию урана из твердых радиоактивных отходов и загрязненной почвы [1]. Однако сравнение данных периода 1960-1963 гг. и результатов современных исследований показывает, что миграционную способность в описанных выше ландшафтно-геохимических условиях сохраняют оба радионуклида.

Так, по архивным данным [4], после дезактивации насыпным способом содержание радия-226 в поверхностных водах хранилища РАО составляло 0.02-0.25 Бк/л. В настоящее время удельная активность радия в них может достигать уровня вмешательства для питьевых вод (0.49 Бк/л) [5]. Это в два раза больше соответствующего максимума 1963 г. и выше фоновых показателей для северных рек (0.007-0.15 Бк/л) [3]. В то же время для участка русла р. Ухта, подверженного влиянию стоков с территории хранилища РАО, содержания радия-226 в воде варьируют от 0.01 до 0.04 Бк/л, что отвечает как современным санитарно-гигиеническим нормативам и региональным показателям, так и фоновым данным пятидесятилетней давности. Сравнение результатов наблюдений разных лет указывает на то, что гидрогенная миграция радия-226 из мест хранения РАО в настоящее время интенсивнее, чем в ближний постдезактивационный период. Этот процесс достоверно зависит от

содержания бария в воде ( $n = 10$ ,  $r = 0.74$ ). Заметное влияние на мобилизацию радия оказывают концентрации растворимых органических веществ и фосфатов. По результатам ультрафильтрации вод радий переносится водными потоками как в растворе, так и со взвешенным веществом. При этом для водотоков, принимающих стоки с территорий с наиболее сложной радиоэкологической обстановкой (ручьи хранилища РАО, реки Ярега и Лыаель в зоне влияния стоков с площадок заводов № 10 и 12), свойственна преимущественно растворимая форма радия, доля которой занимает 60-95% его удельной активности в водах, очищенных от крупной взвеси. Водными потоками р. Ухта вне зоны влияния объектов радиевого производства, а также мелкими водотоками, дренирующими территории заводов № 3 и 7, переносится в основном радионуклид, сорбированный на взвешенном веществе 0.45-3.5 мкм. Относительное количество радия в крупной взвеси чаще всего велико и достигает 130% суммарного содержания элемента в растворе и взвешенном веществе. По данным регрессионного анализа, седиментация радия тесно связана с содержанием кальция и магния в исследованных водах.

Что касается урана, то диапазон варьирования его удельной активности в поверхностных водах хранилища РАО и его импактной зоны (р. Ухта и четыре ручья) в настоящее время заметно сужен по сравнению с периодом после дезактивации. Если в 1962 г. содержания урана в воде достигали 2500 мБк/л [4], то в настоящее время – от 3 до 250 мБк/л. Тем не менее это превышает среднемировые (2.3 мБк/л) [9] и региональные показатели, в том числе для водотоков Печорского бассейна в районе урановой аномалии [7]. Кратность превышения для ручьев достигает 100, русла реки ниже хранилища – 1.3 раза. Динамика изменения содержания урана в мелких водотоках территории хранилища указывает на снижение интенсивности водной миграции урана из мест складирования РАО. При этом пороговая величина удельной активности урана в воде, токсичная для пресноводных растений (61 мБк/л в расчете на  $^{238}\text{U}$ ) [10], остается превышенной. Установлено, что содержание урана в водах ручьев ( $n = 10$ ) территории хранилища значимо коррелирует с рН ( $r = 0.72$ ), электропроводностью (0.71), количеством в них гидрокарбонатов (0.71), кальция (0.71), сульфатов (-0.69), фосфатов (0.78), силикатов (0.69), а также с содержанием железа (0.91), в том числе слабоокристаллизованного (0.86), в донных осадках. Практически все количество урана, обнаруживаемое в воде, мигрирует в растворенном состоянии, а доля взвешенной фракции не превышает 2%. Крупной взвесью переносится дополнительно не более 25% валового содержания урана. Поэтому даже в случае ее отделения концентрации урана в поверхностных водах территории

хранилища РАО превышают соответствующий среднемировой показатель.

Исследование содержания радиоактивных элементов в донных осадках свидетельствует об отсутствии депонирования радия в водоемах исследуемого района. В то же время для седиментов с территории хранилища РАО прослеживается возрастание удельной активности урана с течением времени. Ранее было установлено, что в их составе преобладают легко десорбируемые соединения урана [7]. В связи с этим уместно предположить концентрирование радиоактивного элемента в мелких водотоках территории складирования РАО за счет вторичной сорбции из вод. По-видимому, на отдельных участках ручьев ее интенсивность довольно велика, поскольку удельная активность седиментов по урану в настоящее время может превышать таковую для захороненных РАО.

Таким образом, в ландшафтно-геохимических условиях бывших промплощадок радиевого промысла радий-226 и уран сохраняют миграционную способность. Специфические физико-химические характеристики водной среды, сложившиеся на этих территориях, способствуют поступлению радионуклидов из твердых радиоактивных отходов и загрязненной почвы в поверхностные воды. При этом интенсивность гидрогенной миграции радия-226 из мест хранения РАО в настоящее время выше, чем в ближний постдезактивационный период. Для урана она, напротив, снижается с течением времени. Однако региональные фоновые показатели и пороговая величина токсичной для гидروفитов удельной активности вод по урану, для образцов из импактной зоны хранилища РАО по-прежнему остаются превышенными. Подавляющее количество урана переносится водными потоками в форме растворимых соединений, характеризующихся высокой биологической доступностью. В отличие от него радий мигрирует как в растворе, так и во взвешенном состоянии. Тем не менее это не приводит к увеличению радиоактивности вод и донных осадков рек, принимающих стоки с промплощадок промысла. Установлено, что факторами, контролирующими процессы мобилизации и седиментации радия, являются содержания в воде его химических макроаналогов – бария, кальция и магния.

Исследования поддержаны проектами № 12-С-4-1008 и № 12-И-4-2006 УрО РАН.

#### Литература

1. *Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М.* и др. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с.
2. Аналитическая химия урана / Под ред. А.П. Виноградова. М.: Наука, 1962. 431 с.

3. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
4. Научный отчет по теме «Влияние малых доз ядерных излучений на живые организмы в районах повышенной естественной радиации» за 1963 год. Рук. Фонд Коми НЦ УрО РАН. Ф. 3. Оп. 2. Д. 48. 217 с.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
6. *Носкова Л.М.* Динамика миграции U, Ra и Th в компонентах экосистем, нарушенных в результате радиевого производства: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2010. 25 с.
7. *Рачкова Н.Г., Шуктомова И.И.* Сравнительный анализ миграционной способности и концентрирования природного урана в экосистемах рек Печорского бассейна // Радиобиология. Радиоэкология, 2013. Т. 53. № 1. С. 84-94.
8. *Старук И.Е.* Основы радиохимии. Л.: Наука, 1973. 247 с.
9. *Palmer M.R., Edmond J.M.* Uranium in river water // Geochim. Cosmochim. Acta, 1993. Vol. 57. № 20. P. 4947-4955.
10. *Sheppard S.C., Sheppard M.I.* Derivation of ecotoxicity thresholds for uranium // J. of Environm. Radioactivity, 2005. Vol. 79. P. 55-83.

#### MIGRATION AND CONCENTRATING OF RADIUM AND URANIUM IN RADIUM PRODUCTION IMPACT ZONE WATER BODIES

**N.G. Rachkova, I.I. Shuktomova**

Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Division, Syktyvkar, Russia,  
[rachkova@ib.komisc.ru](mailto:rachkova@ib.komisc.ru)

The results on water activity concentration and phase distribution of uranium and radium-226, their sediment specific activities in radium production impact zone water bodies were presented.

---

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

**Н.И. Санжарова, А.В. Панов, О.А. Шубина, Н.Н. Исамов**  
ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии  
Россельхозакадемии, Обнинск, Россия, [natsan2004@mail.ru](mailto:natsan2004@mail.ru)

Крупные радиационные аварии на НПО «Маяк» (Южный Урал) и Чернобыльской АЭС обусловили загрязнение сельскохозяйственных земель. Площадь территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, временно выведенная из землепользования, составила 95 тыс. га. Радиоактивное загрязнение в результате аварии на Чернобыльской АЭС затронуло 21 субъект Российской Федерации. Общая площадь загрязненных сельскохозяйственных угодий с плот-

ностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  выше  $37 \text{ Бк/м}^2$  составляет более 15 млн. га. Наиболее высокие уровни загрязнения зарегистрированы в Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областях, где 324.9 тыс. га сельскохозяйственных угодий имеют плотность загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$  выше  $185 \text{ кБк/м}^2$ . Масштабное загрязнение сельскохозяйственных земель долгоживущими радионуклидами поставило задачу оптимизации ведения сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных территориях с учетом радиологических, экономических и социальных аспектов.

В основе оптимизации использования загрязненных сельскохозяйственных земель лежат следующие основные принципы:

- обеспечение производства сельскохозяйственной продукции, соответствующей установленным санитарно-гигиеническим нормативам;

- оптимизация системы земледелия и применения защитных мероприятий, при соблюдении принципа экономической целесообразности затрат на производство продукции;

- обеспечение устойчивого функционирования сельскохозяйственного производства;

- обеспечение безопасного проживания сельского населения;

- обеспечение безопасности сельскохозяйственных работников.

Организация сельскохозяйственного производства включает следующие этапы:

- оценка радиологической обстановки;

- анализ характеристик сельскохозяйственного производства;

- определение количественных параметров миграции радионуклидов;

- обоснование необходимости применения специальной системы земледелия;

- обоснование перечня необходимых защитных и реабилитационных мероприятий;

- разработка вариантов организации земледелия.

При радиоактивном загрязнении окружающей среды на основании данных радиационного контроля устанавливается зона радиационной аварии (НРБ-99/2009). Для сельскохозяйственных угодий в качестве критерия для зонирования используется плотность радиоактивного загрязнения почв. Контрольные уровни (КУ) содержания радионуклидов в почве сельскохозяйственных угодий определяются с учетом состава радиоактивных выпадений и характеристики почвенного покрова. Для зоны аварии на ЧАЭС выделены следующие КУ по плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ :  $<37 \text{ кБк/м}^2$ ; 37-185 ( $1\text{-}5 \text{ Ки/км}^2$ ); 185-555 (5-15); 555-1480 (15-40) и  $>1480 \text{ кБк/м}^2$  ( $>40 \text{ Ки/км}^2$ ).

Анализ характеристик сельскохозяйственного производства включает: обобщение информации о структуре землепользования в зоне загрязнения; анализ информации по структуре почвенного покрова; обобщение информации о технологиях возделывания сельскохозяйственных культур; анализ хозяйственных показателей хозяйств в зоне загрязнения – соотношение отраслей, объемы производства продукции, урожайность, характеристики стада, продуктивность в животноводстве и т.п.

Критериями принятия решений о необходимости применения защитных мероприятий или реорганизации систем земледелия на загрязненных территориях являются санитарно-гигиенические нормативы или производные от них предельно допустимые (ПДК) или контрольные уровни (КУ). Для обоснования необходимости организации специальной системы земледелия на загрязненной территории предполагает проведение следующих работ: оценка уровней загрязнения почв сельскохозяйственных угодий; оценка уровней загрязнения сельскохозяйственной продукции; определение соответствия содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции санитарно-гигиеническим нормативам; выделение сельскохозяйственных территорий, где невозможно получение нормативной продукции без проведения специальных защитных мероприятий.

Обоснование перечня необходимых защитных мероприятий включает оценку эффективности различных приемов в растениеводстве, кормопроизводстве и животноводстве, обеспечивающих снижение содержания радионуклидов в производимой на загрязненных угодьях сельскохозяйственной продукции. Наиболее эффективные защитные мероприятия на первом этапе выбираются на основании кратности снижения накопления радионуклидов в сельскохозяйственной продукции после их применения. В последующем в качестве критерия может быть использовано снижение доз внутреннего облучения человека после применения защитных мероприятий и уменьшение коллективных доз.

В качестве основы для выбора вариантов проведения комплекса защитных мероприятий, направленного на получение максимального эффекта от применяемых мер с минимальными дополнительными финансовыми вложениями, предложена классификация сельскохозяйственных угодий по следующим критериям: риску (вероятности) производства сельскохозяйственной продукции с содержанием радионуклидов, превышающим нормативы (СанПиН-2.3.2.1078-01); уровням загрязнения сельскохозяйственных угодий.

На территориях с уровнями загрязнения до 185 кБк м<sup>-2</sup> достаточным с радиологической точки зрения является применение зональных технологий, поддерживающих сохранение почвенного пло-



дородия и получение оптимальных урожаев. Эти технологии обеспечивают и производство продукции в соответствии с нормативами СанПиН-2.3.2.1078-01. В случае если для каких-либо территорий применение зональных технологий недостаточно для получения продукции, удовлетворяющей нормативам, следует рассматривать вариант применения специальных защитных мероприятий, включающих внесение повышенных доз извести (на кислых почвах) и фосфорно-калийных удобрений (NPK 1.0:1.5:2.0). Применение защитных приемов, основанных на использовании повышенных доз калия, будет необходимо проводить в зоне с риском превышения нормативов от 10 до 50% и более (в зонах с высокими уровнями загрязнения более 555 кБк м<sup>-2</sup>).

Оптимизация агроландшафтов – сложная многофункциональная задача, что определяет необходимость применения для ее решения современных компьютерных технологий. Одним из эффективных инструментов является разработка систем поддержки принятия решений. Для решения задач оптимизации применения специальных защитных технологий на радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных угодьях была разработана специалистами России, Беларуси, Украины, Германии и МАГАТЭ система поддержки принятия решений *ReSCA – Remediation Strategies for the Chernobyl Accident* [1].

Данная система представляет собой компьютерную программу, позволяющую определять состав и объем наиболее эффективных защитных мероприятий, которые выбирают с учетом радиологических, почвенных и административно-хозяйственных характеристик, а также наличия финансовых и материальных ресурсов. Оптимизация защитных мероприятий осуществляется на основе минимизации затрат на единицу предотвращенной дозы с учетом социальной приемлемости контрмер. Система *ReSCA* основывается на использовании данных о конкретных населенных пунктах, а также на стандартном алгоритме оценки доз облучения населения. Основным дозообразующим радионуклидом на загрязненных после аварии на ЧАЭС территориях является <sup>137</sup>Cs, поэтому программа разработана для оптимизации контрмер по защите населения от облучения, связанного с этим радионуклидом. Программа *ReSCA* состоит из четырех основных опций: исходные данные, параметры модели, расчет эффективности контрмер и результаты расчетов. В системе рассматривается возможность применения семи различных типов защитных мероприятий: коренное улучшение сенокосов и пастбищ (*RI*); поверхностное улучшение сенокосов и пастбищ (*SI*); применение ферроцин-содержащих препаратов для коров (*FA*); использование чистого корма для свиней (*FP*); внесение минеральных удобрений под картофель (*MF*); проведение информационной

кампании о правилах и рекомендациях по сбору, обработке и потреблению грибов в зонах загрязнения (IM); дезактивация территории населенного пункта (RS).

На основании разработанных подходов были проведены работы по оптимизации производства в тестовом сельскохозяйственном предприятии, расположенном на радиоактивно загрязненной территории в Брянской области. Территория хозяйства «Комсомолец» Новозыбковского района Брянской области характеризуется высокими плотностями загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$  и большой вариабельностью – от 37 до 1480 кБк/м<sup>2</sup>. Почвенный покров сельскохозяйственных угодий в основном представлен дерново-подзолистыми почвами легкого механического состава и болотными почвами. На основании результатов радиологического обследования были определены коэффициенты перехода в сельскохозяйственные культуры и рассчитаны плотности загрязнения почвы, при превышении которых невозможно получение продукции, удовлетворяющей нормативам.

Полученные контрольные уровни загрязнения различных типов почв были использованы для анализа возможности размещения сельскохозяйственных культур. Прогноз накопления  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственных культурах при реальных плотностях загрязнения сельскохозяйственных земель показывает, что производство картофеля возможно на всей территории хозяйства. Выращивание зерновых не представляется возможным только на болотно-низинных перегнойно-торфяных почвах. Таким образом, существующая структура полевых севооборотов позволяет получать растениеводческую продукцию, удовлетворяющую санитарно-гигиеническим нормативам.

В то же время если бы на территории хозяйства располагались только сенокосы и пастбища без окультуривания, то содержание  $^{137}\text{Cs}$  в полученном на них сене превысило бы нормативы, определенные ветеринарными правилами ВП 13. 5.13/06-01. Замена травостоя путем подбора травосмесей позволит снизить поступление радиоцезия до пяти раз. В этом случае на угодьях с дерново-подзолистыми почвами будет возможным получение сена, соответствующего нормативам, однако на болотных почвах уровни загрязнения будут выше допустимых значений. В качестве одного из путей организации земледелия в хозяйстве может быть перепрофилирование производства – ведение растениеводства, ввод ограничений на ведение животноводства.

### Литература

1. Ulanovsky A., Jacob P., Fesenko S. et al. ReSCA: decision support tool for remediation planning after the Chernobyl accident. Radiat. Environ. Biophys., 2011. Vol. 50. P. 67-83.

---

OPTIMIZATION OF USE OF AGRICULTURAL LAND CONTAMINATED  
BY RADIATION ACCIDENTS

**N.I. Sanzharova, A.V. Panov, O.A., Shubina, N.N. Isamov**

Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia,  
[natsan2004@mail.ru](mailto:natsan2004@mail.ru)

A large-scale contamination of agricultural Lands by long-lived radionuclides raises a problem of farming optimization in the contaminated areas taking into account the radiological, economic and social aspects. Cultivated land optimization is a complicated multifunction problem and indicates a need to develop a computer decision support system. The description and application results of the decision support system ReSCA – Remediation Strategies for the Chernobyl Accident is presented in this paper.

---

**РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ  
МИГРАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ  
В ГРУНТЕ ЗОНЫ АЭРАЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО  
РЕАКТОРА ВВР-М ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАН УКРАИНЫ**

**Е.В. Сваричевская, В.В. Тришин, А.Д. Саженюк, И.А. Малюк,  
И.О. Павленко, А.В. Гайдар**

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина,  
[svarich@kinr.kiev.ua](mailto:svarich@kinr.kiev.ua)

С 1960 г. в Институте ядерных исследований (ИЯИ) НАН Украины эксплуатируется исследовательский ядерный реактор (ИЯР) ВВР-М.

Реактор ВВР-М – водо-водяной, бассейнового типа с бериллиевым отражателем. Его номинальная мощность МВт, максимальная плотность потока нейтронов в активной зоне –  $1.2 \times 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>с. Имеется девять горизонтальных и 13 вертикальных экспериментальных каналов (возможно дополнительно еще 14).

ИЯР ВВР-М используется как источник тепловых нейтронов для научных исследований и технологических разработок в области ядерной физики, радиационной физики, радиобиологии, ядерной энергетики, радиоэкологии, а также для нейтронно-активационного анализа и производства радиоактивных изотопов.

В 1997 г. для контроля за состоянием спецканализации реактора ВВР-М на территории его площадки создана система наблюдательных скважин. Схема размещения скважин показана на рисунке. Во время бурения наблюдательных скважин были отобраны пробы грунта на различной глубине от поверхности земли и проведены измерения удельной активности природных и техногенных радионуклидов в них.

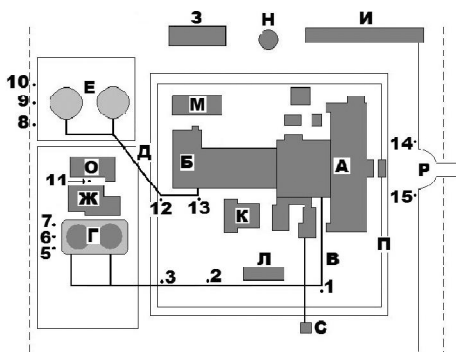


Схема размещения наблюдательных скважин на площадке ИЯР ВВР-М: 1-15 – наблюдательные скважины; А – здание реактора с реакторным залом; Б – здание «горячих» камер; В – трубопровод спецканализации; Г – сливные резервуары реактора; Д – трубопровод спецканализации «горячих» камер; Е – резервуары ЖРО «горячих» камер; Ж – установка переработки ЖРО; З – градирня; И – склад; К – вентиляционный центр; Л – газгольдер; М – насосная второго контура; Н – водонапорная башня; О – мастерская; П – ограда физической защиты; Р – ограда реакторной площадки; С – экспериментальный павильон горизонтального канала № 9.

Представлены результаты гамма-спектрометрических измерений содержания радионуклидов  $^{40}\text{K}$ , рядов  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , а также техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в пробах грунта из скважины № 10, расположенной возле резервуаров жидких радиоактивных отходов (ЖРО) «горячих» камер реактора, где вероятность загрязнения грунта техногенными радионуклидами наиболее высокая (табл. 1).

Как видно из приведенных данных, только в пробе, отобранной с приповерхностного слоя грунта, наблюдалась сравнительно более высокая концентрация радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . Это загрязнение сформировалось в результате аварии на Чернобыльской АЭС, и его уровни не отличались от характерных для г. Киева на тот момент. Остальные пробы имели концентрации радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  на уровне «фоновых» значений.

Концентрации природных радионуклидов в пробах грунта незначительно уменьшались с глубиной и существенно зависели от типа грунта (наименьшими уровнями характеризовались песчаные грунты). Также с использованием радиохимических методов были проведены выборочные измерения удельной активности радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в некоторых пробах грунта из наблюдательных скважин. Согласно полученным данным, концентрации радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в пробах грунта из скважины № 10 не превышали 13 Бк/кг.

В соответствии с регламентом радиационного мониторинга влияния исследовательского ядерного реактора ВВР-М на окружающую среду, утвержденного главным санитарным врачом г. Киева, два раза в году (весной и осенью) производится отбор проб грунта из наблюдательных скважин и измерение удельной активности радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в них.

Таблица 1

**Удельная активность радионуклидов  
природного и техногенного происхождения  
в пробах грунта из наблюдательной скважины № 10**

Тип грунта	Глубина отбора, м	Удельная активность, Бк/кг					
		<sup>40</sup> K	<sup>212</sup> Pb	<sup>214</sup> Pb	<sup>208</sup> Tl	<sup>214</sup> Bi	<sup>137</sup> Cs
Грунтово-растительный	0.5	523 ±110	27.9±5.6	20.7 ±4.4	28.2±6.0	21.3 ±4.3	20.6±5
	1.5	595±120	33.9±8.5	24.6±5.0	35.4±7.1	25.6±5.4	2.2± 0.9
Супесь лесовидная	2.5	561±120	36.2±8.7	29.5±6.5	34.9±7.7	27.6±6.1	2.2± 0.8
	5.5	586±117	32.2±7.1	26.9±6.5	30.2±6.4	27.1±4.9	2.2± 0.6
	6.5	603±130	34.5±6.9	25.6±5.3	34.4±7.2	26.5±5.6	1.2±0.6
	7.5	586±117	33.1±6.6	25.3±5.3	32.8±6.9	28.8±5.8	0.8±0.5
	8.5	498±100	36.8±7.7	24.4±5.1	29.1±6.1	24.0±4.8	0.7±0.6
	10.5	483±100	32.9±7.2	23.4±6.6	33.1±7.6	25.5±5.6	0.7±0.3
Суглинок	12.7	343±72	27.1±6.2	19.2±4.4	25.4±5.9	17.3±4.0	2.2± 0.6
Супесь желто-бурая	14.0	432±108	26.5±8.0	22.2±8.2	29.3±7.3	24.2±7.5	1.1±0.5
Песок	16.0	33±10	6.4±3.2	5.7±3.4	12.5±4.0	5.4±3.0	0.7±0.3
	18.0	13.1±4.5	6.7±1.4	2.8±0.8	7.6±1.7	3.8±0.9	0.8±0.5
	20.0	76±15	2.9±0.6	1.2±0.4	2.6±0.6	0.8±0.3	0.2±0.1
	22.0	14±6.3	6.0±1.6	2.0±1.0	5.3±1.9	3.9±1.3	0.7±0.5

Пробоотбор проводится сотрудниками службы радиационной безопасности реактора с помощью специального пробоотборника со дна скважин (глубина 8 м), предназначенных для проведения мониторинга.

Для измерений пробы грунта передаются в лабораторию Центра экологических проблем атомной энергетики ИЯИ НАН Украины.

Удельная активность радионуклида <sup>137</sup>Cs в пробах грунта измеряется с помощью современной высокочувствительной гамма-спектрометрической установки Сапс детектором GC6020.

Измерение удельной активности радионуклида <sup>90</sup>Sr производится после его радиохимического выделения и осаждения на ложку, счет проводится с помощью установки УМФ-1500.

За весь период наблюдений не было зарегистрировано повышение уровней удельной активности контролируемых радионуклидов в пробах грунта из наблюдательных скважин. Последние данные относительно удельной активности радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в пробах грунта, отобранных из наблюдательных скважин в апреле 2013 г., представлены в табл. 2. Как видно из представленных в табл. 2 данных, удельная активность радионуклида <sup>137</sup>Cs в пробах грунта из скважин не превышает 3.0 Бк/кг, <sup>90</sup>Sr – 6.2.

Таблица 2

**Результаты измерения удельной активности радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пробах грунта, отобранных в апреле 2013 г. из наблюдательных скважин вокруг исследовательского ядерного реактора ВВР-М ИЯИ НАН Украины**

№ п/п	№ скважины	Месторасположение скважины	Удельная активность, Бк/кг	
			$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$
1	1	Возле трубопровода реактора	$3.8 \pm 1.2$	$<0.8$
2	3	Возле трубопровода реактора	$3.8 \pm 1.2$	$0.6 \pm 0.3$
3	5	Возле сливных резервуаров реактора Возле резервуаров ЖРО «горячих»	$5.8 \pm 1.8$	$1.5 \pm 0.3$
4	10	камер	$3.3 \pm 1.0$	$<0.6$
5	13	Возле трубопровода «горячих» камер	$4.0 \pm 1.2$	$<0.4$
6	14	Возле ограды реакторной площадки (у проходной)	$3.1 \pm 0.9$	$<0.5$
7	15	Возле ограды реакторной площадки (у проходной)	$6.2 \pm 1.9$	$3.0 \pm 0.5$

Это свидетельствует об отсутствии техногенного влияния эксплуатации исследовательского ядерного реактора ВВР-М ИЯИ НАН Украины на загрязнение грунтов в зоне аэрации и о целостности трубопроводов его спецканализации и резервуаров с ЖРО.

**RADIATION MONITORING OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES MIGRATION  
IN SOIL OF AERATION ZONE OF NUCLEAR REACTOR WWR-M  
OF INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH  
OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE**

**E.V. Svarichevskaya, V.V. Trishin, A.D. Sazhenyuk, I.A. Malyuk,  
I.O. Pavlenko, A.V. Gaidar**

Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine,  
[svarich@kinr.kiev.ua](mailto:svarich@kinr.kiev.ua)

The data on the specific activity of natural and anthropogenic radionuclides in soil samples from the monitoring wells designed to control the state of special canalisation of nuclear research reactor of Institute for Nuclear Research of Academy of Sciences of Ukraine, were presented.

Analysis of the data for soil samples taken during the drilling of wells at present period, indicates the absence of anthropogenic influence of exploitation of the reactor WWR-M on the contamination of soils in the vadose zone and the integrity of its special canalisation pipes and tanks with liquid radioactive waste.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ПОПУЛЯЦИЙ БИОТЫ РЕГИОНАЛЬНОГО ХРАНИЛИЩА НИЗКОАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Б.И. Сынзыныс, О.А. Мирзеабасов, Г.В. Лаврентьева, Р.Р. Муллаярова,  
Е.А. Мордвинова, О.А. Момот**

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия,  
[ecology@iate.obninsk.ru](mailto:ecology@iate.obninsk.ru)

Цель работы: определить критические нагрузки и оценить экологический риск, неопределенности в его оценке для биоценоза регионального хранилища низкоактивных РАО.

Задачи работы:

1. Выбор биогеоценоза и выявление приоритетных загрязнителей радиационной и химической природы.

2. Определение экологических критериев оценки действия на биоценоз хранилища РАО.

3. Построение дозовых зависимостей при действии радионуклидов и химических веществ на биоту. Определение на их основе критических нагрузок.

4. Построение ГИС-карт территории с вычислением и представлением критических нагрузок.

5. Сравнение полученных результатов с прогнозируемыми и нормативными данными, анализ экологической ситуации.

Последовательное решение этих задач позволило установить следующие факты и закономерности:

1. В качестве биогеоценоза выбрано историческое хранилище РАО на террасе припойменной зоны р. Протвы и прилегающие к нему территории. Приоритетными радиационными загрязнителями исследуемой территории являются  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , удельные активности в почве которых в разных точках исследуемого биотопа определены методами  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектрометрии. Исследуемые химические загрязнители: Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Fe не представляют интереса с точки зрения приоритетности, так как их концентрации в почве были значительно меньше ПДК или значений для контрольной территории [2].

2. В качестве экологических критериев воздействия выбрана способность крапивы двудомной накапливать  $^{90}\text{Sr}$  в листьях и кустарниковой улитки (*Bradybaena fruticum*), на ней обитающей, в раковинах.

3. Построены дозовые зависимости накопления  $^{90}\text{Sr}$  раковинами моллюсков и листьями крапивы от «приведенной» радиоактивности естественных и техногенных радионуклидов, а также от погло-

щенной дозы облучения. В качестве критической нагрузки выбрана такая концентрация радионуклидов в почве (или соответствующая им поглощенная доза облучения телами моллюсков), которая снижает коэффициент накопления в 10 раз по сравнению с таковой для минимального значения  $^{90}\text{Sr}$  в почве.

4. На основании полученных величин построены ГИС-карты обследуемой территории с указанием зон критических нагрузок. С помощью компьютерной программы из программного пространства R ([www.R-project.org](http://www.R-project.org)) вычислена доля площади биотопа, на которой нагрузки превышают критические. Построена интегральная кривая риска, которая оценивает риск в 99%.

5. Риск воздействия хранилища на окружающую его экосистему следует характеризовать как неприемлемый. Соответствующее критической нагрузке значение поглощенной дозы на тело моллюска равно 27 мГр/год, что меньше пороговой (87.2 мГр/год), которая предлагается некоторыми специалистами и экспертами НКДАР ООН или МКРЗ [1, 3, 4].

Выявлены и проанализированы неопределенности как в оценке экологического (радиационного) риска для биоты, так и в определении для наземной биоты пороговой дозы облучения. Обсуждается важный вопрос: оценивается ли риск для всей экосистемы или для определенной популяции организмов, например, моллюска *Bradybaena fruticum*, населяющего данную экосистему.

#### Литература

1. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 // Радиация и риск, 2013. Т. 22. № 1. С. 47-60.

2. Лаврентьева Г.В., Бахвалов А.В., Сынзыныс Б.И., Муллаярова Р.Р. Технология оценки экологического риска для сухопутной экосистемы в условиях хронического радиоактивного загрязнения // Проблемы анализа риска, 2012. Т. 9. № 5. С. 30-43.

3. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. / Под общей ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд-во ООО ПКФ «Алана», 2009.

4. ICRP Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. Ann. ICRP, 2009. Vol. 38. № 4-6. P. 1-242.



---

**CHARACTERISTICS OF ENVIRONMENTAL RISK POPULATIONS BIOTA  
REGIONAL STORAGE LOW LEVEL RADIOACTIVE WASTE**

**B.I. Synzynys, O.A. Mirzeabasov, G.V. Lavrentyeva, R.R. Mullayarova,  
E.A. Mordvinova, O.A. Momot**

Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia,  
[ecology@iate.obninsk.ru](mailto:ecology@iate.obninsk.ru)

Uncertainties in ecological (radiation) risk for biota and determination benchmarks for biota irradiation have being identified and analyzed. A question on risk assessment for the ecosystem as a whole or for the definite population, for example mollusk *Bradybaenafruticum*, only is discussing.

---

**ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
БЕЛОЯРСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ  
НА РЯД ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

**А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, А.П. Платаев**  
Институт экологии растений и животных УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

В 2011 г. исполнилось 47 лет со дня пуска первенца советской промышленной атомной энергетики – Белоярской АЭС им. И.В. Курчатова. Первый энергоблок с канальным водографитовым реактором на тепловых нейтронах АМБ-100 введен в эксплуатацию в 1964 г., второй (АМБ-200) – в 1967 г. В 1980 г. пущен третий энергоблок на быстрых нейтронах – БН-600. К 1989 г. первые два блока были остановлены; в настоящее время функционирует только третий энергоблок. В качестве водоема-охладителя АЭС используется Белоярское водохранилище, которое образовано в 1959-1963 гг. путем зарегулирования русла р. Пышмы в 75 км от ее истока.

Представлены результаты радиоэкологического исследования шести небольших рек, расположенных в радиусе 15 км от Белоярской АЭС, а также самого водоема-охладителя. В природных образцах оценены уровни содержания широкого спектра радионуклидов (в том числе и тех, что не были определены ранее):  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{14}\text{C}$ , а также суммарная  $\alpha$ - и  $\beta$ -активность (рис. 1, 2). Проведен сравнительный анализ уровней содержания  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и частично  $^{60}\text{Co}$  в воде, донных отложениях, ихтиофауне и макрофитах, отобранных в Белоярском водохранилище – водоеме-охладителе Белоярской АЭС в 70- и 80-е годы прошлого века и 2011 г.

Показано, что после вывода из эксплуатации I и II блоков БАЭС концентрация  $^{60}\text{Co}$  в воде Теплового залива Белоярского водохранилища уменьшилась в 800 и более раз, концентрация  $^{137}\text{Cs}$  – более чем в 100. В Промливневом канале содержание  $^{60}\text{Co}$  в воде упало в 5600 раз, содержание  $^{137}\text{Cs}$  – в 386. Фундаментальное значение данного факта заключается в том, что в большом временном диапазоне работают как механизмы самоочищения водной экосистемы от радионуклидов (за счет распада радиоактивных веществ), так и механизмы перераспределения радионуклидов из воды в другие компоненты, прежде всего, в донные отложения. Содержание  $^{60}\text{Co}$  в донных отложениях Теплового залива (затопленная почва) за более чем 20-летний период уменьшилось в 240 раз,  $^{137}\text{Cs}$  – в семь. В донных грунтах Промливневого канала концентрация  $^{60}\text{Co}$  снизилась в 362 раза,  $^{137}\text{Cs}$  – в 44. Наиболее высокое содержание  $^{137}\text{Cs}$  в пробе рдеста гребенчатого отмечено в р. Ольховка, которая в течение многих лет была подвержена сбросам жидких радиоактивных отходов низкого уровня с БАЭС. Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в роголистнике темно-зеленом из Теплового залива Белоярского водохранилища за период 1980-е гг.–2011 г. уменьшилась в 11.5 раз, в рдесте гребенчатом из Промливневого канала – в 383. Концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в роголистнике темно-зеленом из Теплового залива водоема-охладителя за указанный

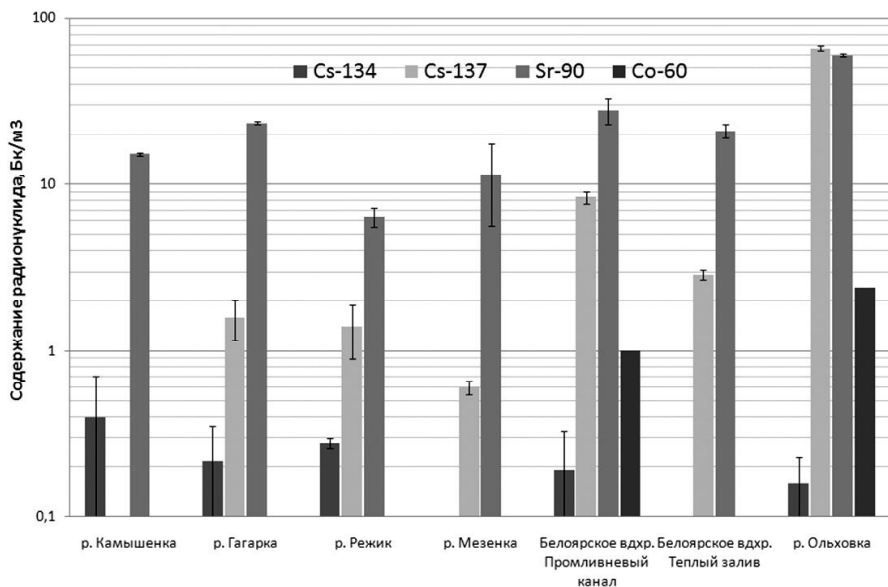


Рис. 1. Содержание Cs-134, Cs-137, Sr-90, Co-60 в воде ряда рек и водоемо-охладителя.

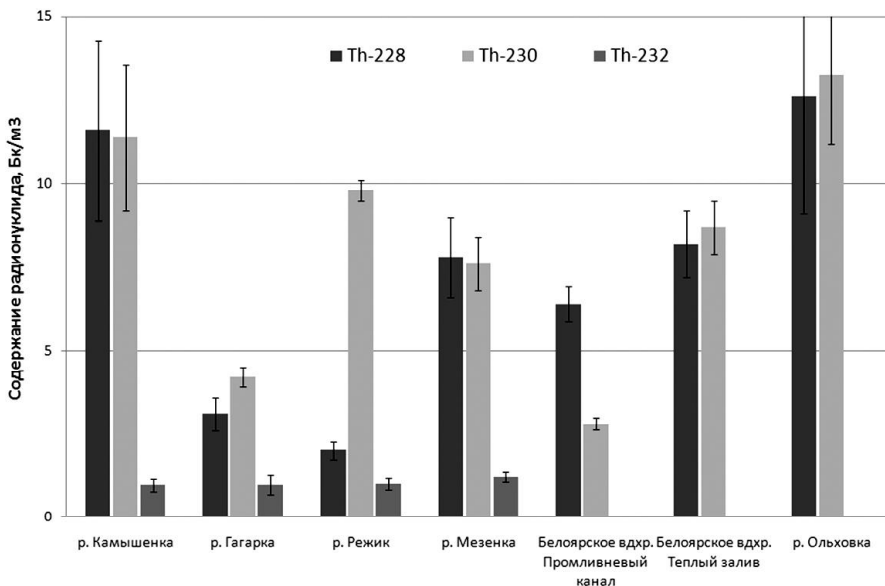


Рис. 2. Содержание Th-228, Th-230, Th-232 в воде ряда рек и водоеме-охладителя.

период, напротив, возросла в два раза. Это можно объяснить тем, что механизм поступления  $^{90}\text{Sr}$  совсем иной, чем для  $^{137}\text{Cs}$ , который поступает в водоем-охладитель через Промливневый канал. В отличие от последнего,  $^{90}\text{Sr}$  имеет глобальное происхождение и практически не сбрасывается в Белоярское водохранилище в результате деятельности атомной станции. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в щуче из Белоярского водохранилища за наблюдаемый период уменьшилось в 8.8 раза. Такой же эффект прослеживается на примере плотвы, содержание  $^{137}\text{Cs}$  в которой снизилось в 25.8 раза.

В шести малых реках, расположенных в зоне наблюдения БАЭС (Ольховка, Каменка, Камышенка, Гагарка, Режик и Мезенка), уровни содержания радиоактивных веществ (исследован 21 радионуклид, а также суммарная  $\alpha$ - и  $\beta$ -активность) максимальны в р. Ольховка, которая в течение ряда лет была подвержена сбросам слабо-радиоактивных вод с Белоярской АЭС. В остальных пяти исследованных реках после 47-летнего периода эксплуатации БАЭС концентрация радионуклидов в основных компонентах водных экосистем, в целом, соответствует уровню регионального фона.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта УрО РАН № 12-И-4-2006, проекта ОФИ УрО РАН № 13-4-006-ЯЦ.

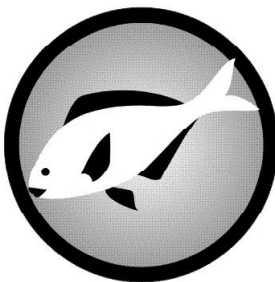
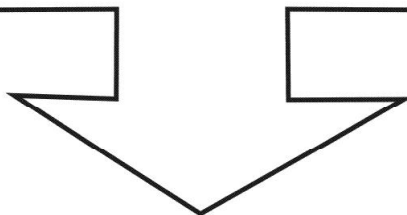
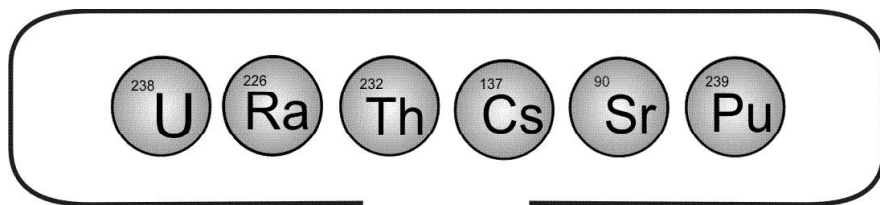
---

**SUMMARY OF LONG-TERM EXPOSURE  
OF THE BELOYARSK NUCLEAR POWER STATION  
ON SOME FRESHWATER ECOSYSTEMS**

**A.V. Trapeznikov, V.N. Trapeznikova, A.V. Korjavin, A.P. Plataev**  
Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg,  
Russia

Presents the results of radioecological research 6 small rivers situated within a radius of 15 km from Beloyarsk nuclear power plant, and the reservoir cooler. It is shown that after decommissioning 1 and 2 block BNPP, the concentration of Co-60 in the warm Gulf Beloyar reservoir has decreased to 800 times, Cs-137 more than 100 times. In the process channel of Co-60 in the water fell in 5600 time, and the content of Cs-137 in 386 times. The fundamental importance of this fact is that in a time range works mechanisms of self-purification of aquatic ecosystems from radionuclides (due to the decay of radioactive substances) and a mechanism for the redistribution of radionuclides from water to other components, particularly, in the bottom sediments.

### Секция 3. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ





## ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ИХ НАСЛЕДОВАНИЕ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРОНИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕНИИ

Л.А. Башлыкова

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[labashlykova@ib.komisc.ru](mailto:labashlykova@ib.komisc.ru)

В последнее время возникла необходимость в исследованиях, которые могли бы установить общие закономерности и особенности реализации лучевых эффектов у потомства облученных организмов. Проведено исследование спонтанного и индуцированного уровня повреждений генома клеток костного мозга полевок-экономок, обитающих в различных радиоэкологических условиях и их потомков. Полевки отловлены в биогеоценозах с нормальным и повышенным уровнем радиоактивности (Республика Коми, Ухтинский район). В условиях радиоактивного загрязнения популяция полевок-экономок обитает уже более 50 лет. Содержание радия-226 в почвах радиевого участка на три порядка выше кларкового уровня, мощность  $\gamma$ -излучения в настоящее время превышает фоновые значения в 10-300 раз и варьирует в пределах 0.5-12.5 мкГр/ч [3]. Потомство от полевок контрольного и радиевого участков получено в условиях вивария ( $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ ). Тестирование животных проведено с использованием уретана. Уретан – один из широко известных канцерогенов-промоторов. Для оценки реакции на действие химического мутагена животным с чистых и загрязненных радионуклидами территорий, а также их потомкам внутрибрюшинно вводили 10%-ный раствор уретана (1 мг/г массы тела), через два дня после тестирования животных декапитировали. Интактным животным вводили эквивалентное массе тела количество физиологического раствора. Цитогенетические эффекты в клетках костного мозга животных оценивали по частоте клеток с микроядрами (МЯ), митотическому индексу (МИ) и доле элиминирующих клеток по типу программированной гибели – апоптозу [8, 9].

Известно, что повреждение ДНК малыми дозами (МД) ионизирующего излучения (ИИ) приводит к возникновению мутаций, генетической нестабильности, бласттрансформации и вызывает ответ живой системы на воздействие [10]. Результаты наших исследова-

ний показывают, что хроническое облучение полевков, обитающих на радиевом участке, вызывает повышение частоты клеток костного мозга с микроядрами в 1.8 раза по сравнению с контрольными животными. Кроме того, у этих животных наблюдается достоверно более низкий митотический индекс, что может свидетельствовать о замедлении митотической активности, возможно, в результате задержки клеточного цикла. Также отмечено увеличение апоптоза, что способствует элиминации клеток с нерепарируемыми повреждениями ДНК. Цитогенетический анализ  $F_1$ - $F_3$  виварного поколения полевков выявил следующее: уровень клеток с микроядрами у потомков контрольного участка постепенно увеличивается от 12‰ у родителей и стабилизируется на уровне 20‰ во втором-третьем поколении. У первого поколения полевков радиевого участка доля клеток с микроядрами снизилась до контрольных значений. В  $F_2$  отмечено повышение МЯ до уровня родителей, обитавших в условиях повышенного фона ИИ (20‰). У третьего поколения продолжается повышение частоты МЯ, и их величина достоверно выше, чем у  $F_3$  контроля (27.7 и 20.0‰ соответственно). К третьему виварному поколению количество делящихся клеток в обеих группах снижается. Динамика уровня апоптоза в поколениях контрольных и облученных животных повторяет характер изменения частоты микроядер – при низкой частоте МЯ апоптоз снижается ( $F_1$ ), при высокой – повышается ( $F_2$ ). У  $F_3$  радиевой группы уровень апоптоза достоверно выше, чем у  $F_3$  контрольных животных, т.е. третье поколение потомков радиевого участка имеет те же отличия от контроля, что и родители по всем исследованным показателям, что свидетельствует о наследовании нестабильности генома и особенностей системы защиты генома животных, обитающих в условиях повышенного радиационного фона.

Провоцирующее действие уретана выявило неодинаковый ответ клеток костного мозга животных, обитавших в различных радиоэкологических условиях, а также у их потомков, полученных в виварии. Введение уретана контрольным животным достоверно увеличивает частоту аберрантных клеток, снижает митотическую активность с 12.3 до 5.9‰, резко уменьшает апоптозную гибель. При воздействии уретана на полевков радиевого участка наблюдается снижение количества клеток с микроядрами. Кроме того, обнаружена минимальная митотическая активность, уровень апоптоза ниже, чем в контроле и при хроническом облучении, но выше, чем после введения уретана контрольным животным. Более низкие показатели выхода генетических повреждений под воздействием уретана на животных, обитавших на территории с повышенным радиационным фоном, могут быть обусловлены тем, что при действии



радиации и химических агентов на живые организмы активируются одни и те же гены, обеспечивающие выживание клеток [7], т.е. мы наблюдаем неспецифический адаптивный эффект к повреждающему агенту нерадиационной природы. Повышение устойчивости к действию дополнительных факторов у животных, испытывающих длительное воздействие повышенной радиоактивности, описывается в ряде работ [1, 2, 4-6]. Можно предположить, что при длительном обитании популяции полевок-экономок в условиях повышенного радиационного фона происходит перестройка работы системы защиты клеток.

Результаты анализа воздействия уретана на первое поколение полевок свидетельствуют об изменении реакции у потомков контрольных животных по сравнению с родителями – уретан не привел к повышению частоты клеток с микроядрами. Снижение пролиферативной активности и повышение апоптоза говорят об активации защитных процессов в клетках контрольных животных. При воздействии уретана на  $F_1$  и  $F_3$  полевок радиевого участка отмечена та же реакция, что и у их родителей – снижение доли клеток с микроядрами. Значительное увеличение апоптоза указывает на повышение элиминации aberrantных клеток с микроядрами. Реакция на уретан  $F_2$  и  $F_3$  контрольных животных возвращается к исходному (родительскому) типу: доля клеток с МЯ под воздействием уретана повышается. Это может свидетельствовать о различной реакции на химический мутаген клеток животных, обитавших в различных радиоэкологических условиях и о трансгенерационной передаче особенностей защиты генома.

Таким образом, у полевок-экономок, обитавших в условиях хронического облучения в течение многих поколений, наблюдается повышение устойчивости клеток костного мозга к действию повреждающих факторов. Можно предположить, что при длительном обитании популяции полевок-экономок в условиях повышенного радиационного фона происходит перестройка работы системы защиты клеток. Сохранение такой же ответной реакции у потомства свидетельствует о трансгенерационной передаче особенностей защиты генома.

Исследования поддержаны грантами РФФИ № 13-04-01750а и РФФИ № 13-04-90351-РБУа.

#### Литература

1. Ильенко А.И., Крапивко Т.П. Ревизия радиорезистентности десятого поколения рыжих полевок (*Clethrionomys glareolus*) – цериофоров // ДАН СССР, 1991. № 2. С. 498-500.

2. *Лозина-Лозинский Л.К.* Устойчивость к различным внешним агентам парамедий, адаптированным к жизни в горячем радиоактивном источнике // Цитология, 1961. Т. 3. № 2. С. 154-166.

3. *Маслов В.И.* О проведении комплексных радиэкологических исследований в биогеоценозах с повышенной радиоактивностью // Радиэкологические исследования в природных биогеоценозах. М.: Наука, 1972. С. 9-21.

4. *Монастырский О.А., Половинкина Р.А.* Некоторые особенности роста и размножения полевки узкочерепной при действии повышенного фона радиации в природных условиях и эксперименте // Вопросы зоологии: Матер. к III совещанию зоологов Сибири. Томск, 1966. С. 224-225.

5. *Раушенбах Ю.О., Монастырский О.А.* Исследование адаптации животных к повышенному фону радиации // Влияние ионизирующих излучений на наследственность. М.: Наука, 1966. С. 165-176.

6. *Фетисов А.Н., Смагин А.И., Рубанович А.В.* Морфометрическая характеристика и сравнительная радиоустойчивость популяции прудовика большого (*Limnea stagnalis*) из водоемов с различными радиэкологическими условиями // Радиобиология, 1993. Т. 33. № 1. С. 160-165.

7. *Шапошников М.В., Плюснина Е.Н., Плюснин С.Н.* и др. Анализ экспрессии генов как метод детектирования малых доз ионизирующих излучений, формальдегида и диоксинов // Теор. и прикл. экология, 2013. № 2. С. 25-33.

8. *Gorman A., McCarthy J., Finucane D.* et al. Morphological assessment of apoptosis // Techniques in apoptosis a user's guide, 1996. P. 3-11.

9. *Heddle J.A.* A rapid in vivo test for chromosomal damage // Mutat. Res., 1973. Vol. 18. P. 187-190.

10. *Kadhim M., Salomaa S., Wright E.* et al. Non-targeted effects of ionizing radiation-Implications for low dose risk // Mutat. Res., 2013. Vol. 752. № 2. P. 84-98.

## LONG-TERM EFFECTS OF CHRONIC EXPOSURE TO CYTOGENETIC AND INHERITANCE

**L.A. Bashlykova**

Institute of Biology, Komi Science Centre, Syktyvkar, Russia,  
[labashlykova@ib.komisc.ru](mailto:labashlykova@ib.komisc.ru)

Chronic exposure causes DNA damage, as evidenced by the increased level of cells with micronuclei. The cells of animals that live a long time in conditions of chronic low-dose irradiation, actively resist the damaging effects of ionizing radiation. This generates a non-specific adaptation to damaging agents of different nature. Perhaps there is a reorganization of the system of protection of cells, which is inherited.

## ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ НА АНТРОПОГЕННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ЕСТЕСТВЕННЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИЯХ

Е.С. Белых<sup>1</sup>, Т.А. Майстренко<sup>1</sup>, А.В. Канева<sup>1</sup>, Б.И. Груздев<sup>1</sup>,  
О.М. Вахрушева<sup>1</sup>, А.В. Трапезников<sup>2</sup>, В.Г. Зайнуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

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

Известно, что растительность наряду с типом почвы является одним из ключевых компонентов наземных экосистем. Ведущие прикрепленный образ жизни наземные растения [4] одними из первых реагируют на загрязнение почвы тяжелыми металлами, радионуклидами, токсичными органическими соединениями, что может приводить к изменению видового разнообразия и структуры сообществ [5]. Исследование устойчивости экосистем и их способности к восстановлению после антропогенного воздействия, в частности, в условиях техногенно повышенного радиационного фона важно для планирования мероприятий по сохранению биологического разнообразия.

Цель нашего исследования – поиск взаимосвязи между уровнем загрязнения почвы тяжелыми естественными радионуклидами и тяжелыми металлами и видовым разнообразием растительных ассоциаций.

Изучение видового разнообразия растительных сообществ проводили в окрестностях пос. Водный (Республика Коми). Здесь в 30-50-е гг. прошлого века велась добыча радия из пластовых вод и отходов урановой промышленности. Для исследования были выбраны три экспериментальных участка, различающиеся уровнем техногенного воздействия, спектром основных загрязняющих веществ и положением в ландшафте.

Мощность дозы внешнего облучения в воздухе пробных площадок, расположенных на территории необорудованного хранилища радиоактивных отходов, варьирует в пределах от 0.3 до 7.0 мкЗв/ч. Удельная активность <sup>226</sup>Ra изменяется от значений, незначительно превышающих фоновое содержание ( $0.10 \pm 0.02$  кБк/кг), до очень высоких ( $14 \pm 1$  кБк/кг). Мощность взвешенной поглощенной дозы, обусловленная присутствием <sup>226</sup>Ra в субстрате и поступлением его в биомассу травянистых растений, варьирует от  $0.6 \pm 0.1$  до  $49 \pm 17$  мкГр/ч. К настоящему времени на территории хранилища сформировались сообщества злаково- и осоково-разнотравной ассоциации.

Пробные площадки, расположенные на территории бывших радиевых заводов, отличаются спектром радионуклидов и меньшим

уровнем техногенного воздействия. В данной радиоэкологической ситуации загрязнение почвы обусловлено продуктами переработки пластовых вод с высоким содержанием  $^{226}\text{Ra}$  [2]. Растительность площадок представляет собой разнотравно-злаковое сообщество. Уровень  $\gamma$ -фона составляет  $1.2 \pm 0.4$  мкЗв/ч. Удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  в почве варьирует от  $0.02 \pm 0.01$  до  $1.9 \pm 0.7$  кБк/кг почвы. Рассчитанная мощность взвешенной поглощенной дозы для травянистых растений, обусловленная содержанием  $^{226}\text{Ra}$  на этом участке, изменяется от  $0.10 \pm 0.03$  до  $10.7 \pm 4.1$  мкГр/ч.

В качестве контрольных выбраны участки, расположенные в сходных с радиоактивно загрязненными площадками эдафотопических условиях и близкие по флористическому составу. Средняя мощность дозы  $\gamma$ -излучения в воздухе контрольных участков типична для данного региона и составляет  $0.12 \pm 0.03$  мкЗв/ч. Суммарное содержание тяжелых металлов составляет 0.10-0.14 г/кг почвы, удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  в почве незагрязненных радионуклидами участков –  $32 \pm 14$  Бк/кг почвы. Таким образом, содержание неорганических поллютантов в почве контрольных участков не превышает региональных фоновых значений [1]. Рассчитанная мощность взвешенной поглощенной дозы для травянистых растений на контрольных площадках в среднем составляет  $0.2 \pm 0.1$  мкГр/ч.

Основой для флористического анализа послужили видовые списки 64 геоботанических описаний, которые составлены в июле 2012 и 2013 гг. на участках с естественной растительностью, характеризующихся фоновым и повышенным содержанием в почве тяжелых естественных радионуклидов. На исследуемой территории отмечено 134 вида травянистых растений, принадлежащих к 34 семействам. Наиболее богаты представителями семейства *Poaceae* (19 видов, 14 родов), *Asteraceae* (17, 14), *Rosaceae* (14, 11) и *Fabaceae* (10, 4). Семейства *Ranunculaceae* и *Cariophyllaceae* представлены девятью видами, относящимися к шести родам, остальные – одним-пятью видами. На контрольных площадках зарегистрировано 95 видов сосудистых растений, на территориях бывших радиохимических заводов – 87. Наименее разнообразны по видовому составу участки, расположенные на территории хранилища радиоактивных отходов: здесь отмечено всего 75 видов сосудистых растений. Преобладающей жизненной формой луговых сообществ как на участках с повышенным содержанием в почве тяжелых естественных радионуклидов (ТЕРН), так и на контрольных, являются многолетние травы. На учетных площадках хранилища радиоактивных отходов, а также бывших заводов по производству радия отмечено девять видов однолетних растений с незначительным проективным покрытием. Отмечается также внедрение древесных растительных

форм (видов рода *Salix*, *Betula*, а также *Picea abies* и *Pinus sylvestris*) в растительный покров как экспериментальных, так и контрольных участков.

Географический анализ видового состава показал преобладание на всей исследованной территории видов бореальной широтной группы (табл. 1). Так, на контрольных участках (1) 78.7% растений относится к этой широтной группе, на территории хранилища радиоактивных отходов (2) и бывших заводов по производству радия (3) – 82.6 и 84.0 соответственно. Полизональная группа составляет 11.7, 10.6 и 8.1% соответственно, также отмечены растения лесостепной, бореально-неморальной и гипоарктической групп.

Среди долготных групп на всех изученных участках более половины составляют виды с широким евроазиатским ареалом (табл. 1), около 20% – виды голарктической и 9-12% – европейской групп.

Почвы изученных участков характеризуются средней степенью увлажнения, что отражается в преобладании в биоценозе мезофитных видов (табл. 2).

Расчет индекса относительного обилия видов подтвердил достоверное ( $p < 0.05$ ) снижение видового разнообразия учетных площадок на территории хранилища отходов радиевого производства. Среднее значение индекса Шеннона, рассчитанное для этих площадок, составило  $3.1 \pm 0.3$ , тогда как для пробных площадок, расположенных на территориях бывших радиевых заводов, и контрольных –  $4.1 \pm 0.5 \pm 3.9 \pm 0.4$  соответственно.

Близкие значения показателя видового разнообразия для пробных площадок с территорий заводов по производству радия и контрольных, а также близкие значения числа зарегистрированных видов свидетельствуют о восстановлении исходных фитоценозов на исследуемых территориях, в то время как на площадках с территории хранилища радиоактивных отходов полного восстановления растительной компоненты экосистемы не произошло.

Мы предположили, что на видовое разнообразие исследуемых участков могут оказывать воздействие как антропогенные, так и

Таблица 1

**Географическая структура видового состава сосудистых растений на изученных участках (доля видов, %)**

Участки	Широтные группы			Долготные группы			
	Бореальные	Полизональные	Прочие	Евроазиатские	Голарктические	Европейские	Прочие
1	78.7	11.7	9.6	60.6	22.3	12.8	4.3
2	82.6	10.6	5.3	60.0	25.3	9.3	5.3
3	84.0	8.1	9.3	64.0	19.8	12.8	3.5

Таблица 2

**Экологическая структура видового состава сосудистых растений  
на изученных участках (доля видов, %)**

Участки	Экологические группы				
	Мезофиты	Ксеромезо- фиты	Гигрофиты	Гигромезо- фиты	Прочие
1	53.3	9.3	17.3	16.0	4.0
2	69.1	9.3	8.1	12.8	2.3
3	69.4	10.6	6.4	11.7	2.1

природные факторы. Среди последних, определяющих многообразие условий местообитания организмов, учитывали следующие показатели: высоту над уровнем моря, содержание в почве нефтепродуктов, а также гумуса, азота, фосфора и калия, влияющих на рост и развитие растений. Кроме того, в исследуемой радиэкологической ситуации видовой состав может изменяться при действии антропогенных факторов: дозы облучения, содержания в почве тяжелых металлов, а также высоких концентраций минеральных солей, использовавшихся в технологическом процессе извлечения и концентрирования радия – кальция, бария, сульфатов и хлоридов.

Предыдущие исследования [3] не выявили достоверной связи между уровнем внешнего  $\gamma$ -фона и распространением отдельных видов на пробных площадках. Проведенный нами в ходе исследования корреляционный анализ также показал отсутствие достоверной зависимости видового разнообразия от уровня внешнего  $\gamma$ -фона: значения парных коэффициентов корреляции Спирмена для индекса Шеннона и числа видов на пробной площадке составили – 0.29 и –0.25 соответственно. Однако величина коэффициента корреляции между мощностью взвешенной поглощенной дозы, рассчитанной для травянистых растений изученных участков, и видовым богатством растительных ассоциаций оказалась достоверно значимой ( $r = -0.4$ ;  $p < 0.001$ ).

Работа поддержана проектами № 12-И-4-2006 УрО РАН и STProject-060 EANOR.

#### Литература

1. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар, 2010. 356 с.
2. Груздев Б.И., Маслов В.И., Маслова К.И. и др. К вопросу об эффективности дезактивации радиевых загрязнений насыпным методом // Материалы радиэкологических исследований в природных биоценозах. Сыктывкар, 1971. С. 77-90.
3. Закономерности распределения, перераспределения и миграции радиоактивных элементов в различных компонентах природных биогеоценозов и биологическое действие повышенной радиоактивности на орга-

низм и популяции животных и растений в различных радиоэкологических условиях: Научный отчет / Коми научный центр УрО РАН; Рук. П.П. Вавилов, В.И. Маслов. Сыктывкар, 1975.

4. *Mulder Ch., Breure A.M.* Plant biodiversity and environmental stress // Bioindicators and biomonitors. Elsevier Science Ltd., 2003. P. 501-525.

5. *Sienkiewicz J.* Effect of heavy-metals industry on plant communities // The Science of the Total Environment, 1986. Vol. 55. P. 339-349.

#### VASCULAR PLANT SPECIES DIVERSITY ON TERRITORIES WITH ENHANCED AND BACKGROUND LEVELS OF NATURAL ORIGIN RADIONUCLIDES AND HEAVY METALS IN SOIL

E.S. Belykh<sup>1</sup>, T.A. Maystrenko<sup>1</sup>, A.V. Kaneva<sup>1</sup>, B.I. Grusdev<sup>1</sup>, O.M. Vakhrusheva<sup>1</sup>,  
A.V. Trapeznikov<sup>2</sup>, V.G. Zainullin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biology of Komi SC of the Ural Branch of RAS, Syktывkar, Russia

<sup>2</sup> Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of RAS,  
Yekaterinburg, Russia

Vascular plant species richness and diversity was studied on territory contaminated by uranium mill tailings and radium production wastes. At present plant communities on the contaminated area, number 87 and 75 vascular plant species on the former radiochemical plants and radium production wastes storage area respectively. 95 species were recorded on the reference site. Shannon index value for the wastes storage ( $3.1 \pm 0.3$ ) was significantly differ from the ones for the reference site and radiochemical plants territory ( $3.9 \pm 0.4$  and  $4.1 \pm 0.5$  respectively). A relationship between vascular plant species diversity and weighted absorbed dose was found (correlation coefficient was equal to  $-0.4$ ,  $p < 0.001$ ).

#### ОЦЕНКА РЕПРОДУКТИВНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕМЯН *URTICA DIOICA* ИЗ ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ВБЛИЗИ КИРОВО-ЧЕПЕЦКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

О.М. Вахрушева, Т.И. Евсеева

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[Nimf04ka@mail.ru](mailto:Nimf04ka@mail.ru)

Растения являются основным средообразующим компонентом в экосистемах и начальным звеном пищевых цепей, что делает их важнейшим объектом для оценки состояния окружающей природной среды [2]. Сообщества сосудистых растений, произрастающих в природно-промышленной зоне Кирово-Чепецкого химического комбината (КЧХК), подвергаются влиянию его производственной деятельности с 1938 г.

Цель работы – оценить репродуктивную способность крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.), произрастающей вблизи территории Кирово-Чепецкого химического комбината.

Использование именно этого вида обусловлено его повсеместной встречаемостью, существованием в широком диапазоне экологических условий, высокой семенной продуктивностью и длительной продолжительностью жизни. Семена растений собирали по мере их созревания в августе-сентябре 2011 и 2012 гг. с участков, расположенных в природно-промышленной зоне КЧХК и различающихся уровнем загрязнения почвенного покрова, а также с контрольного участка (пойма р. Вятки). Одновременно отбирали пробы почв для определения их физико-химических свойств и оценки концентрации тяжелых металлов (Cu, Ni, Zn, Pb, Cd, Hg) и удельных активностей радиологически значимых радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ). Для исследованных участков оценивали экологические показатели уровня радиоактивного ( $C_r$ ) и химического ( $C_m$ ) загрязнения почвенного покрова [4].

Семена проращивали в чашках Петри на влажном субстрате из прокаленного песка, 22-25 °С в условиях комбинированной подсветки (80000 люкс, 10 ч). Для полива использовали дистиллированную воду, поскольку в покоящихся семенах содержится достаточное для прорастания количество питательных веществ [1]. В каждую чашку Петри помещали по 100 семян, всего проанализировано 300 семян с каждой площадки. Продолжительность экспериментов составляла 21 день. Репродуктивную способность растений оценивали стандартными методами по показателям: всхожесть семян, энергия прорастания и выживаемость проростков.

Эксперименты по изучению репродуктивной способности природных популяций крапивы двудомной с территории вблизи КЧХК показали, что всхожесть семян со всех площадок на втором экспериментальном участке, расположенном в гривистой пойме р. Вятки, достоверно ниже контрольного уровня (см. таблицу).

Энергия прорастания семян крапивы достоверно коррелирует со всхожестью ( $r = 0.674$ ,  $p < 0.01$ ). Этот показатель ниже у семян с экспериментальных участков по сравнению с наблюдаемым в контрольной ценопопуляции.

Всхожесть семян достоверно связана с общим уровнем радиоактивного ( $r = -0.66$ ,  $p < 0.01$ ) и химического ( $r = -0.77$ ,  $p < 0.01$ ) загрязнения почв. Проверка пригодности различных регрессионных моделей показывает, что зависимость всхожести семян крапивы от уровня радиоактивного и химического загрязнения среды обитания наилучшим образом описывается экспоненциальной функцией, имеющей коэффициент детерминации  $R^2 = 0.80$  ( $p < 0.001$ ). Качество аппроксимации исследуемой зависимости линейной моде-



**Жизнеспособность семян крапивы двудомной,  
произрастающей на участках с разным уровнем загрязнения**

Участок	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Выживаемость, %	C <sub>m</sub>	C <sub>r</sub>
К	69±8.02	42±11.05	78±6.50	1	1
1.7	50±10.14	48±15.50	53±6.50	10	9
1.9	55±8.96	70±2.02	65±2.18	16	22
1.15	41±12.05	49±9.05	24±2.51	4	4
1.16	48±11.9	63±10.01	56±4.10	6	8
1.18	34±10.21	66±2.18	26±4.41	25	29
2.3	40±7.01*	45±5.05*	44±4.10*	60	64
2.5	20±10.41*	43±7.10*	47±10.05*	215	171
2.7	28±9.05*	48±5.50*	25±4.50*	236	525
2.13	23±9.61*	56±6.33*	64±4.50*	373	412

*Примечание.* \* Отличия от контроля достоверны при  $p < 0.05$ .

лью оказалось ниже ( $R^2 = 0.60$ ,  $p < 0.01$ ), при том же числе степеней свободы.

Таким образом, крапива двудомная оказалась чувствительной к техногенному воздействию. Анализируемые факторы оказали достоверное влияние на репродуктивную способность данного вида. Всхожесть и энергия прорастания семян крапивы с экспериментальных участков ( $39 \pm 7$ ;  $56 \pm 5$ ) были ниже контрольного уровня ( $69 \pm 2$ ;  $78 \pm 1$ ) и зависели экспоненциально ( $R^2 = 0.80$ ,  $p < 0.001$ ) от уровня радиоактивного и химического загрязнения почв.

#### Литература

1. *Ермакова И.М.* Одуванчик лекарственный. Номенклатура и система. Положение // Биологическая флора Московской области. М., 1990. Т. 8. С. 210-269.
2. *Ильин В.Б., Сысо А.И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск, 2001. 236 с.
3. *Позолотина В.Н.* Отдаленные последствия действия радиации на растения. Екатеринбург: Академкнига, 2003. 244 с.
4. *Geras'kin S., Oudalova A., Michalik B. et al.* Geno-toxicity assay of sediment and water samples from the Upper Silesia post-mining areas, Poland by means of Allium-test // Chemosphere, 2011. Vol. 83. P. 1133-1146.

ASSESSMENT OF REPRODUCTIVE CAPACITY  
OF *URTICA DIOICA* SEEDS SAMPLED FROM NATURAL POPULATIONS  
FROM KIROVO-CHEPETSK CHEMICAL PLANT

O.M. Vakhrusheva, T.I. Evseeva

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,  
Syktyvkar, Russia, [Nimf04ka@mail.ru](mailto:Nimf04ka@mail.ru)

Reproductive capacity of *Urtica dioica* L. natural populations from territories around Kirovo-Chepetsk chemical plant was assessed. Seed germination was found to be exponentially ( $R^2 = 0.80$ ,  $p < 0.001$ ) dependent from soil radioactive and chemical contamination.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛИСТЬЕВ ТРОСТНИКА ОБЫКНОВЕННОГО  
ПОД ВЛИЯНИЕМ ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Д.Д. Ганжа<sup>1</sup>, А.Б. Назаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Централизованное предприятие по обращению с радиоактивными отходами, Чернобыль, Украина, [dmgan@rambler.ru](mailto:dmgan@rambler.ru)

<sup>2</sup> Чернобыльский спецкомбинат, Чернобыль, Украина, [nazarov42t@rambler.ru](mailto:nazarov42t@rambler.ru)

В условиях Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) под влиянием хронического радиационного облучения в течение ряда лет наблюдаются радиобиологические эффекты у растений тростника обыкновенного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.). Было показано действие радионуклидного загрязнения на листья тростника на физиологическом, морфологическом и анатомическом уровнях [1, 2]. При проведении полевых и лабораторных исследований в ЧЗО нами замечено, что изменяются механические свойства листьев тростника в различных условиях радиационного облучения в ЧЗО.

Цель данного исследования – оценка механических характеристик листьев тростника обыкновенного (разрывной прочности листьев, толщины и ширины в месте разрыва) под влиянием различного уровня хронического радиационного облучения.

Наблюдения проведены в условиях разного уровня радионуклидного загрязнения на шести водоемах ЧЗО – пруд-охладитель Чернобыльской АЭС, озера Азбучин, Глубокое и Далекое, Яновский затон р. Припять, берег р. Припять в районе Чернобыля (рис. 1). Пробы с последнего из названных мест использованы в качестве местного фона. Исследования проведены в 2011-2013 гг. На протяжении всего периода наблюдений отбирали пробы воды. Пробы почвы отобраны в литоральной зоне водоемов в 2011 г., листьев тростника для из-

Рис. 1. Расположение мест наблюдения на территории ЧЗО.

мерения механических параметров – в июле 2013 г.

В пробах воды, а также в воздушно-сухих пробах почвы и листьев тростника обыкновенного измеряли удельную активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . В пробах воды, а также в водных вытяжках из почвы и растений, приготовленных путем водной экстракции (из проб почвы экстракция химических элементов проведена согласно ГОСТ 27753.2-88, из листьев тростника – ГОСТ 26180-84), измеряли кондуктивность (мкСм/см) и концентрацию ионов (электрохимически с использованием ион-селективных электродов)  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , мг/дм<sup>3</sup>.

В качестве механических характеристик листьев тростника обыкновенного применены разрывная нагрузка (кг), толщина (см) и ширина (см) листьев в месте разрыва. Разрывную нагрузку ( $P_p$ ) измеряли с помощью цифровых весов в момент разрыва листьев при их растяжении. По результатам проведенных испытаний рассчитывали относительную разрывную нагрузку листьев ( $P_o$ , кг/см<sup>2</sup>) по формуле  $P_o = P_p \cdot S_c^{-1}$ , где  $S_c$  – оценка площади поперечного сечения листьев тростника обыкновенного, рассчитанная как произведение измеренной ширины листьев в месте разрыва на их усредненную толщину, рассчитанную по результатам измерения толщины листьев слева, справа от центральной жилки и на центральной жилке в месте разрыва.

Все измерения проведены с суммарной относительной погрешностью, которая не превышала  $\pm 30\%$ . Результаты измерений подвергнуты корреляционному и регрессионному анализу.

Полученные результаты показывают, что значение относительной разрывной нагрузки листьев тростника в местах наблюдения изменяется более чем в 2.5 раза (см. таблицу).

По результатам корреляционного анализа обнаружена средней силы связь концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в листьях тростника и прикорневом слое почвы со значениями относительной разрывной нагрузки листьев, которая характеризуется коэффициентами детерминации 0.57 и 0.47 соответственно. Зависимости значения  $P_o$  от концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в указанных средах не обнаружено. Вместе с тем, наблюдается слабая связь между значением  $P_o$  и концентрациями  $^{90}\text{Sr}$  в воде



## Результаты оценки разрывной нагрузки листьев тростника обыкновенного

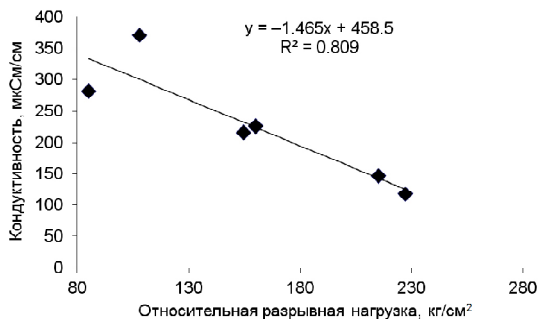
Место наблюдений	Количество наблюдений	Ширина листьев, см	Дисперсия	$P_o$ , кг/см <sup>2</sup>	Дисперсия
Озеро Азбучин	37	24	44	160	8594
Пруд-охладитель ЧАЭС	23	37	4.2	85	727
Озеро Глубокое	35	25	12	215	3432
Озеро Далекое	34	24	16	227	5463
Река Припять (Чернобыль)	33	31	22	108	935
Яновский затон	33	29	21	155	2597

водоемов и водной вытяжке из листьев с коэффициентами детерминации 0.37 и 0.31 соответственно. Все названные связи – нелинейные и наилучшим образом описываются степенной зависимостью.

При проведении наблюдений установлено, что более узкие и короткие, но вместе с тем плотные листья встречаются в местах с большими уровнями радионуклидного загрязнения водных экосистем. Данные таблицы показывают, что более узкие листья с высоким значением относительной разрывной нагрузки приурочены к более загрязненным радионуклидами экосистемам озер Азбучин, Глубокое и Далекое. Значение относительной разрывной нагрузки листьев обратно связано с шириной листьев при коэффициенте детерминации 0.66. Сравнение суммарной активности водоемов в местах наблюдений с шириной листьев тростника показывает слабую обратную корреляционную связь, которая проявляется с коэффициентом детерминации 0.23. Таким образом, в местах наблюдений в условиях хронического радиационного облучения, преимущественно под влиянием инкорпорированного <sup>137</sup>Cs, имеет место относительное увеличение массы механических тканей в листьях тростника, что, очевидно, происходит за счет сокращения продуктивных тканей.

Установленная закономерность формирования механических характеристик листьев тростника в зависимости от радионуклидного загрязнения нарушается в условиях обогащения водных экосистем химическими элементами минерального питания растений. В таких условиях формируются более крупные, тонкие листья, соответственно, с относительно более развитыми продуктивными тканями. В местах наблюдений эта закономерность проявляется через тесную обратную связь между значениями  $P_o$  и кондуктивности воды водоемов при значении коэффициента детерминации 0.9 (рис. 2). В свою очередь, кондуктивность воды тесно связана с концентрацией растворенных ионов Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> с коэффициентами корреляции 0.9, 0.4, 0.8 соответственно. В условиях пруда-охладителя ЧАЭС

Рис. 2. Связь между относительной разрывной нагрузкой листьев тростника обыкновенного и кондуктивностью воды водоемов в местах наблюдения.



наблюдается также обогащенность воды фосфатами, по концентрации которых в воде этот водоем превосходит прочие места наблюдений в 1.3-5.0 раз.

Накопленные листьями тростника ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , измеренные в водной вытяжке, пребывают в сильной обратной связи со значением  $P_0$ , которая описывается коэффициентами корреляции 0.80, 0.86, 0.94, 0.77 соответственно.

Полученные данные показывают, что в условиях хронического радиационного облучения изменяются механические характеристики листьев тростника обыкновенного, что проявляется в положительном изменении относительной разрывной нагрузки. Механические характеристики листьев тростника пребывают в сложной зависимости от действия радиационного облучения и компонентов минерального питания растения. Изложенный метод может быть применен для оценки качества окружающей среды в условиях радиационного загрязнения водных экосистем.

### Литература

1. Ганжа Д.Д., Ганжа Х.Д., Назаров О.Б. Накопичення  $^{90}\text{Sr}$  й  $^{137}\text{Cs}$  та фізіологічна реакція очерету звичайного в умовах радіаційного забруднення водних екосистем: Тези доповідей XX щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень НАН України. Київ: КОПІ Центр, 2013. С. 179-180.

2. Ганжа Д.Д., Назаров А.Б., Рыбалка В.Б., Петелин Г.И. Изменения жилкования листьев тростника обыкновенного под воздействием инкорпорированных радионуклидов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. IV Междунар. конф. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. С. 139-142.

## CHANGES IN MECHANICAL CHARACTERISTICS IN PHRAGMITES COMMUNIS RESULTED FROM RADIOACTIVE IRRADIATION CHRONIC EFFECT

D.D. Ganja<sup>1</sup>, A.B. Nazarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unitized enterprise on radioactive wastes use, Chernobyl, Ukraine,  
[dmgan@rambler.ru](mailto:dmgan@rambler.ru)

<sup>2</sup> State enterprise "Chernobyl special works", Chernobyl, Ukraine,  
[nazarov42t@rambler.ru](mailto:nazarov42t@rambler.ru)

The investigation of mechanical properties of leaves *Phragmites australis* in conditions of chronic exposure to radiation in the Chernobyl exclusion zone. From the measurements, width, thickness and breaking load of leaves calculated the relative breaking load of plant leaves. The relationship of the studied mechanical properties of reed leaves with radionuclide contamination of aquatic ecosystems. The presented method can be used to assess the quality of the environment in terms of radiation contamination of aquatic ecosystems.

## МИГРАЦИИ ГРЫЗУНОВ В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ У НАСЕЛЕНИЯ НА СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Е.Б. Григоркина, Г.В. Оленев, С.Б. Ракитин

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург,  
Россия, [grigorkina@ipae.uran.ru](mailto:grigorkina@ipae.uran.ru), [rakitin@ipae.uran.ru](mailto:rakitin@ipae.uran.ru)

На большом статистическом материале, полученном в течение четырехлетнего массового мечения животного населения тетрациклиновой меткой, изучены миграции грызунов в зоне влияния Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа) – результата Кыштымской радиационной аварии 1957 г. Показано, что на узкой и протяженной территории ВУРСа за короткое время грызуны могут преодолевать значительные пространства, сопоставимые с поперечными размерами загрязненной зоны, что приводит к формированию населения с меняющимся составом. Доля мигрантов с ВУРСа на сопредельные территории в разные годы и сезоны варьировала от 5 до 30% [2]. Среди мигрантов – грызуны разной экологической специализации (малые лесные и полевые мыши, красные, серые и даже водяные полевки, местообитания которых приурочены к околородным биотопам). Лесных и полевых мышей, а также красных полевок отлавливали на весьма значительном удалении от участков мечения (9 км), в том числе за пределами радиационного заповедника, что является убедительным доказательством отсутствия изоляции.

Следствием миграций животных является перенос радиационно-индуцированных эффектов на сопредельные территории, где можно ожидать увеличения генетического разнообразия, индуцированного мутациями *de novo*. Об этом свидетельствуют данные исследования хромосомной нестабильности в клетках костного мозга обыкновенных полевок, носители которой были отловлены за пределами радиационного заповедника [1]. Кроме того, нами [4] проанализирована изменчивость четырех микросателлитных локусов: MSCg4, MSCg9, MSCg15, LIST-3-003 [6, 7]. На основе анализа изменчивости микросателлитной ДНК обнаружена тенденция к повышению некоторых показателей генетического разнообразия в выборке красных полевок с сопредельного радиационному заповеднику фонового (Метлино) участка, по сравнению с этими же параметрами у грызунов из зоны ВУРСа и географически удаленного (расстояние 220 км) контроля (Шигаево) (табл. 1).

Показатель инбредности  $F_{IS}$ , вычисленный по всем локусам, оказался статистически незначимым в изученных выборках. Межпопуляционная генетическая дифференциация, оцененная на основе дисперсии частот аллелей микросателлитных локусов ( $F_{ST}$ ) (табл. 2), показала значимые различия генетической структуры импактной (ВУРС) и удаленной референтной (Шигаево) группировок (табл. 2). Различия между группировками из зоны ВУРСа и сопредельной территории (Метлино) оказались на границе 5%-ного уровня значимости. При этом фоновые выборки (Метлино и Шигаево) не обнаружили значимой межпопуляционной дифференциации, несмотря на значительное расстояние между ними (220 км).

Таблица 1

Показатели генетического разнообразия в трех выборках красной полевки, усредненные по четырем микросателлитным локусам [4]

Показатель	Локалитет		
	ВУРС	Метлино	Шигаево
Число животных	24	15	28
$H_E$	0.867	0.849	0.845
$H_O$	0.906	0.867	0.857
$F_{IS}$	-0.046	-0.022	-0.015
Среднее число аллелей на локус	10	9.25	9.25
Число уникальных аллелей	1	3	1
Аллельное разнообразие	9.07	9.25	8.46
Индекс Гарза-Вильямсона	0.513	0.388	0.470

Примечание.  $H_E$  – средняя ожидаемая гетерозиготность,  $H_O$  – средняя наблюдаемая гетерозиготность;  $F_{IS}$  – показатель инбредности.

Таблица 2

Оценки генетической дифференциации популяций красной полевки с использованием четырех микросателлитных локусов (под диагональю приведены значения *Fst*-статистики, над диагональю – значения вероятности) [4]

Локалитет	Зона ВУРСа	Поселок Метлино	Село Шигаево
Зона ВУРСа		0.052	<b>0.010*</b>
Поселок Метлино	0.01189		0.073
Село Шигаево	0.01549	0.01147	

Примечание. \* Отмечены достоверные различия значений *Fst* ( $p < 0.05$ ).

Исходя из полученных данных, мы предполагаем, что территории, прилегающие к Восточно-Уральскому радиационному заповеднику, представляют собой уникальный полигон (зона влияния ВУРСа) для оценки роли повышенной частоты мутаций в процессах микроэволюции природных популяций. Вокруг ВУРСа создается зона с населением, несущим в себе последствия контакта с загрязнителем – своеобразное продолжение зоны на уровне биологических эффектов. Миграции на узкой и протяженной территории ВУРСа существенно снижают возможность передачи и закрепления адаптивных наработок в чреде поколений у грызунов вагильных, т.е. свободно перемещающихся в пространстве, видов [2, 8]. Подтверждением тому являются выявленные нами [3] существенные качественные и количественные изменения в гемопозитической и иммунной системах лесных и полевых мышей из зоны ВУРСа, повышенная частота встречаемости клеток с микроядрами и более высокий уровень хромосомной нестабильности в клетках костного мозга [5].

Любая зона техногенного загрязнения специфична не только по спектру поллютантов, но по конфигурации и размерам. Мелкие млекопитающие, обитающие на обширной площади Чернобыльского загрязнения, несмотря на миграции, подвергаются хроническому воздействию ионизирующей радиации в чреде многих поколений. Этого времени достаточно не только для формирования разного рода биологических эффектов, но и для закрепления их в геноме [9]. Зона ВУРСа имеет другой тип конфигурации – узкая протяженная территория, биологические эффекты проявляются, но подвержены постоянному «размыванию» за счет непостоянства состава населения [2, 8]. Роль миграционного фактора и значение конфигурации зоны загрязнения следует учитывать в широком спектре исследований при интерпретации многочисленных и неоднозначных биологических эффектов, наблюдаемых у животных, населяющих зоны локального техногенного загрязнения.



Таким образом, многолетнее массовое мечение мелких млекопитающих тетрациклиновой меткой в зоне влияния ВУРСа выявило: 1) определяющую роль миграций и 2) значимость конфигурации зоны загрязнения в радиоадаптации животных. Следствием действия этих факторов является перенос радиационно-индуцированных эффектов у животных на сопредельные территории и снижение возможности закрепления адаптивных наработок в чреде поколений у грызунов вагильных видов. Полученные результаты вносят вклад в развитие теории экологических механизмов адаптации и могут быть использованы в широком спектре исследований при анализе отдаленных последствий у мелких млекопитающих в любых зонах локального техногенного загрязнения.

Работа поддержана Президиумом РАН проект № 12-П-4-1071.

#### Литература

1. Гилева Э.А., Любашевский М.Н., Стариченко В.И. и др. Наследуемая хромосомная нестабильность у обыкновенной полевки (*Microtus arvalis*) из района Кыштымской ядерной аварии – факт или гипотеза? // Генетика, 1996. Т. 32. № 1. С. 114-119.
2. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В. Миграции грызунов в зоне влияния Восточно-Уральского радиоактивного следа (радиобиологический аспект) // Радиационная биология. Радиоэкология, 2013. № 1. С. 76-83.
3. Григоркина Е.Б., Пашина И.А. К проблеме радиоадаптации мелких млекопитающих (экологическая специализация вида, радиорезистентность, гемопоэз, иммунитет). Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 3. С. 371-378.
4. Ракитин С.Б., Григоркина Е.Б., Ракитина Л.В., Тарасов О.В. Изменчивость микросателлитной ДНК у красных полевков (*Clethrionomys rutilus*) из зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа // Инновационные и молекулярно-генетические исследования живых систем: Тр. Всерос. конф. Уфа, 2010. С. 165-170.
5. Ялковская Л.Э., Григоркина Е.Б., Тарасов О.В. Цитогенетические последствия хронического радиационного воздействия на популяции грызунов в зоне влияния Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология, 2010. Т. 50. № 4. С. 466-471.
6. Barker F.S., Helyar S.J., Kemp S.J. Highly polymorphic microsatellite loci in the bank vole (*Clethrionomys glareolus*) // Molecular Ecology Notes, 2005. Vol. 5. № 2. P. 311-313.
7. Gockel J., Harr B., Schlotterer C. et al. Isolation and characterization of microsatellite loci from *Apodemus flavicollis* (Rodentia, Muridae) and *Clethrionomys glareolus* (Rodentia, Cricetidae) // Molecular Ecology, 1997. Vol. 6. № 6. P. 597-599.
8. Grigorikina E.B., Olenov G.V. East Urals Radioactive Trace: adaptive strategy of rodents' population // Radioprotection, 2011. Vol. 46. № 6. P. 437-443.

9. *Ryabokon N.I., Goncharova R.I.* Transgenerational accumulation of radiation damage in small mammals chronically exposed to Chernobyl fallout // *Radiat. Environ. Biophys.*, 2006. № 45. P. 167-177.

## RODENTS' MIGRATIONS IN THE ZONE OF LOCAL RADIOACTIVE CONTAMINATION AND THEIR ROLE IN GENETIC VARIABILITY OF POPULATIONS INHABITING ON ADJACENT AREAS

**E.B. Grigorkina, G.V. Olenev, S.B. Rakitin**

Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

We investigated migrations of mouse-like rodents in the Eastern Urals Radioactive Trace (EURT) zone by usage the method of small mammals group marking by tetracycline. It is shown a high migration activity of rodents both in the EURT zone and adjacent areas. One can conclude, that at the EURT zone, as well as in any other areas, inhabiting population with constantly changing set of individuals - a flowing population. It is the convincing evidence of absence of any isolation. Migrations of small mammals in the narrow and extended EURT zone (i) considerably decreases the probability that certain adaptive changes will be fixed and inherited in a series of generations; (ii) is the base of transmission of radioinduced biological effects in adjacent areas. The fact of a flowing population should be taken into account in a wide spectrum of investigations at the analysis of the remote consequences of chronic radiating influence.

## РАДИАЦИОННАЯ СИТУАЦИЯ НА КОНТИНЕНТЕ: ОТ КЫШТЫМА И УИНДСКЕЙЛА ДО ЧЕРНОБЫЛЯ И ФУКУСИМЫ

**И.Н. Гудков**

Национальный университет биоресурсов и природопользования  
Украины, Киев, Украина, [ingudkov@ukr.net](mailto:ingudkov@ukr.net)

Одни из первых радиационных аварий, случившиеся в 1957 г. с интервалом всего в 11 дней, произошли в пос. Кыштым Челябинской области на ПО «Маяк» по производству ружейного плутония и городке Уиндскейл в Великобритании также на заводе по производству плутония. Они входят в четверку самых крупных аварий за всю историю развития ядерной энергетики [1,7]. По объемам выбросов в окружающую среду радиоактивных продуктов их опередили лишь аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), происшедшая в 1986 г., и АЭС «Фукусима-1», случившаяся в марте 2011 г.

Несмотря на радиоактивные шлейфы длиной до 300 км, образовавшиеся вследствие аварий в Кыштыме и Уиндскейле, влияния



## Характеристики объемов выбросов наиболее крупных радиационных аварий

Место аварии	Дата	Основные радионуклиды	Общий объем выброса, Бк	Площадь загрязненной территории, км <sup>2</sup>	Баллы, INES
Кыштым, СССР	29.09.1957	<sup>88</sup> Sr, <sup>90</sup> Sr, <sup>95</sup> Zr, <sup>106</sup> Ru, <sup>137</sup> Cs, <sup>144</sup> Ce	7.4×10 <sup>16</sup>	23 000	6
Уиндскейл, Великобритания	10.10.1957	<sup>88</sup> Sr, <sup>90</sup> Sr, <sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs, <sup>210</sup> Po	7.7×10 <sup>14</sup>	518	5-6
Чернобыль, СССР	26.04.1986	<sup>90</sup> Sr, <sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs, <sup>239</sup> Pu, <sup>241</sup> Am	5.3×10 <sup>18</sup>	195 000	7
Фукусима, Япония	11.03.2011	<sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs	1.4×10 <sup>18</sup>	55 000	7

Авария на ЧАЭС названа сельскохозяйственной [1, 2]. Таковыми, или, точнее, лесосельскохозяйственными, можно назвать и аварии в Кыштыме и Фукусиме. Во-первых, все три произошли в лесных регионах в зонах развитого земледелия, где до 70% населения составляют сельские жители. Во-вторых, сельские жители за счет потребления продуктов местного производства получают в странах СНГ дозу облучения, в два-пять раз большую, чем городские. И в-третьих, реализация радиозащитных мероприятий в сельскохозяйственном производстве является наиболее эффективной мерой снижения дозы облучения населения за счет уменьшения количества радионуклидов в продуктах питания. С учетом опыта предыдущих радиационных аварий, в частности кыштымской, были разработаны системы мероприятий, позволяющие снизить содержание радионуклидов в продукции в 2-10 раз. В растениеводстве – это известкование кислых почв, внесение повышенных уровней калийных и фосфорных удобрений, органических удобрений, замена видов и сортов традиционно выращиваемых растений на такие, которые меньше накапливают радионуклиды и некоторые другие. В животноводстве – это улучшение кормовой базы, изменения в составе рационов кормления, добавления к ним минеральных солей, энтеросорбентов, перевод скота перед забоем на относительно чистые в отношении радионуклидов корма. За их счет доза облучения населения может быть снижена в 1.5-5.0 раз. И в настоящее время производимая в аграрном секторе продукция в основном соответствует международным гигиеническим нормативам и более строгим нормативам Украины, Беларуси и России. Хотя и отмечаются случаи превышения допустимого содержания <sup>137</sup>Cs в молоке и <sup>90</sup>Sr в зерне в регионах, примыкающих к зонам отселения. Однако соответствие содержания радионуклидов в продуктах питания принятым нормативам нельзя считать свидетельством полного благополучия. <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs – это искусствен-

ные радионуклиды, которых в природе не существует. Они появились в окружающей среде с первыми взрывами атомных бомб и их количество в продуктах перед аварией на ЧАЭС было в десятки раз меньшим, чем это допускают действующие в данное время нормы. Облучение биоты за счет дополнительных источников может обусловить увеличение риска проявления определенных радиобиологических эффектов.

За прошедшие 56 лет после аварии в Кыштыме и 28 лет после аварии в Чернобыле видовой состав биоценозов, как и соотношение между отдельными его компонентами, на определенных территориях вблизи мест аварий изменился. Однако эти изменения в основном обусловлены резким ограничением хозяйственной деятельности вплоть до ее прекращения. Эвакуация населения и вывоз домашних животных привели к очень интенсивным изменениям характера растительности как в бывших агроценозах, так и в природных фитоценозах, зооценозах и биоценозе в целом. Но все-таки одним из основных действующих факторов на биоту в зоне аварий следует считать ионизирующую радиацию. При действии ионизирующей радиации на сообщества организмов различных таксономических групп даже в сравнительно невысоких дозах в их структуре могут происходить значительные изменения. Даже незначительное угнетение роста и развития, репродуктивной способности одного-двух видов может сопровождаться нарушением ценогических связей и обеспечить благоприятные условия для развития других видов. Несомненно, главным фактором, приводящим к нарушению ценогических связей, является реакция наиболее радиочувствительных видов. Выпадение радиочувствительных видов растений наблюдается уже при мощности дозы  $10^{-2}$  Гр/сут. Описаны случаи обеднения флоры и за счет сравнительно радиоустойчивых видов. Установлено, что некоторые виды растений, обладая высокой способностью к накоплению основных дозообразующих радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (кальцефилы и калиефилы соответственно), в условиях одного фитоценоза за счет внутреннего облучения могут получать дозы значительно более высокие, чем другие виды, в том числе и обладающие более высокой радиочувствительностью [9]. Постоянное облучение популяций различных групп организмов может приводить к генетически детерминированным изменениям как в их структуре, так и на уровне морфофизиологических особенностей отдельных организмов. Порой это может быть обусловлено вполне нейтральными микромутациями, определяющими мельчайшие изменения в организме. Подобные особенности наблюдаются у диких животных зоны отчуждения ЧАЭС с первых лет послеаварийного периода до настоящего времени. Прежде всего, это повышенный уровень эпигенетической изменчивости некоторых видов насе-

комых, возрастание количества хромосомных аберраций в клетках критических органов, изменение отдельных краниологических признаков и процессов температурного гомеостаза у мышевидных грызунов. Такие эффекты, обусловленные действием ионизирующей радиации, увеличивая генетическую разнородность популяции и способствуя более высокому уровню адаптации к измененным условиям существования, могут приводить к ускорению микроэволюционных процессов даже при совсем невысоких дозах. Изменения в биоценозе могут происходить не только при ингибирующих дозах излучений, но и при стимулирующих, которые в сотни раз ниже летальных. Усиление развития одних видов вследствие проявления радиационного гормезиса может создать для них определенные преимущества в биоценозе, что может сопровождаться ухудшением условий для развития других его компонентов вплоть до их выпадения.

Хотя в сферу действия ионизирующей радиации в той или иной степени вовлекаются все лица, проживающие на загрязненных радионуклидами территориях, выделяют четыре критических контингента, которые были подвержены облучению и облучаются в настоящее время: 1) участники ликвидации последствий аварии (УЛПА); 2) эвакуированные жители населенных пунктов 30-километровой зоны; 3) дети и подростки на момент аварии, щитовидная железа которых получила облучение за счет радиоактивных изотопов йода; 4) сельские жители, проживающие на загрязненных радионуклидами территориях. Население на загрязненных радионуклидами территориях по численности является наибольшей группой и достигает 6 млн. чел. Признано, что приоритетное влияние на состояние здоровья пострадавших всех категорий принадлежит болезням системы кровообращения. Среди них преобладают гипертоническая и ишемическая болезни сердца. Наиболее критическую категорию составляют УЛПА, принимавшие участие в работах 1986 г. По данным патологоанатомических исследований, эти болезни обуславливают большую смертность, чем все онкологические болезни вместе взятые. Бесспорным является факт, что в целом состояние здоровья УЛПА, а их насчитывается более полумиллиона, ухудшилось. Среди них значительно возросло количество неопухолевых болезней крови и кроветворных органов, эндокринной системы, органов пищеварения, дыхания, мочеполовой системы и других. Обострились хронические болезни, регистрируется ослабление иммунитета, увеличилось количество опухолевых заболеваний. Отмечается превышение общей смертности от онкологических заболеваний. До настоящего времени сохраняется превышение общей заболеваемости и среди населения, эвакуированного с территорий зон отчуждения и обязательного отселения, количество которого в 1986 г.

составляло около 300 тыс. чел. За прошедшие годы было прооперировано свыше 6 тыс. больных раком щитовидной железы среди лиц, облученных в возрасте 0-18 лет. Уровни заболеваний этого типа превышают дозаварийные в сотни раз. Группой наибольшего риска стали дети в возрасте до 6 лет на момент аварии, а также население, эвакуированное из зоны отчуждения. Повышенная заболеваемость щитовидной железой отмечена и у УЛПА. Сохраняется повышенная заболеваемость раком и другими формами этого органа (гипертрофия, гиперплазия) и среди лиц, получивших облучение радиоактивным йодом уже во взрослом состоянии. В последние годы начала возрастать заболеваемость УЛПА и отдельных групп населения солидными формами рака. Особого внимания заслуживают зарегистрированные повышенные риски рака молочной железы у женщин-ликвидаторов, а также тех, которые проживают на загрязненных радиоактивными веществами территориях. Установлены повышенные риски лейкемии у УЛПА. У них выявлено существенное повышение распространенности депрессий (18 и 13% в контроле) и суицидальной идеации (9 и 4%). Желудочно-кишечный тракт принадлежит к основным тканям-мишеням действия повреждающих факторов радиационной природы, так как основную дозу облучения человек получает с продуктами питания. Заболевания системы пищеварения занимают второе-третье место среди неопухолевых заболеваний у лиц, пострадавших вследствие аварии. Когортные исследования заболеваемости, инвалидности и смертности УЛПА свидетельствуют о стойких негативных изменениях в состоянии здоровья – за четверть века после аварии болезни органов пищеварения заняли ведущее место в структуре неопухолевых заболеваний.

#### Литература

1. *Алексахин Р.М.* Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия, 2013. Т. 114. Вып. 5. С. 243-249.
2. *Гудков И.Н.* Современные задачи и проблемы радиоэкологии // Экологический вестник, 2010. № 3 (13). С. 48-52.
3. *Гудков И.Н.* Роль сельского хозяйства в радиационной безопасности населения // Продовольственная индустрия АПК. Киев, 2012. № 1. С. 17-21 (на укр. яз.).
4. *Гудков И.Н.* Стратегия противорадиационной защиты людей, проживающих на загрязненной радионуклидами территории // Экологический вестник, 2013. № 2 (77). С. 19-20.
5. Двадцать пять лет Чернобыльской катастрофы: безопасность будущего. Национальный доклад Украины. – Киев: КИМ, 2011. 356 с.
6. Медицинские последствия Чернобыльской катастрофы: 1986-2011. Тернополь: ТМДУ, 2011. 1092 с. (на укр. яз.).
7. *Пристер Б.С.* и др. О неусвоенных уроках Чернобыля: оглянуться, осознать, не повторить // Чернобыльский научный вестник, 2011. № 1 (37). С. 3-36.

8. *Gudkov I.* Radiation situation in Central Europe 25 years after Chernobyl Nuclear Power Plant accident and radioecological problems // Natural Human Environment: Dangers, Protection, Education. Warsaw: Oficina Wydawnicza WSEIZ, 2012. P. 27-34.

9. *Gudkov I.N., Gaychenko V.A., Pareniuk O.Yu., Grodzinsky D.M.* Changes in biocenoses in the Chernobyl NPP accident zone // Nuclear Physics and Atomic Energy, 2011. Vol. 12. № 4. P. 362-374.

10. Health Effect of the Chernobyl Accident: a Quarter of Century Aftermath. Kyiv: DIA, 2011. 648 p.

## **RADIATION SITUATION ON THE CONTINENT: FROM KISHTIM AND WINDSCALE TO CHERNOBYL AND FUKUSHIMA**

**I.N. Gudkov**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev

Short survey based on the last scientific materials and own research, analyzes of the current radiation situation are given. The data about the situation in agriculture, environmental and biological effects, the impact of the accident on human health are considered.

---

## **КЛИНИКО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И СТРУКТУРА ПАРАЗИТОЦЕНОЗА ЛОСЯ, ОБИТАЮЩЕГО НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ**

**А.В. Гулаков<sup>1</sup>, В.А. Пенькевич<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,  
Гомель, Беларусь, [gulakov@gsu.by](mailto:gulakov@gsu.by)

<sup>2</sup> Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,  
Хойники, Беларусь, [blauehai@mail.ru](mailto:blauehai@mail.ru)

В настоящее время в большинстве случаев, при которых организмы подвергаются воздействию радиации как от естественных, так и от техногенных источников, речь идет об облучении в небольших дозах. Поэтому главную тревогу вызывают последствия радиационного воздействия в малых дозах, особенности биологических эффектов которых до сих пор мало изучены и являются предметом активных споров [2].

Произошедшая техногенная катастрофа привела также к появлению естественного полигона с новым фактором воздействия на паразитоценозы: повышенный уровень ионизирующего излучения, прекращение хозяйственной деятельности, введение охранного режима. В результате сложились своеобразные экологические условия: хорошая кормовая база, отсутствие фактора беспокойства на протяжении четверти века, большая площадь (216.2 тыс. га), оказывающие огромное влияние на фауну и флору данного региона.



В настоящее время гельминтологические исследования проводятся и в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике (ПГРЭЗ) [3].

Основная цель данной работы – оценка клинико-физиологического состояния и изучение структуры паразитоценоза лося, обитающего на территории с высокой плотностью радиоактивного загрязнения. Исследования проводились как на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, так и на сопредельных территориях.

Оценку клинико-физиологического состояния животных проводили согласно общепринятым методикам. Общее состояние животных определяли визуально во время кормежки или отдыха животных (дыхание, координацию движений, обоняние, остроту зрения, поедаемость корма).

Проведены гельминтологические вскрытия по К.И. Скрябину (1928) 17 лосей и копроскопия 1243 проб их экскрементов следующими методами: Калантарян с насыщенным раствором азотнокислого натрия (селитры), последовательных сливов и Бермана [5].

Как известно, система крови является одной из самых радиочувствительных. Существуют общие закономерности в изменениях качественного и количественного составов периферической крови под воздействием радиации. Снижение количества форменных элементов наступает тем раньше и интенсивней, чем больше доза облучения. В ряде случаев изменения в составе крови возникают при действии на организм относительно малых доз радиации и могут быть единственными диагностическими показателями лучевых заболеваний и их последствий [4].

Так, у лосей, добытых в зоне отчуждения в период 1990-1993 гг., нами было отмечено пониженное содержание количества лейкоцитов в периферической крови до 3.0-5.3 тыс./мкл при физиологической норме 7.5-9.5 тыс./мкл.

За весь период наблюдения данный показатель не превышал у животных, обитающих на территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения,  $5.8 \pm 0.6$  тыс./мкл.

У лосей, отстрелянных в зоне отселения, отмечены аналогичные, но менее выраженные изменения в составе крови при отсутствии эозинофилии и пониженном содержании лейкоцитов (4.3-5.9 тыс./мкл). У данного вида в период 1998-1999 гг. также отмечено невысокое содержание лейкоцитов как в зоне отчуждения, так и в зоне отселения, которое составляло  $4.6 \pm 0.6$  и  $4.9 \pm 0.4$  тыс./мкл соответственно.

Животные, обитающие на территории с невысоким уровнем радиоактивного загрязнения, не имели существенных изменений гематологических показателей по сравнению с нормативным уров-

нем. Так, содержание лейкоцитов в периферической крови находилось на нижней границе физиологической нормы и колебалось от  $6.7 \pm 0.4$  до  $7.9 \pm 0.4$  тыс./мкл.

Также у лосей, отстрелянных на территории зоны отчуждения, наблюдалось снижение в два-три раза процентного содержания сегментоядерных нейтрофилов – до 13.3-15.5% по сравнению с физиологической нормой – при выраженной эозинофилии.

Концентрация гемоглобина у данного вида животных не выходила за рамки нормативных значений (14.0-15.0 г%), а количество эритроцитов было на уровне нижней границы физиологической нормы и составляло 5.3-6.7 млн./мкл.

Наши данные согласуются с результатами других исследователей, которые показали, что количество лейкоцитов в периферической крови уменьшается независимо от типа излучения и его длительности. Так же лимфопению можно рассматривать как гематологический показатель, отражающий величину дозы воздействия и при частичном облучении тела животных [1].

Биохимические показатели сыворотки крови диких копытных в течение всего периода наблюдений находились в пределах физиологических норм независимо от территории местообитания. Так, содержание калия у животных изменялось от  $4.9 \pm 0.1$  до  $7.3 \pm 1.2$  ммоль/л, в то время как концентрация натрия находилась в пределах 135.0-173.0 ммоль/л.

Концентрация белка составляла 6.3-7.8 г%, в то время как содержание альбуминов изменялось от 20 до 60% с небольшими колебаниями. Содержание холестерина в сыворотке крови изучаемых животных за время исследований практически не изменялось и находилось в пределах 2.5-3.1 ммоль/л.

Проведенные исследования паразитоценоза данного вида животного показали, что паразиты обитают во многих органах и тканях организма лося с различной степенью экстенсивности и интенсивности инвазии.

В структуру паразитоценоза лося, обитающего на территории Полесского радиационно-экологического заповедника, входят 16 видов гельминтов, три вида паразитических насекомых и два вида паразитических простейших. Гельминты: *Parafasciolopsis fasciolaeformis* (37.8-58.6%), *Liorchis scotiae* (10.9), *Dicrocoelium lanceatum* (5.6), *Taenia hydatigena larvae (Cysticercus tenuicollis)* (15.2), *Moniezia benedeni* (2.4), *Echinococcus granulosus larvae* (23.2), *Trichocephalus ovis* (8.5), *Bunostomum trigonocephalum* (51.2), *Ostertagia orloffii* (51.2), *Spiculoptera alcis* (51.2), *Nematodirus spathiger* (4.8), *Nematodirella longissimespiculata* (18.0), *Dictyocaulus eckerti* (18.7), *Oesophagostomum venulosum* (14.3), *Varestrongylus capreoli* (19.5), *Protostrongylidae g sp.* (19.5). Общая экстенсивность инвазии гельминтами лося составила 74.7%.

Нематоды были представлены 10 (62.6%) видами. Трематоды и цестоды – по три вида (18.7%). В кишечнике обитает восемь (50.0%) видов гельминтов: нематод – семь, цестод – один; в печени – три (18.7%): трематод – два, цестод – один; в легких – три (18.7%) вида нематод; в рубце – один (6.2%) вид трематод и на серозных покровах – один вид нематод.

В печени локализовались *Parafasciolopsis fasciolaemorphia* (23-257 экз.) и *Dicrocoelium lanceatum* (1-3), в рубце – *Liorchis scotiae* (35-132).

Присосавшиеся к лепесткам рубца лиорхисы вызывают воспалительные процессы, нарушающие нормальное пищеварение, на серозных покровах брюшной полости – *Taenia hydatigena*, larvae (*Cysticercus tenuicollis*) (по одной личинке), в тонком кишечнике – *Moniezia benedeni* (единичные экземпляры), печени – *Echinococcus granulosus*, larvae (1-4 экз.), толстом кишечнике – *Trichocephalus ovis* (5-12), тонком кишечнике – *Bunostomum trigonocephalum* (13-203), сычуге и тонком кишечнике – *Ostertagia orloffii* (3-7), *Spiculoptera alcis* (5-14); тонком кишечнике – *Nematodirus spathiger* (3-15), сычуге и тонком кишечнике – *Nematodirella longissimespiculata* (2-20), бронхах и бронхиолах легких – *Dictyocaulus eckerti* (4-7), толстом кишечнике – *Oesophagostomum venulosum* (4-16 экз.).

Паразитические простейшие: эймериидные кокцидии: в кишечнике – *Eimeria alces* (12.2%) и *Sarcocystis gracilis* (10.8) – в мышцах глотки, пищевода и корне языка. Отмечался гиподерматоз (ЭИ 2-4%), вызванный паразитированием личинки овода *Hypoderma diana*. У одного лося в лобных пазухах обнаружены личинки овода *Cephanomyia ulrichii* (более десятка экземпляров) – возбудителя эстро-роза лосей. В летне-осенний период на лосе обитает кровососка *Lipoptena cervi* (100%) с интенсивностью инвазии от нескольких десятков до нескольких сотен экземпляров на животное.

Результаты исследований лосей показали, что заражение молодняка парафасциолопсозом незначительное (ЭИ 6.3%). Сравнение данных о зараженности половозрелых животных выявило более высокую зараженность самцов (ЭИ 68.0%), чем самок (ЭИ 61.2). В целом, инвазированность зверей довольно высокая. Это связано с наличием значительного количества гидрологических сетей: каналов, канав, болот, рек, протоков, заболоченных участков; а также мягким влажным климатом и большой численностью промежуточных хозяев – водных моллюсков *Coretus corneus*. Потребность лося в водоемах определяет его тесную связь с возбудителем парафасциолопсоза.

Состав гельминтофауны зависел от времени года. Так, в осенне-зимний период преобладали трематоды, а в весенне-летний – нематоды. К осени с переходом лосей на питание древесными породами

нематодозная инвазия снижалась. Основную массу паразитов составляли трематоды, так как к этому времени они достигают половой зрелости. Во все сезоны года в тонком кишечнике лосей обнаруживали нематодирозов.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что у диких копытных, добытых на территории зоны отчуждения в более ранний период исследований, отмечен ряд изменений физиологического состояния, которые менее выражены или отсутствовали у животных аналогичных видов из зоны отселения и контрольного района. Отмеченные нарушения в физиологическом состоянии диких копытных в первые годы наблюдения (1990-1993 гг.) могут быть вызваны радиационным поражением данных животных в начальный период аварии на Чернобыльской АЭС.

В результате изучения паразитоценоза животного у лося, обитающего на территории радиоактивного загрязнения, выявлено 16 видов гельминтов; два вида паразитических простейших: в кишечнике – *Eimeria alces*, мышцах глотки, пищевода и корне языка – *Sarcocystis gracilis* и три вида паразитических насекомых: под кожей – личинки овода *Hypoderma diana*, в лобных пазухах – личинки овода *Cephanomya ulrichii*, на коже – кровососка *Lipoptena cervi*.

#### Литература

1. Бриллиант М.Д., Воробьев А.И. Изменение некоторых показателей периферической крови при тотальном облучении человека // Проблемы гематологии и переливания крови, 1972. № 1. С. 7-11.
2. Бурлакова Е.Б. Эффект сверхмалых доз // Вестник РАН, 1994. Т. 64. № 5. С. 425.
3. Пенькевич В.А. Паразиты лося (*Alces alces* L.) Полесского радиационно-экологического заповедника // Сахаровские чтения 2008 года: экологические проблемы XXI века: Матер. VIII Междунар. науч. конф. Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2008. С. 154.
4. Шмелева Н.И. Особенности эритропоза у животных, перенесших острую лучевую болезнь // Радиобиология, 1972. № 4. С. 427-437.
5. Ятусевич А.И., Карасев Н.Ф., Пенькевич В.А. Паразитология и инвазионные болезни животных. Минск: Дизайн ПРО, 2004. 240 с.

#### CLINICAL AND PHYSIOLOGICAL STATES AND STRUCTURE PARASITOCENOSSES OF MOOSES, LIVES IN THE CONTAMINATED AREA

A.V. Gulakov<sup>1</sup>, V.A. Penkevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Frantsisk Skorina State University in Gomel, Gomel, Belarus,  
[gulakov@gsu.by](mailto:gulakov@gsu.by)

<sup>2</sup> Polesky State Radioecological Reserved Area, Hoyniki, Belarus

Clinical and physiological state and parasite cenose structure in *Alces alces* from high radioactively contaminated area. Some changes in physiological

state of mooses from Chernobyl exclusion zone was noted during earlier studies. Parasite cenose structure in *Alces alces* inhabited Polesian radiation-ecological reserve consist of 16 helminth species, 3 parasitic insect species and 2 species of parasitic protozoa.

## ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЫШЕВИДНЫХ ГРЫЗУНОВ ИЗ ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Н.Ж. Кадырова<sup>1</sup>, Р. Жапбасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП  
«Национальный ядерный центр РК» Комитета по атомной энергии  
МИНТ РК, Курчатов, Казахстан, [kadyrova@nnc.kz](mailto:kadyrova@nnc.kz)

<sup>2</sup> Институт общей генетики и цитологии МОН РК, Алматы, Казахстан

Генетические последствия радиационного загрязнения природной среды и длительного воздействия малых доз ионизирующих излучений на наследственный аппарат – хромосомы клеток человека, вследствие многолетних ядерных испытаний, проведенных на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП), изучаются в сравнительно широком масштабе с использованием популяционно-статистических, медико-генетических, цитогенетических и генетико-биохимических методов [1, 2].

В то же время вопрос о генетических последствиях хронического воздействия малых доз радиации на диких и домашних млекопитающих, обитающих на самом Семипалатинском полигоне, остается практически открытым. Единичные исследования состояния генетического аппарата мышевидных грызунов, обитающих на участках полигона, проведенные в конце 1990-х гг., были выполнены только на отдельных видах и к тому же на незначительном количестве животных [2]. За прошедшее время после этих исследований, естественно, радиационно-экологическая ситуация на полигоне изменилась, и к тому же происходит постоянное интенсивное обновление за счет новых поколений видов животных, обитающих на полигоне. Следовательно, возникает объективная необходимость изучения динамики цитогенетических показателей у животных, которые в настоящее время обитают на радиационно-загрязненных участках полигона.

Между тем, исследования биологических закономерностей возникновения хромосомных и геномных нарушений в соматических клетках млекопитающих, индуцированные длительно действующими на природную среду малыми дозами радиации, позволяют объективно оценить современную радиобиологическую и радиоэкологическую обстановку на полигоне и в районах, прилегающих к нему.

Из литературных данных по изучению проблемы загрязнения радионуклидами районов Чернобыльской атомной электростанции и других территорий радиационных инцидентов, известно [3, 4, 6], что одними из первых в организме животных происходят нарушения в генетическом аппарате клетки. Следовательно, сравнительное изучение динамики спонтанной мутации у контрольных животных из чистых районов и индуцированные радиацией аберрации хромосом и геномные мутации у животных из загрязненных радионуклидами районов, является необходимым условием комплексного генетического мониторинга окружающей среды.

На основании этих данных можно разработать достоверные критерии оценки состояния среды и сформулировать приоритетные направления работы для решения задач управления радиационной ситуацией на этих территориях, а также удастся проанализировать пути распространения радионуклидов за пределы реальных зон радиации. Эти материалы также могут быть прогностическими и для людей, проживающих в этих районах и прилегающих к ним территориях. Поэтому научно-практическая необходимость проведения постоянного комплексного генетического мониторинга с изучением уровня мутации в природных популяциях животных, обитающих в этих районах, не вызывает сомнения.

Актуальность таких исследований становится еще более очевидной в случае предполагаемой поэтапной передачи отдельных участков СИПа в хозяйственный оборот [5].

Цель работы – изучение наследственного аппарата (хромосом) у отобранных видов животных и анализ уровня аберраций хромосом и геномных мутаций в соматических клетках гемопоэтической ткани у мышевидных грызунов из радиоактивно загрязненных территорий СИП и из контрольных участков.

Отлов животных на территории площадок «Дегелен» (Д) и «Балапан» (Б) проводился на участках, различающихся по уровню радиационного загрязнения: I – высокий уровень радиационного загрязнения (18-19 мкЗв/ч), II – средний (0.8-2.5), III – фон (0.12-0.16), IV – контроль (недалеко от населенных пунктов Чайковка (ЧК) Восточно-Казахстанской области.

Хромосомы изучены у 72 животных, из которых самцы составляли 25 особей, самки – 47. В свою очередь из цитогенетически обследованных 72 животных 63 были отловлены из экспериментальных участков (Б I, Б II, Б III, Д II, Д III) и девять животных – из контрольного района (Чайковка).

По видовому составу обследованные 63 экспериментальных животных распределились следующим образом: 23 (шесть самцов и 17 самок) отнесены к виду *Allactaga major* Kernn, 20 (12 и 8) – *Allactaga saltator* Eversmann, 20 – (5 и 15) *Cittellus erihrogenus* Brandt.

Таким образом, цитогенетическим методом обследованные 72 особи мышевидных грызунов по экспериментальным и контрольным участкам распределились следующим образом: из участка Балапан исследованы 56 животных, из них 21 – *Allactaga major* Kernn, 15 – *Allactaga saltator* Eversmann, 20 – *Cyttelus erithrogenus* Brandt; из участка Дегелен – семь животных, из них два – *Allactaga major* Kernn, пять – *Allactaga saltator* Eversmann; из участка Чайковка – девять, из них два – *Allactaga major* Kernn, шесть – *Allactaga saltator* Eversmann, один – *Cyttelus erithrogenus* Brandt.

От 72 животных экспериментальных и контрольных групп были просмотрены 50912 метафазных клеток. Часть этих клеток сфотографирована на фотопленке Микрат-300, их основная часть проанализирована с использованием компьютерной программы Видео-Карио-Тест.3.1 с распечаткой изображения метафазной клетки на бумажный носитель или непосредственно с применением иммерсионной системы микроскопа.

Таким образом, у 72 (25 самцов и 47 самок) мышевидных грызунов трех видов (*Allactaga major* Kernn, *Allactago Saltator* Eversman, *Cyttelus erithrogenus* Brandt) из экспериментальных (Б I, Б II, Б III, Д II, Д III) и контрольных (ЧК) участков с разным уровнем радиации изучены уровни клеток с гиподиплоидным, гипердиплоидным (анеуплоидным) и полиплоидным наборами хромосом, а также с абберациями хромосом в гемопоэтической ткани.

У большого тушканчика (*Allactaga major* Kernn) с участка Б II частота встречаемости клеток с гипердиплоидным набором и абберацией хромосом была выше соответственно в 4.62 и 3.21 раза по сравнению с контрольными (ЧК). У животных из участка Д III уровень клеток с гипердиплоидным набором хромосом превышал показатель контрольных животных в 10.78 раза.

У тушканчика-прыгуна (*Allactago Saltator* Eversman) с участка с высоким уровнем радиации (Б 1) уровень клеток с гипердиплоидными и полиплоидными наборами хромосом и с абберациями хромосом были достоверно выше (в 4.71, 3.68 и 7.88 раза соответственно) по сравнению с аналогичными показателями контрольных животных (ЧК).

У суслика краснощекого (*Cyttelus erithrogenus* Brandt) с участка Б II уровень клеток с полиплоидным набором и абберациями хромосом превышал аналогичные цитогенетические показатели контрольных животных в 2.85 и 4.55 раза соответственно.

Соотношение общей суммы клеток с гиподиплоидным, гипердиплоидным и полиплоидными наборами хромосом, а также с абберациями хромосом (цитогенетический показатель А) к сумме клеток только с гипердиплоидным и полиплоидными наборами хромосом, а также с абберациями хромосом (цитогенетический показате-

тель В) для большого тушканчика с контрольного участка составило 65 к 35%, а для животных с участка Б II – 61.46 к 38.54% соответственно; для тушканчика-прыгуна с контрольного участка – 74.83 к 25.17%, а для животных с участка Б I – 56.49 к 43.51%; для суслика с контрольного участка – 75 к 25%; а для животных с участка Б II – 50.09 к 41.91%, которые указывают на то, что увеличение частоты клеток у животных с участков Б I и Б II произошло, в основном, за счет возрастания доли гипердиплоидных, полиплоидных и аберрантных клеток в гемопоэтической ткани хронически облученных низкой дозой радиацией животных.

В литературе по радиационной цитогенетике отмечается, что частота клеток с гипердиплоидным и полиплоидным наборами хромосом, т.е. частота клеток с геномными мутациями, а также уровень клеток с аберрациями хромосом, наглядно демонстрирует сам факт воздействия радиации на организм млекопитающих. Следовательно, проанализированные нами уровни трех цитогенетических показателей (гипердиплоидия, полиплоидия, аберрация хромосом) у животных из участка Б I были достоверно выше, чем у контрольных животных (в 4.71, 3.68, 7.88 раза соответственно).

#### Литература

1. *Ахматулина Н.Б.* Биологическая дозиметрия и объективная оценка негативного влияния радиации на человека // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. Курчатов, 2008. С. 39-40.
2. *Воит Н., Семозкина Н., Карабалин Б.* и др. Экологические пути миграции радионуклидов, связанных с ядерными испытаниями на Семипалатинском полигоне / Проект МНТЦ К 054. Курчатов, 2000. 95 с.
3. *Гончарова Р.И., Рябоконт Н.И.* Биологические эффекты в природных популяциях мелких грызунов на радиационно-загрязненных территориях. Динамика частоты аберрации хромосом в ряду поколений европейской рыжей лесной полевки (*Clethrionomys glareolus* Schreber) // Радиационная биология. Радиоэкология, 1998. Т. 38. Вып. 5. С. 746-753.
4. *Костенко С.А., Бунтова Е.Г., Глазко Т.Т.* Видоспецифичность дестабилизации кариотипа в условиях радионуклидного загрязнения (ЧАЭС) у полевок *Microtus oeconomus*, *Microtus arvalis*, *Clethrionomys glareolus* // Цитология и генетика, 2001. № 2. С. 11-17.
5. *Пархоменко М.* Ядерная физика. От теории к практике. Путь к Государственной Премии лежит через десятилетия труда. Интервью с Генеральным директором НЯЦ РК К. Кадыржановым // Казахстанская правда, 2009. 21 ноября.
6. *Рябоконт Н.И.* Биологические эффекты в природных популяциях мелких грызунов на территориях, загрязненных радионуклидами. Частота полиплоидных клеток костного мозга у рыжей полевки в разные годы после Чернобыльской катастрофы // Радиационная биология. Радиоэкология, 1999. Т. 39. № 6. С. 613-618.



---

**CYTOGENETIC ASPECTS IN MICE-LIKE RODENTS  
FROM FORMER SEMIPALATINSK TEST SITE TERRITORY****N.Zh. Kadyrova<sup>1</sup>, R. Zhabbasov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Institute of Radiation Safety and Ecology, National Nuclear Center  
of Kazakhstan Republic, Kurchatov,  
Kazakhstan Republic, [kadyrova@nnc.kz](mailto:kadyrova@nnc.kz)<sup>2</sup> Institute of Total Genetics and Cytology, Almaty, Kazakhstan Republic

Results of study of cytogenetic aspects of mouse kind rodents living at the territory of former Semipalatinsk Test Site have been shown in this work. It is shown that analyzed levels of three cytogenetic indexes (hyperdiploidy, polyploidy, aberration of chromosomes) of studied animals that have been caught from the area of “Balapan” site with a high level of radiation contamination (18-19  $\mu\text{Sv/h}$ ) are certainly higher than ones from animals of control group (correspondingly 4.7; 3.7; 7.9 times).

---

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЧВЕННОЙ ФАУНЫ  
В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ****А.А. Колесникова, Т.Н. Конакова, А.А. Кудрин, А.А. Таскаева**Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[kolesnikova@ib.komisc.ru](mailto:kolesnikova@ib.komisc.ru)

Радиационное воздействие признано одним из самых опасных для жизнедеятельности человека и остальной биоты антропогенных нарушений среды. Изучению последствий крупных радиационных аварий, обследованию территорий крупных ядерных полигонов, сбору сведений о влиянии повышенного естественного фона радиации, проведению экспериментальных исследований по изучению биологических эффектов ионизирующих излучений на живые организмы посвящено немало работ [2, 7, 10, 12-17]. Одним из путей для контроля за действием радиации на живую природу является всесторонний анализ структуры и динамики сообществ живых организмов. Почвенные беспозвоночные являются исключительно благодарным объектом радиоэкологических исследований: велика их видовая насыщенность, разнообразны экологические связи, эти животные наиболее чувствительны к действию радиации, так как в пищевых цепях они являются конечными звеньями и могут концентрировать многие радионуклиды [5].

Исследования проведены в июне 2013 г. на территории с повышенным фоном радиации, образованной в результате деятельности с 1931 по 1957 г. предприятия по добыче и производству радия из пластовых вод и отходов урановой руды (63°29' с.ш. 53°25' в.д., пос.

Водный, Ухтинский район, Республика Коми). Радиационную ситуацию в пос. Водный, пользуясь терминологией «Норм радиационной безопасности» [8], можно охарактеризовать наличием локальных радиоактивных загрязнений, которые являются последствиями прежней деятельности и образованы специализированными природными радионуклидами. Локальные радиоактивные загрязнения в окрестностях поселка обусловлены присутствием в почвах и грунтах повышенных концентраций тяжелых естественных радионуклидов (ТЕРН)  $^{226}\text{Ra}$  (радий-226, период полураспада – 1600 лет),  $^{238}\text{U}$  (уран-238, период полураспада –  $4.47 \cdot 10^9$  лет) и продуктов их распада [4]. Мощность дозы внешнего гамма-излучения на участках с радиевыми и урано-радиевыми типами загрязнения составляла от 0.05 до 30.00 мкЗв/ч, что в 3-300 раз превышает таковую для контрольных участков, расположенных в той же климатической зоне [6].

Для исследования были выбраны луговые участки с повышенным (луг 1, дозовая нагрузка 20-25 мкГр/ч) и естественным (луг 2, дозовая нагрузка 0.6 мкГр/ч) фоном радиации. Злаково-разнотравный луг 1 расположен на второй надпойменной террасе р. Ухта. Исходно до начала работ по добыче радия на этом участке сформировалась дерново-луговая почва. Естественный растительный покров этого участка был полностью уничтожен в результате производственной деятельности радиохимического завода и последующей дезактивации территории песчано-гравийной смесью [1]. Восстановление растительности происходило в течение 60 лет в результате самопроизвольного зарастания территории характерными для данных физико-географических и климатических условий видами. Злаково-разнотравный луг 2 расположен в сходных с радиоактивно загрязненной площадкой эдафотопических условиях, на второй надпойменной террасе правого берега р. Ухты вблизи устья р. Яреги. Здесь сформировалась дерново-подзолистая почва [3].

На каждой пробной площади  $20 \times 20$  м был проведен отбор по сетке 25 почвенных образцов размером  $5 \times 5$  см (на нематод) и  $10 \times 10$  см (другие беспозвоночные). Всего отобрано 50 почвенных образцов, из которых в лабораторных условиях проведена выгонка беспозвоночных. Экстракцию нематод осуществляли при помощи модифицированного метода Бермана с экспозицией 48 ч. Фиксировали нематод горячим ( $80^\circ\text{C}$ ) раствором формалина с массовой долей 4%. Экстракцию микроартропод и крупных беспозвоночных осуществляли по общепринятой методике с использованием эклекторов Берлезе-Тулъгрена. Подсчет всех почвенных беспозвоночных осуществляли с использованием микроскопа МБС-10. Для группировок беспозвоночных рассчитан индекс агрегированности Мориситы ( $I_m$ ), указывающий на вероятность того, что случайно выбран-

ные точки из одной популяции попадают в тот же исследуемый квадрат. Этот индекс связан с показателями пятнистости и дисперсии, рассматривается независимым от среднего и числа особей [9].

По результатам исследований в 2012 г. нематоды луга 1 представлены 32 родами с общей численностью  $282 \pm 74$  экз./100 см<sup>3</sup>, нематоды луга 2 включали 25 родов с общей численностью  $212 \pm 43$  экз./100 см<sup>3</sup>. На участке с повышенным радиационным фоном (луг 1) доминировали рода *Diptherophora*, *Aphelenchus*, *Clarcus*, *Eudorylaimus*, *Anaplectus*, *Cephalobus*, *Tylenchorhynchus*. На контрольном участке преобладали рода *Mesodorylaimus*, *Enchodelus*, *Eudorylaimus*, *Dorylaimoides*, *Rhabditis*. На загрязненном лугу 1 по сравнению с контрольным участком (луг 2) среди нематод увеличилось относительное обилие микотрофов, хищников и паразитов, уменьшалась численность политрофов. Основу населения микроартропод на лугу 1 составили *Oribatei* ( $17.7 \pm 7.5$  тыс. экз./м<sup>2</sup>), на контрольном лугу 2 наибольшей численности достигали *Collembola* ( $11.5 \pm 1.9$ ). Численность *Mesostigmata* была невысокой на обоих участках ( $2.2 \pm 0.5$  тыс. экз./м<sup>2</sup> – на лугу 1,  $4.8 \pm 1.2$  – на лугу 2). На загрязненном лугу 1 отмечено семь, на контрольном лугу 2 – 10 видов коллембол. На обоих участках доминирующим видом являлся *Parisotoma notabilis*. Высокого уровня обилия на лугу 1 достигали виды *Folsomia bisetosa* и *Isotomiella minor*, на лугу 2 – *Isotomiella minor*, *Friesea mirabilis*, *Mesaphorura krausbaueri*. На загрязненном лугу 1 преобладали представители почвенной и полупочвенной жизненных форм, поверхностно-обитающие формы отсутствовали. На контрольном лугу 2 относительное обилие почвенных коллембол составило 58%, а поверхностно-обитающих форм – 20%. Крупные беспозвоночные на обоих лугах представлены 10 таксономическими группами. Причем таксономический состав мезофауны загрязненного луга 1 и контрольного луга 2 практически не различались, но на лугу 1 высокого относительного обилия достигали Thysanoptera (45%), а на лугу 2 доминировали дождевые черви (60). Общая численность мезофауны выше на загрязненном лугу 1 ( $846 \pm 100.2$  экз./м<sup>2</sup>), что объясняется высокой численностью трипсов. Общая численность мезофауны на лугу 2 составила  $298 \pm 40.8$  экз./м<sup>2</sup>. На лугу 1 с повышенным радиационным фоном относительное обилие хищников и сапрофагов в составе мезофауны значительно ниже по сравнению с фоновым лугом 2. Одновременно на загрязненном лугу 1 отмечалось увеличение доли фитофагов в составе мезофауны. В результате установлено заметное угнетение почвенной фауны на лугу с повышенным содержанием радионуклидов в почве. Это прослеживается в изменениях таксономического состава, трофической и экологической структуры комплексов беспозвоночных. Результаты исследований подтверждаются аналогичными работами,

показывающими негативное влияние повышенных доз радиации на почвенную фауну [11, 13, 16].

В докладе будут обсуждены особенности пространственного распределения почвенных беспозвоночных, которое, как их состав и численность, представляет собой не только структурную характеристику почвенного населения, но и хороший критерий для определения изменений, происходящих в окружающей среде.

Исследования проведены при поддержке гранта Правительства Республики Коми и РФФИ (13-04-98847) и международного проекта STProjects-060 «Последствия хронического воздействия повышенного радиационного фона и химически токсичных веществ на организмы, популяции и сообщества животных и растений».

### Литература

1. Гераськин С.А., Евсеева Т.И., Таскаев А.И. и др. Биологические эффекты у растений и животных, обитающих на севере России, в районах с повышенным уровнем естественной радиоактивности // Радиационная биология. Радиоэкология, 2007. Т. 47. № 1. С. 34-53.
2. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Д.А. Криволицкий, Ф.А. Тихомиров, Е.А. Федоров и др. М.: Наука, 1988. 240 с.
3. Евсеева Т.И., Белых Е.С., Майстренко Т.А. и др. Латеральное распределение радионуклидов уранового и ториевого рядов в антропогенно измененных почвах на территории складирования отходов радиевого производства // Радиационная биология. Радиоэкология, 2012. Т. 52. № 1. С. 103-112.
4. Евсеева Т.И., Таскаев А.И., Кичигин А.И. Водный промысел. Сыктывкар, 2000. 39 с.
5. Криволицкий Д.А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 272 с.
6. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Шевченко О.Г. и др. Биологические эффекты в популяциях полевков-экономок в условиях повышенного фона радиации // Радиэкологические и биологические последствия низкоинтенсивных воздействий. Сыктывкар, 2003. С. 6-18. (Тр. Коми НЦ УрО РАН, № 172).
7. Максимова С.Л. Формирование комплексов почвенных беспозвоночных в зоне радиоактивного загрязнения // Биоразнообразие наземных и почвенных беспозвоночных на Севере. Сыктывкар, 1999. С. 131.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) СП-2.6.1.758-99. Минздрав России, 1999.
9. Пространственная экология почвенных животных / Под ред. Г.В. Добровольского. М., 2007. 175 с.
10. Семяшкина Т.М. Накопление естественных радионуклидов урана и тория почвенными животными // Радиоэкология биогеоценозов с повышенным фоном естественной радиоактивности. Сыктывкар, 1987. С. 127-131. (Тр. Коми филиала АН СССР, № 81).

11. *Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A.* et al. Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005. Vol. 80. P. 1–25.
12. *Gongalsky K.B.* Bioaccumulation of metals by soil-dwelling insects in a uranium production area // *European Journ. of Soil Biology*, 2006. Vol. 42. P. 180-185.
13. *Krivolutsky D.A.* Radiation ecology of soil animals // *Biology and Fertility of Soils*, 1987. Vol. 3. P. 51-55.
14. *Krivolutzkii D.A., Pokarzhevskii A.D.* Effects of radioactive fallout on soil animal populations in the 30 km zone of the Chernobyl atomic power station // *The Science of the Total Environment*, 1992. Vol. 112. P. 69-77.
15. *Jackson D., Copplestone D., Stone D. M., Smith G.M.* Terrestrial invertebrate population studies in the Chernobyl exclusion zone, Ukraine // *Radioprotection*, 2005. Vol. 40. P. 857-863.
16. *Krivolutzkii D.A., Kozhevnikova T.L., Martjushov V.Z., Antonenko G.I.* Effects of transuranic ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) elements on soil fauna // *Biology and Fertility of Soils*, 1992. Vol. 13. P. 79-84.
17. *Moller A.P., Mousseau T.A.* Reduced abundance of insects and spiders linked to radiation at Chernobyl 20 years after the accident // *Biol. Lett.*, 2009. № 5. P. 356-359.

#### THE SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL FAUNA ON THE AREA WITH HIGH LEVELS OF RADIONUCLIDES IN SOILS

A. Kolesnikova, T. Konakova, A. Kudrin, A. Taskaeva

Institute of biology, Komi scientific centre, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia, [kolesnikova@ib.komisc.ru](mailto:kolesnikova@ib.komisc.ru)

Preliminary data about diversity and number of soil invertebrate fauna on the area with high levels of radionuclides and metals were obtained. As result of researches, 32 genera of Nematoda were noted on the polluted site. The number of Nematoda on this site was  $282 \pm 74$  ind./100  $\text{sm}^3$ . 25 genera of Nematoda with number  $212 \pm 43$  ind./100  $\text{sm}^3$  were noted on the background site. Seven species of Collembola were noted on the meadow 1 and ten species of this group were registrated on the meadow 2. The high number of Collembola ( $11.5 \pm 5.9$  thous. ind./ $\text{m}^2$ ) was noted on the background site 2. Ten taxonomic groups of macrofauna were noted on the meadows 1 and 2. Thysanoptera was abundant group on the polluted meadow 1, Lumbricidae was abundant group on the background meadow 2. The total number of soil macrofauna was higher on the polluted area:  $846 \pm 100.2$  ind./ $\text{m}^2$ . But such results were explained high number of Thysanoptera. The total number of soil macrofauna on the background area was low:  $298 \pm 40.8$  ind./ $\text{m}^2$ . In sum, oppression of soil invertebrate fauna on the meadow with high levels of radionuclides and metals was revealed. It composed on the change of taxonomic and ecological structure of soil fauna on the area with high levels of radionuclides in soil. The spatial distribution of soil invertebrates also is good parameter for determination of changes in the state of environment.

## RADIATION HORMESIS AND RADIATION TOXICITY EVALUATION WITH MARINE LUMINOUS BACTERIA

N.S. Kudryasheva<sup>1, 2</sup>, M.A. Selivanova<sup>1, 2</sup>, T.V. Rozhko<sup>1, 2</sup>, O.A. Guseynov<sup>2</sup>,  
A.V. Tugarov<sup>3</sup>, A.A. Kamnev<sup>3</sup>, A.N. Devyatlovskaya<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms  
RAS, Saratov, Russia

<sup>4</sup> State Technological University LB, Lesosibirsk, Russia,  
[n\\_qdr@yahoo.com](mailto:n_qdr@yahoo.com)

Bioluminescence (BL) is glowing of living organisms; it is based on chemiluminescent enzymatic reactions. Marine luminous bacteria are widely used as bioassays for monitoring environmental toxicity. The main testing physiological parameter here is BL intensity.

BL intensity was monitored in solutions of alpha-emitting radionuclide Am-241 ( $\text{Am}(\text{NO}_3)_3$ , 0.4-6.7 kBq/L) and beta-emitting radionuclide H-3 (HTO,  $10\text{-}10^5$  kBq/L) under conditions of chronic irradiation. Three BL assay systems were used to study effects of the radionuclides: marine bacteria *Photobacterium phosphoreum* (intact and lyophilized) and coupled enzyme reactions.

Three stages of bacterial BL response to radionuclides were found in BL kinetics: (1) absence of effect, (2) activation, and (3) inhibition. The bacterial response was interpreted in terms of standard reaction of organisms to stress-factor; it includes the following successive stages: (1) stress recognition, (2) adaptive response/syndrome, and (3) suppression of physiological function. Stage (1) demonstrates the "threshold effect" of ionizing radiation, stage (2) – radiation hormesis, and stage (3) – radiation toxicity.

The duration of stages (1) and (2) were compared in solutions of Am-241 and in HTO for lyophilized and intact bacteria. It was found that damage of the bacterial cells by lyophilization procedure reduced the stages. Additionally, stages (1) and (2) were shorter in Am-241 solutions than in HTO. Variation of radioactivity in the solutions did not practically affect the duration of the stages and BL intensity.

In enzyme system, in contrast to the bacterial one, the kinetic stages mentioned above were not revealed, but the dependence of BL intensity on HTO specific radioactivity was found.

The role of peroxides in hormesis and in toxic effects of the radionuclides was studied using chemiluminescent luminol method. Peroxides were found in Am-solutions and were not found in HTO.

The increase of content of beta-structured proteins in bacterial cells exposed to HTO was demonstrated by diffuse reflectance FTIR spectro-

scopic studies. The changes were interpreted in terms of stress reaction of the bacterial cells to low-dose chronic radioactivity.

Accumulation of Am-241 and H-3 in bacterial cells and DNA was determined. Mutagenic effect of H-3 was investigated using restriction analysis of marker amplicons.

---

### МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ МЕЛКИХ ГРЫЗУНОВ НА РАЗЛИЧНЫЕ УРОВНИ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ В ЗОНЕ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА

Н.А. Орехова

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург,  
Россия, [naorekhova@mail.ru](mailto:naorekhova@mail.ru)

С целью изучения процессов физиологической адаптации природных популяций млекопитающих к хроническому низкодозовому облучению проводили исследование метаболических реакций на различные уровни радионуклидного загрязнения среды обитания в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС).

Проанализированы выборки малой лесной мыши (*Apodemus (S.) uralensis* Pall., 1811) и красной полевки (*Clethrionomys (Cl.) rutilus* Pall., 1779), отловленных на двух участках зоны ВУРСа с плотностью загрязнения почвы по  $^{90}\text{Sr}$  6740–16690, 43.7 кБк/м<sup>2</sup> [6] и контрольной территории с фоновым для Урала уровнем радиоактивного загрязнения (до 2 кБк/м<sup>2</sup>). Использован функционально-онтогенетический подход в отборе животных для эксперимента [3], они откалиброваны по репродуктивно-возрастному статусу и представлены незрелыми сеголетками. Получены биохимические показатели энергообмена, про- и антиоксидантных (ПО-АО) процессов, углеводного, липидного и белкового метаболизма.

Установлено, что с повышением уровня радионуклидного загрязнения среды обитания у малой лесной мыши:

- увеличивается отношение ТВК-АП/общие липиды в печени и надпочечниках, что свидетельствует об активации катаболизма липидов, обусловленного жиромобилизующим эффектом и синтезом кортикостероидных гормонов [5, 7];

- возрастает активность цитохромоксидазы и снижается содержание митохондриального белка в печени, миокарде и головном мозге (рис. 1), что указывает на реализацию окислительного синтеза макроэргов в тканях за счет повышенного режима функционирования митохондрий [1];

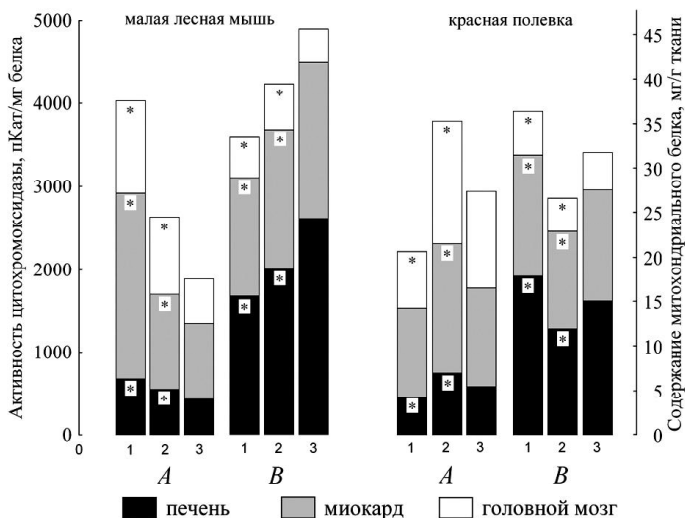


Рис. 1. Активность цитохромоксидазы (A) и содержание митохондриального белка (B) у грызунов, отловленных на участках с различным уровнем радионуклидного загрязнения среды обитания.

Здесь и на рис. 1-3 – участки отлова с плотностью загрязнения почвы по  $^{90}\text{Sr}$  6740-16690, 43.7, до 2.0 КБк/м<sup>2</sup> соответственно; \* различия с контролем статистически значимы при  $p < 0.05$ .

– снижается отношение активность каталазы/концентрация ТБК-АП в митохондриях (рис. 2), что является признаками ПО-АО дисбаланса как результата активации в электрон-транспортной дыхательной цепи кислород-зависимых реакций и недостаточности функционирования антиоксидантной защиты [2];

– увеличивается уровень гликогена печени на фоне снижения содержания наиболее чувствительных к деструкции белков селезенки и плазмы крови, что свидетельствует о стимуляции глюконеогенеза в качестве механизма дополнительного энергообеспечения возросшей клеточно-тканевой функциональной активности [4].

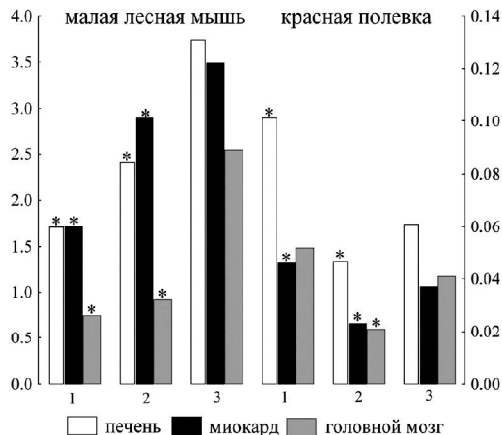
Комплекс метаболических изменений позволяет говорить о формировании у этого вида на двух участках ВУРСа стресс-реализующей стратегии физиологической адаптации, являющейся базисом для функциональной активации клеток и тканей. Энергозатратные механизмы приспособления к радиоактивной среде приводят к ограничению восстановительных реакций метаболического гомеостаза, что выражается в снижении уровня биогенеза митохондрий, недостаточности антиоксидантной защиты и повышении деструкции белков селезенки и плазмы крови.



Рис. 2. Отношение активности каталазы к концентрации ТБК-АП в митохондриях печени (по левой оси ординат), миокарда и головного мозга (по правой оси ординат) у грызунов, отловленных на участках с различным уровнем радионуклидного загрязнения среды обитания.

Направленность функционально-метаболических сдвигов у красной полевки на участке с плотностью загрязнения 43.7 кБк/м<sup>2</sup> идентична таковой у малой лесной мыши. При более высокой плотности загрязнения почвы по <sup>90</sup>Sr (6740-16690 кБк/м<sup>2</sup>) в организме красной полевки наблюдается снижение уровня липидного катаболизма в тканях, степени функциональной нагрузки на митохондрии за счет стимуляции их биогенеза и ограничения энергообразующих и прооксидантных процессов. Это определяет на данном участке ВУРСа у этого вида гипобиотическую стратегию физиологической адаптации как основы для ограничения клеточно-тканевой функциональной активности. Ресурсо- и энергосберегающие механизмы этой стратегии обуславливают реализацию восстановительных реакций, что выражается повышенным уровнем пластических, белок-синтезирующих процес-

Выбор адаптационной стратегии зависит от сформированных в процессе эволюции видовых особенностей гомеостаза. У малой лесной мыши исходно высокое содержание энергетических резервов в организме в виде гликогена и липидов печени и меньшая напряженность функционирования клеточно-тканевых систем дают возможность для устойчивой активации окислительного метаболизма и повышения режима функционирования при хроническом низкодозовом радиационном воздействии разных уровней. У красной полевки переход на ресурсосберегающую гипобиотическую стратегию приспособления при высоком уровне радиационной нагрузки детерминирован исходно высокой напряженностью функционирования клеток и тканей и низким содержанием энергетических резервов, которые у данного вида имеют место в результате генетически закрепленных гомеостатических реакций к суровым климато-географическим условиям Севера.



### Литература

1. *Большаков В.Н., Ковальчук Л.А., Ястребов А.П.* Энергетический обмен у полевок и его изменения в экстремальных условиях. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1984. 104 с.
2. *Лю Б.Н., Лю М.Б., Исмаилов Б.И.* Роль митохондрий в развитии и регуляции уровня окислительного стресса в норме, при клеточных патологиях и реверсии опухолевых клеток // *Успехи соврем. биологии*, 2006. Т. 126. № 4. С. 388-398.
3. *Оленев Г.В.* Альтернативные типы онтогенеза цикломорфных грызунов и их роль в популяционной динамике: (экол. анализ) // *Экология*, 2002. № 5. С. 341-350.
4. *Colin M.* Gluconeogenesis and the Peroxisome // *Molecular and Cellular Biochemistry*, 1997. Vol. 166. № 1-2. P. 159-168.
5. *Hershosh D., Vogel W.H.* The effects of immobilisation stress on serum triglycerides, nonesterified fatty acids and total cholesterol in male rats after dietary modifications // *Life Sciences*, 1989. Vol. 45. P. 157- 165.
6. *Molchanova I.V., Pozolotina V.N., Karavaeva E.N.* et al. Radioactive inventories within the East-Ural radioactivestate reserve on the Southern Urals // *Radioprotection*, 2009. Vol. 44. № 5. P. 747-757.
7. *Nakamura J., Otsuka H., Tamaoki B.* Requirement of a new flavoprotein in steroid 11 and 18 hydroxylase system // *Bioch. Bioph. Acta*, 1966. Vol. 122. P. 34-45.

## METABOLIC RESPONSE OF SMALL RODENTS AT VARIOUS LEVELS RADIONUCLIDE CONTAMINATION OF THE ENVIRONMENT WITHIN THE EAST-URAL RADIOACTIVE TRACE

**N.A. Orekhova**

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy  
of Sciences, Ekaterinburg, Russia, [naorekhova@mail.ru](mailto:naorekhova@mail.ru)

In order to study the processes of physiological adaptation of natural populations of mammals to chronic low-dose radiation have been researching metabolic responses to different levels of radionuclide contamination of the environment in the East Ural Radioactive Trace (EURT) area. *Apodemus (S.) uralensis* and *Clethrionomys (Cl.) rutilus*, captured at two sites of the EURT area with a density of soil contamination by  $^{90}\text{Sr}$  6740-16690 kBq/m<sup>2</sup>, 43.7 kBq/m<sup>2</sup> and a control area with the background to the Urals level of radioactive contamination (up to 2 kBq/m<sup>2</sup>), were analyzed. The biochemical parameters of energy, pro- and antioxidant processes, carbohydrate, lipid and protein metabolism were obtained. The strategies of physiological adaptation of the studied species to different levels radiation were determined as well as the dependence of their realization on functionally-metabolic peculiarity of the species was established.

## ПОСЛЕДСТВИЯ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ ДЛЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЗОНЕ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА

В.Н. Позолотина, Е.В. Антонова, Э.М. Каримуллина  
Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург,  
Россия, [pozolotina@ipae.uran.ru](mailto:pozolotina@ipae.uran.ru)

Одна из первых в мире крупных ядерных аварий произошла на ПО «Маяк» 29 сентября 1957 г. В результате аварии сформировался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), протяженностью около 300 км [3, 4]. Радиоэкологические исследования в зоне ВУРСа проводятся нами более 20 лет по трем взаимодополняющим направлениям: первое включает оценку содержания радионуклидов в почвах и растениях; второе – расчет на этой основе дозовых нагрузок, третье – изучение биологических эффектов у некоторых модельных видов травянистых растений, произрастающих в градиенте загрязнения. В настоящей работе представлено краткое обобщение полученных данных [1, 2, 3, 7].

Изучено содержание в почвах и вегетативной массе растений  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  – основных дозообразующих радионуклидов. С увеличением расстояния от ПО «Маяк» содержание  $^{90}\text{Sr}$  снижается от 95 до 0.4 МБк/м<sup>2</sup>,  $^{137}\text{Cs}$  – от 0.90 до 0.02. Закономерности их пространственного распределения и накопления растениями разных таксономических групп представлено в работах [3, 7]. На основе эмпирических данных нами рассчитаны поглощенные дозы для модельных видов травянистых растений с применением двух программ: R&D128/SP1a и ERICA Tool. Эти программы используют разные величины коэффициентов дозовой конверсии и различные подходы в оценке размеров организмов и их расположения в пространстве. Согласно R&D128/SP1a, внешнее облучение играет наибольшую роль, в то время как ERICA показывает более существенный вклад внутреннего облучения. Этот вопрос подробно обсуждается в нашей статье [6]. Принимая в расчет естественный радиационный фон (для Урала он равен 0.1-0.2 мкГр/ч) и нагрузку за счет техногенных радионуклидов, мы установили, что согласно ERICA Tool, мощности поглощенных доз на травянистые растения превышают фоновый уровень в среднем в два-пять раз на буферных участках (периферии ВУРСа) и в 18-100 раз на импактных (центральная ось следа). Программа R&D128/SP1a показала, что различия с фоном достигают на буферных участках 3.5-34.5 раза, на импактных – 275-720.

Эффекты радиационного поражения фитоценозов в первые годы после аварии подробно описаны в книге [4]. В настоящее время в

зоне ВУРСа идут восстановительные сукцессионные процессы. На тех же местах, что и до аварии, преобладают вторичные березовые леса, встречаются осиновые колки и посадки сосны. Луговая растительность представлена старыми покосными лугами с доминированием злаков и разнотравья, а также вторичными лугами с доминированием луговых и рудеральных растений. На месте отселенных деревьев произрастает нитрофильный бурьян. Подробное описание растительности ВУРСа дано в работе [3]. Не выявлено прямой зависимости между уровнем радиационного фона и видовым богатством в изученных фитоценозах. Среднее число видов в сообществах ( $\alpha$ -разнообразии) практически не изменяется с удалением от эпицентра аварии. Видовое богатство всех растительных сообществ на определенной пробной площади ( $\beta$ -разнообразии) при удалении от эпицентра аварии увеличивается, но связано это в основном с большой мозаичностью растительности на этих участках.

Исследуя в течение нескольких лет жизнеспособность семенного потомства у разных модельных видов растений, мы установили, что невозможно сделать однозначного заключения о влиянии малых доз радиации. В одни годы наблюдали эффекты подавления, в другие – превышение над контрольным уровнем, в некоторые годы не отмечено существенных различий с фоновыми выборками. Очевидно, что в природных условиях на растения, помимо радиации, действует весь комплекс изменчивых экологических факторов, прежде всего погодных условий. На примере звездчатки злаковой нами установлена обратная зависимость между выживаемостью проростков с импактных участков и суммой эффективных температур за июнь (время роста вегетативных органов,  $R = -0.82$ ;  $p = 0.0035$ ) и прямая – за август (период формирования семян,  $R = 0.74$ ;  $p = 0.013$ ). В фоновых выборках подобных закономерностей не установлено ( $R = -0.18 \dots -0.015$ ;  $p = 0.69-0.97$ ). Между выживаемостью семенного потомства из зоны ВУРСа и суммарным количеством осадков наблюдалась обратная зависимость в августе ( $R = -0.81$ ;  $p = 0.0046$ ) с отсутствием каких-либо закономерностей на фоновых участках ( $R = -0.46$ ;  $p = 0.29$ ). Следовательно, семена лучшего качества формировались у звездчатки в зоне ВУРСа в условиях высоких температур и небольшого количества осадков в августе. На фоновых площадках зависимость между качеством семенного потомства звездчатки и погодными условиями отсутствовала. Аналогичные результаты получены для других видов [1, 3].

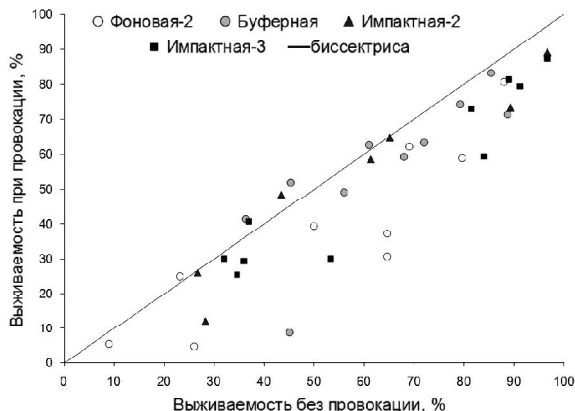
Адаптивный потенциал ценопопуляций оценивали по устойчивости семенного потомства к дополнительному облучению. У всех изученных видов наблюдалось разнообразие реакций на провокационное облучение по сравнению с фоновыми выборками: в некоторые годы отмечалось увеличение или уменьшение устойчивости, а

иногда значимые различия отсутствовали. Рассмотрим этот вопрос подробнее с учетом индивидуальной изменчивости выживаемости на примере дремы белой (см. рисунок).

Семена дремы предварительно облучали в дозе 200 Гр. Потомки каждого растения (исследовано 10-20 растений на выборку) проращивались отдельно. Ценопопуляции не различались между собой по средним значениям выживаемости проростков ( $H(3, n = 104) = 2.7-2.94; p = 0.44$ ). Во всех выборках наблюдалась значимая зависимость между исходной выживаемостью проростков и их устойчивостью к дополнительному облучению (значения коэффициентов детерминации для импактных выборок составили  $R^2 = 0.95-0.96; p < 0.001$ ; для буферной –  $R^2 = 0.80; p = 0.0052$ ; для фоновой –  $R^2 = 0.90; p = 0.0009$ ). Выявленная закономерность не зависит от уровня радионуклидного загрязнения местообитания родительских растений, т.е. устойчивого эффекта радиоадаптации в ценопопуляциях ВУРСа не наблюдается. Аналогичные результаты были получены для других видов [2].

Многолетние исследования нескольких десятков видов свидетельствуют о высокой частоте хромосомных aberrаций у растений из загрязненной зоны. У некоторых видов отмечен сдвиг частот аллелей ведущих ферментных систем и появление редких аллелей в ценопопуляциях ВУРСа [3-5]. В ценопопуляции бодяка щетинистого в районе лежневой дороги более 80% растений несут мутацию типа *albina*. У дремы белой в зоне ВУРСа обнаружены растения с обооплодными цветками, в то время как в норме у этого двудомного вида четко выражен половой диморфизм. Растения  $F_1$ -поколения обоих видов, выращенные на опытных площадках, также несут эти признаки, следовательно, они наследуются. У всех изученных видов растений в семенном потомстве из зоны ВУРСа повышена частота встречаемости аномальных проростков, причем провокационное облучение выявляет скрытую изменчивость мутабельности, повышая частоту

Внутрипопуляционная изменчивость радиочувствительности семенного потомства дремы белой из фоновых и облучаемых ценопопуляций.



ту морфозов в несколько раз, в фоновых выборках этот феномен не проявляется [1, 3, 4].

Опыт наблюдений в загрязненных зонах свидетельствует, что большая часть видов способна выжить и адаптироваться к условиям радиоактивного загрязнения. Полученные нами данные показывают, что экологические подходы, учитывающие эффекты взаимодействия радиации с другими факторами среды, оценивающих внутри- и межпопуляционную изменчивость признаков в течение длительного времени, а также особенности разных видов, позволяют объективно оценить последствия хронического действия малых доз радиации на растительность в отдаленные сроки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 12-04-31769), Программы междисциплинарных исследований между Институтами УрО РАН (проект № 12-М-24-2016), Программы развития ведущих научных школ (НШ-5325.2012.4).

#### Литература

1. Антонова Е.В., Каримуллина Э.М., Позолотина В.Н. Внутривидовая изменчивость дремы белой в градиенте радионуклидного загрязнения ВУРСа // Экология, 2013. № 1. С. 18-27.
2. Позолотина В.Н., Антонова Е.В., Каримуллина Э.М. Эколого-генетическая характеристика звездчатки злаковой в условиях радиоактивного загрязнения // Экология, 2010. № 6. С. 459-468.
3. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваяева Е.Н. и др. Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа. Екатеринбург: Гощицкий, 2008. 204 с.
4. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. М.: Наука, 1993. 336 с.
5. Шевченко В.А., Печкуренок В.Л., Абрамов В.И. Радиационная генетика природных популяций. М.: Наука, 1992. 221 с.
6. Karimullina E., Antonova E., Pozolotina V. Assessing radiation exposure of herbaceous plants species at the East-Ural Radioactive Trace // J. of Environ. Radioactivity, 2013. Vol. 124. P. 113-120.
7. Molchanova I., Pozolotina V., Karavaeva E. et al. Radioactive inventories within the East-Ural radioactive state reserve on the Southern Urals // Radioprotection, 2009. Vol. 44. № 5. P. 747-757.

#### OUTCOMES OF LOW DOSE CHRONIC RADIATION FOR PLANTS FROM THE EASTERN URAL RADIOACTIVE TRACE ZONE

V.N. Pozolotina, E.V. Antonova, E.M. Karimullina

Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Division of Russian Academy  
of Sciences, Yekaterinburg, Russia, [pozolotina@ipae.uran.ru](mailto:pozolotina@ipae.uran.ru)

The studies were carried out in the EURT zone in three complementary directions: the first is the estimation of radionuclides accumulation in soils

and plants, the second – the assessment of dose rates, and the third – the study of radiobiological effects for some species of herbaceous plants. Ecological methodology takes into account the effects of the interaction of radiation with other environmental factors, evaluates the intra-and inter-population variations of different characteristics for a long time and reveals the remote consequences of chronic irradiation in low-doses on vegetation.

---

## ОЦЕНКА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В КЛЕТКАХ Фолликулярного ЭПИТЕЛИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПОЛЕВОК, ОБИТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ РАДИОАКТИВНОСТИ, И ИХ ПОТОМКОВ

О.В. Раскоша, О.В. Ермакова, Н.Н. Старобор  
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[raskosha@ib.komisc.ru](mailto:raskosha@ib.komisc.ru)

Одной из проблем радиационной цитогенетики является оценка мутационного груза, основным компонентом которого считают цитогенетические повреждения в соматических клетках, в том числе и в щитовидной железе у животных, длительное время находящихся под воздействием повышенного радиационного фона.

Цель настоящего исследования – цитогенетическая оценка щитовидной железы полевок, отловленных на участках с повышенным уровнем радиоактивности, и их потомков, полученных в виварии в условиях нормального радиационного фона.

Полевки-экономки отловлены на контрольном и радиевом участках (Республика Коми). В почвах радиевого участка содержание  $^{226}\text{Ra}$  было на три порядка выше нормы, мощность  $\gamma$ -излучения превышала фоновые значения в 10-300 раз и варьировала в пределах 0.5-12.5 мкГр/ч. Суммарная доза облучения для группы животных, обитающих на этом участке, составляла от 1.2 до 24 сГр/год, реальные поглощенные дозы находятся в промежутке между этими значениями. В условиях загрязнения территории подземными радиоактивными водами популяция полевок-экономок обитает уже более 60 лет. Полевок с обоих участков доставили в питомник экспериментальных животных, где от них было получено потомство –  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ .

Выявление цитогенетических нарушений осуществляли с помощью микроядерного теста, анализа частоты повреждений ДНК – метод ДНК комет в нейтральной и щелочной версиях рН (двунитевые (ДР) и одностранные (ОД) разрывы ДНК соответственно) и путем подсчета клеток, находящихся на стадии апоптоза (метод диффузии ДНК в геле). Мазки тиреоидных клеток окрашивали акри-

диновым оранжевым и подсчитывали число микронуклеированных тироцитов на 1 тыс. клеток, количество апоптозных клеток на 500 клеток, количество ДНК не менее чем на 50 клеток на животное.

Изучение ответной реакции клеток щитовидной железы мышевидных грызунов из природных популяций, населяющих территории с нормальным и повышенным уровнями естественной радиоактивности, показало, что хроническое облучение в малых дозах индуцирует повышение количества тироцитов с микроядрами по сравнению с контролем в два-шесть раз, при этом уровень клеток, гибнущих по механизму апоптоза, и клеток с ОР и ДР ДНК оставался в пределах контрольных значений.

Анализ состояния генома клеток щитовидной железы у потомков этих животных ( $F_1$ - $F_3$ ) показал, что количество микронуклеированных тироцитов у полевок, предки которых обитали в условиях радиационного воздействия, сохранялось в пределах контроля, а достоверные отличия проявлялись по степени фрагментации ДНК и уровню клеток, гибнущих по механизму апоптоза. У животных  $F_1$  отмечали статистически значимое повышение количества ДР ДНК и клеток на стадии апоптоза. В  $F_2$  у полевок в щитовидной железе повышался уровень апоптозных клеток, степень фрагментации ДНК достоверно от нормы не отличалась. У животных  $F_3$  по сравнению с  $F_3$  контрольной группы снижалась индукция ДР ДНК и клеток, находящихся на стадии запрограммированной гибели, при этом прослеживалось достоверное увеличение уровня ОР ДНК.

Следует отметить, что по сравнению с родителями (полевками из природных популяций с загрязненных территорий) у их потомков ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ), содержащихся в виварии в условиях нормального уровня радиационного фона, происходит уменьшение количества клеток с микроядрами и увеличение числа апоптозных клеток. Уровень ДР ДНК в щитовидной железе достоверно повышался у  $F_1$  по сравнению с их облученными родителями (в 2,2 раза), в других поколениях животных различий не выявлено. Индукция ОР ДНК возрастала в третьем поколении полевок – потомков животных с радиоактивного участка по сравнению с их облученными предками.

Таким образом, обитание животных на участках с повышенным радиационным фоном может приводить к усилению формирования клеток с микроядрами по сравнению с полевками, обитающими на контрольном участке. У потомков облученных животных, помещенных в условия нормального уровня радиационного фона, по сравнению с облученными животными из природных популяций прослеживаются цитогенетические нарушения, выражающиеся в изменении уровней фрагментации ДНК и клеток на стадии апоптоза, что, по-видимому, связано с различием в механизмах защиты клеток у



облученных животных и их потомков. Мы планируем продолжить начатые исследования для уточнения механизмов цитогенетических изменений, формирующихся в ответ на непосредственное или опосредованное действие радиации.

Работа поддержана грантами РФФИ № 13-04-01750а и № 13-04-90351-РБУа.

#### **GENETIC CHANGES IN CELLS OF FOLLICULAR EPITHELIUM THYROID GLAND OF VOLES, LIVES IN CONDITIONS OF HIGH LEVELS OF RADIOACTIVITY AND THEIR DESCENDANTS**

**O.V. Raskosha, O.V. Ermakova, N.N. Starobor**

Institute of biology of Komi SC UD the Russian Academy of Science, Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia, [raskosha@ib.komisc.ru](mailto:raskosha@ib.komisc.ru)

The state of the cells of the thyroid gland voles, which were captured in areas with elevated levels of radioactivity, and their children, who developed the vivarium at normal background radiation. Under the influence of chronic  $\gamma$ -radiation in the animals can grow cell with micronuclei compared with voles control plot. In children exposed animals compared to their ancestors from natural populations observed changes in level of DNA fragmentation and apoptosis in cells.

---

#### **ПРОЦЕССЫ РАЗМНОЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВИВАРИЯ ПОТОМКОВ ПОЛЕВОК-ЭКОНОМОК, РОДИТЕЛИ КОТОРЫХ ОТЛОВЛЕНЫ НА УЧАСТКАХ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ РАДИОАКТИВНОСТИ**

**Н.Н. Старобор, О.В. Ермакова, Л.А. Башлыкова, О.В. Раскоша**

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, [starobor@ib.komisc.ru](mailto:starobor@ib.komisc.ru)

Данная работа является продолжением серии исследований по изучению в условиях вивария процессов размножения, роста и развития потомков полевок-экономок [1, 2, 8], предки которых в течение многих поколений (~100) обитали на участках с повышенным радиационным фоном естественного и техногенного происхождения. Полевки-экономки (*Microtus oeconomus* Pall.) отлавливали на стационарных участках с различным уровнем  $\gamma$ -фона (пос. Водный Ухтинского района Республики Коми), которые были идентичны по экологическим условиям, но отличались по радиационной обстановке. На контрольном участке мощность экспозиционной дозы составляет 10-15 мкР/ч. Радиевый участок (1.5 га) возник в 30-50-е гг. прош-

лого столетия в результате разлива радиоактивных пластовых вод, содержащих высокие концентрации радия.  $\gamma$ -фон на территории участка в настоящее время составляет 50-1200 мкР/ч. Отловленные животные были привезены в виварий Института биологии Коми НЦ УрО РАН г. Сыктывкара, где в последующем от них получено потомство.

Для повышения выхода гомозиготных особей применяли метод близкородственного скрещивания (инбридинг). Из половозрелых самцов и самок ( $F_1$ ) контрольного и радиевого участков были сформированы четыре группы животных (варианты скрещивания): 1-2) контроль – родственное и неродственное скрещивания; 3-4) радиевый – родственное и неродственное скрещивания. В течение эксперимента у первого поколения ( $F_1$ ) полевок-экономок оценивали интенсивность размножения (количество пар животных, участвующих в размножении за определенный период времени), плодовитость, скорость роста молодняка ( $F_2$ , с двух недель до трех месяцев) и уровень постэмбриональной смертности.

Выявлены различия в интенсивности размножения потомков полевок, отловленных на исследуемых участках. При неродственном скрещивании первого поколения полевок контрольного участка интенсивность размножения в среднем составляла 94.6%, радиевого – 93.1. При родственном скрещивании в контрольной группе животных средняя интенсивность размножения – 86.4%, у полевок радиевого участка – 53.4. Низкая интенсивность размножения при родственном скрещивании полевок радиевого участка отразилась и на их плодовитости. Такие показатели размножения, как среднее число пометов на одну самку –  $2.3 \pm 0.30$  и количество детенышей на самку –  $8.4 \pm 1.19$  были ниже ( $p < 0.05$ ), чем в контрольной группе ( $3.3 \pm 0.62$  и  $14.3 \pm 2.50$  соответственно). Снижение фактической плодовитости при родственном скрещивании у самок радиевого участка свидетельствует о наличии рецессивных леталей.

Наряду с низкой плодовитостью у самок ( $F_1$ ) радиевого участка обнаружено достоверное увеличение постэмбриональной смертности детенышей (см. рисунок). Высокая гибель детенышей (32.6%) в течение первого месяца жизни при родственном скрещивании свидетельствует о повышенном уровне генетических повреждений. При неродственном скрещивании в первый месяц жизни погибло в 2.5 раза меньше полевок – 14.8%. В итоге к периоду половой зрелости (до 3 мес.) общая смертность потомков при родственном скрещивании составила 32.6%, при неродственном – 22.1% от общего количества рожденных детенышей и была достоверно выше контрольных показателей (16.3 и 11.9% соответственно).

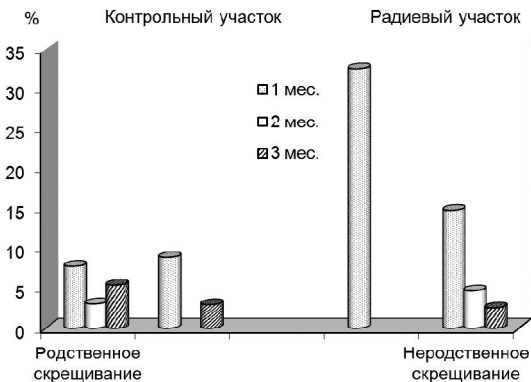
Постнатальная смертность полевок-экономок ( $F_2$ ) в различных вариантах скрещивания (в возрасте от одного до трех месяцев).

Скорость роста молодняка ( $F_2$ ) у животных контрольной и радиевой групп в возрасте двух недель при обоих вариантах скрещивания статистически не отличалась. Однако при нерод-

ственном скрещивании в контрольной группе полевок масса тела была выше ( $p < 0.05$ ), чем в радиевой. Ранжирование потомства по массе тела показало, что в контроле при родственном скрещивании 74.6% детенышей имели небольшую массу тела (до 12.0 г), а при неродственном, наоборот, выше была доля крупных детенышей (более 12.0 г – 55.1%). В радиевой группе в обоих вариантах скрещивания наибольшую часть составляли медленно растущие потомки (57.1% при родственном и 63.3 – при неродственном скрещиваниях). Снижение массы тела у детенышей при инбридинге отмечали и другие авторы [3, 4].

Изучение массы тела у полевок (в возрасте 1, 2 и 3 мес.) не выявило достоверных изменений по скорости роста между животными контрольного и радиевого участков. У контрольных самцов в обоих вариантах скрещивания статистически значимого изменения массы тела ни в одной возрастной группе не обнаружено. У самцов радиевого участка при родственном скрещивании зафиксировано наибольшее изменение скорости роста, чем при неродственном скрещивании. Увеличение массы тела наблюдалось уже после достижения ими возраста одного месяца ( $p < 0.01$ ), а при неродственном скрещивании – только в три месяца ( $p < 0.01$ ). У самок достоверных отличий не обнаружено ни в одной изученной группе.

По данным литературы, в лабораторных колониях красно-серых полевок [9] и рыжих полевок [6] соотношение полов при рождении сбалансировано. В нашем эксперименте в потомстве обеих групп животных при родственном скрещивании было больше самцов, чем самок. Так, в контроле доля самцов достоверно выше (60.9%), чем самок (39.1). При неродственном скрещивании в потомстве полевок контрольного участка также преобладали самцы (57.9%; самки – 42.1), тогда как у животных радиевого участка количество родившихся самцов и самок было одинаковым (49.7 и 50.3% соот-



ветственно). Увеличение доли самцов в пометах выявлено другими исследователями у водяных полевок и джунгарских хомячков при разведении их в лабораторных условиях [5, 7, 10].

Результаты проведенного эксперимента показали, что при неродственном скрещивании у потомков животных контрольного и радиевого участков различий в исследуемых показателях размножения не обнаружено. При родственном скрещивании в условиях вивария у полевок-экономок ( $F_1$ ), родители которых обитали на контрольном участке, наблюдалось увеличение интенсивности размножения и плодовитости животных, а также низкая постэмбриональная смертность. У потомков полевок радиевого участка при родственном скрещивании выявлена низкая интенсивность размножения, снижение общей плодовитости полевок, высокая постнатальная смертность детенышей, что, возможно, свидетельствует о повышении генетического груза в облученной популяции животных.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 13- 04-90351-РБУ\_а.

#### Литература

1. Башлыкова Л.А. Эколого-генетические процессы в популяциях мышевидных грызунов, обитающих в условиях радиоактивных загрязнений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2000. 20 с.
2. Башлыкова Л.А., Ермакова О.В. Сравнительная характеристика популяций мышевидных грызунов из районов с повышенной радиоактивностью // Радиэкологические исследования в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Сыктывкар, 2006. С. 69-98. (Тр. Коми НЦ УрО РАН, № 180).
3. Евсиков В.И., Потапов М.А. Эволюционная экология плодовитости животных: 50 лет изучения размножения как связующего звена поколений млекопитающих // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2011. Т. 15. № 1. С. 7-21.
4. Кокенова Г.Т. Влияние брачного подбора и длительности инбредного разведения на репродуктивные характеристики степной пеструшки (*Lagurus lagurus*): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2007. 22 с.
5. Назарова Г.Г. Материнское влияние на приспособленность потомков и численность популяции. Автореф. дис. ... док. биол. наук. Новосибирск, 2008. 39 с.
6. Оленев Г.В., Григоркина Е.Б. Динамическое соотношение полов в популяциях цикломорфных млекопитающих (Rodenta, Cricetidae, Muridae) // Зоологический журнал, 2011. Т. 90. № 1. С. 45-58.
7. Потапов М.А., Евсиков В.И. Эволюционная экология плодовитости животных: факторы эпигамного полового отбора у грызунов // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2011. Т. 15. № 1. С. 22-34.
8. Старобор Н.Н. Показатели размножения потомков полевок-экономок, родители которых обитали в условиях повышенного уровня радиоактивности // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. XIX Всерос. молодеж. науч. конф. Сыктывкар, 2012. С. 212-215.

9. Шляпкинова М.С., Гилева Э.А. Изменчивость соотношения полов в лабораторной колонии красно-серой полевки и гипотеза Трайверса-Уилларда // Экология, 1990. № 5. С. 73-79.

10. *Evsikov V.I., Nazarova G.G., Potapov M.A. et al. Ecological factors determine differential reproduction in mammals / Biodiversity and dynamics of ecosystems of northern Eurasia. Novosibirsk: IC&G, 2000. Vol. 1. P. 21-23.*

**THE PROCESSES OF REPRODUCTION IN THE VIVARIUM OFFSPRING  
OF MICROTUS OECONOMUS (PALL.),  
WHOSE PARENTS WERE CAPTURED IN AREAS WITH DIFFERENT LEVELS  
OF RADIOACTIVITY**

**N.N. Starobor, O.V. Ermakova, L.A. Bashlykova, O.V. Raskosha**  
Institute of biology of Komi SC UD the Russian Academy of Science,  
Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia, [starobor@ib.komisc.ru](mailto:starobor@ib.komisc.ru)

In the vivarium studied the processes of reproduction (with related and unrelated crosses) in the first generation ( $F_1$ ) of *Microtus oeconomus* (Pall.), whose parents were caught in areas with different levels of radioactivity. It was found that the inbreeding in voles ( $F_1$ ) control region revealed an increase in the intensity of reproduction, increasing the fertility of animals, and poor postnatal pup mortality. Whereas, in the offspring of voles with radioactive sites showed low intensity of reproduction, reducing the total fertility, high mortality postnatal pups, which may indicate an increase in the genetic load of the irradiated animal population. When crossing an unrelated differences in the parameters studied in the offspring of animals of both sections were found.

---

**РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ:  
РАЗВИТИЕ ЭКОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ**

**А.А. Удалова**  
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ»,  
Обнинск, Россия, [oudalova@mail.ru](mailto:oudalova@mail.ru)

В современном обществе растет понимание необходимости кардинально изменить систему взаимоотношений человека и окружающей среды и ограничить антропогенное воздействие на компоненты природных и аграрных экосистем до уровня, при котором обеспечивается их устойчивое функционирование. Ренессанс атомной энергетики и интенсивное внедрение радиационных технологий привлекают особое внимание к ионизирующей радиации как экологическому фактору.

Сегодня радиационная защита окружающей среды базируется на антропоцентрическом постулате, согласно которому защита биоты гарантирована, если обеспечена безопасность человека [10, 11]. С конца прошлого века, однако, происходит усиление экоцентрических принципов, в рамках которых в число объектов радиационной защиты предлагается в явном виде включать не только человека, но и компоненты экосистем. Хотя эта точка зрения встречает понимание в самых широких кругах, специалисты подчеркивают, что перестройка существующей концепции радиационной безопасности потребует решения сложных научных проблем [1]: разработки вопросов экологической дозиметрии, выбора референтных видов биоты, определения критериев радиационной защиты флоры и фауны, установления зависимостей «доза-эффект» и обоснования дозовых пределов облучения биоты.

В последние годы разные аспекты методологии экологического нормирования радиационного воздействия на биоту активно развиваются (см. обзор в [2]). МКРЗ была выдвинута концепция референтных животных и растений и предложен набор из 12 таких видов, типичных для разных критических экосистем [12]. Разработаны модели оценки дозовых нагрузок на референтные виды; подготовлены справочные материалы по коэффициентам накопления радионуклидов в референтной биоте наземных и водных экосистем. Обсуждаются проблемы экстраполяции данных между разными уровнями организации живого (с организменного на популяционный) и ситуациями облучения (от острого к хроническому), установление величин ОБЭ для представителей биоты и др.

Одной из самых важных остается проблема установления безопасных уровней облучения биоты. В целом, в настоящее время принято считать безопасными уровни хронического облучения менее 4 Гр/год для наземных растений и водных животных и менее 0.4 Гр/год для наземных животных [5]. Рядом международных (МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН) и национальных организаций (в США, Канаде, ЕЭС) были предложены собственные, носящие рекомендательный характер, пределы допустимого облучения живых организмов; при их оценке использовались разные подходы и принципы. Как правило, рекомендации в отношении допустимых уровней облучения биоты основываются на экспертном обзоре существующих данных [5], а следовательно, страдают определенным субъективизмом. Первые попытки применить более формализованный подход, основанный на методологии оценки экологического риска, были предприняты J. Garnier-Laplace с соавт. [7-9]. Европейские ученые оценили критические дозы и мощности доз излучения для нескольких десятков организмов водных и наземных экосистем [8, 9], что позволило провести оценки предельно допустимых уровней радиаци-

онного воздействия для «обобщенной» экосистемы, наземной и водной экосистем, а также для отдельных групп живых организмов (позвоночных и беспозвоночных животных, растений). В этих работах, однако, как объект радиационной защиты рассматривалась исключительно дикая природа.

В настоящей работе в качестве модельного объекта взяты агроэкосистемы. В контексте радиационной защиты окружающей среды агроэкосистемы уникальны, поскольку, с одной стороны, они являются начальным звеном ведущих к человеку пищевых цепочек, с другой – имеют более высокую чувствительность по сравнению с естественными экосистемами ко всем видам стрессового воздействия. Кроме того, именно для сельскохозяйственных растений и животных получены основные радиобиологические данные.

Цель настоящего исследования – развитие методов установления критических дозовых нагрузок на экосистемы, а среди частных задач – изучение степени влияния типа дозовой зависимости и способа обработки большого массива данных на величину критических дозовых нагрузок.

В работе использована база данных «Биологическое действие ионизирующих излучений на растения» (БД) [3], которая содержит более 7 тыс. записей об изменениях выживаемости, продуктивности, заболеваемости, генетических, морфологических и биохимических показателей у растений под действием радиации. Каждая запись включает экспериментально установленную дозовую зависимость. Более 5 тыс. записей относятся к культурным растениям. Используя собранные в БД данные, методами регрессионного анализа восстанавливали зависимости «доза (мощность дозы)–биологический эффект» для каждого вида растений и каждого типа биологических эффектов. На основе полученных дозовых зависимостей оценивали критические дозовые нагрузки, в качестве которых при остром облучении рассматривали дозу  $ED_{50}$ , вызывающую 50%-ное изменение показателя, и мощность дозы  $EDR_{10}$ , приводящую к 10%-му изменению показателя при хроническом облучении. Критические нагрузки определяли по наиболее радиочувствительной культуре.

Применяли два подхода к обработке массива данных. Способ 1: объединенный массив – для данной культуры растений и данного типа биологического эффекта использовали все имеющиеся данные, наблюдаемый эффект представляли в процентах от контроля, дозовую зависимость описывали линейной функцией. Способ 2: дифференцированный анализ – отдельно рассматривали каждый набор данных, критические дозовые нагрузки определяли по трем моделям дозовой зависимости (линейная, логистическая, логарифмическая [4]). Анализ объединенных данных (способ 1) оказался бо-

лее показательным, так как вторым способом надежные оценки  $ED_{50}$  и  $EDR_{10}$  удалось получить не во всех случаях.

Критические дозовые нагрузки для каждого из эффектов, оцененные по разным моделям дозовой зависимости, отличаются незначительно ( $p < 0.05$ ), что не позволяет дать рекомендации в пользу какой-либо одной из трех протестированных моделей. Можно, однако, отметить, что линейная модель обладает некоторым преимуществом как математически наиболее простая и имеющая минимальное число ограничений.

Следуя принципу «слабого звена», безопасный уровень радиационного воздействия для экосистемы должен быть ориентирован на наиболее чувствительный биологический показатель. Из проведенных оценок следует, что критическая доза острого облучения агроценоза должна быть установлена на уровне, не превышающем 14 Гр, а критическая мощность дозы хронического облучения – ниже 14 мГр/час. Полученные нами оценки предельно допустимых дозовых нагрузок на агроценоз в целом не противоречат международным рекомендациям по безопасным уровням облучения биоты. Действительно, для наземных растений и водных животных допустимыми предложено считать мощности дозы хронического облучения до 10 мГр/сут. (4 Гр/год). Что касается острого облучения, экспертные оценки, уточненные с учетом данных о последствиях аварии на ЧАЭС, говорят о том [6], что значимых эффектов для биоты на популяционном уровне не следует ожидать при дозах острого облучения менее 1 Гр, при этом в качестве наиболее уязвимых организмов выступают млекопитающие и хвойные растения. Таким образом, результаты применения разработанного подхода к установлению критических дозовых нагрузок на экосистемы совместимы с принятыми экспертными оценками, но при этом основаны на строгом количественном анализе данных.

Краткий обзор последних тенденций в развитии системы защиты окружающей среды от действия ионизирующих излучений позволяет наметить перспективы дальнейших исследований и разработок в области экологического нормирования радиационного воздействия как для агроценозов, так и для природных экосистем. В первую очередь следует аккумулировать и систематизировать как можно больший объем информации относительно действия радиации на представителей живой природы, провести ее критический анализ, расширить спектр анализируемых радиобиологических эффектов, рассмотреть разные компоненты аграрных и природных экосистем (не только растения, но и животных, почвенную флору и фауну). Накопление информации и использование современных методов ее обработки и интерпретации позволит установить более точные и дифференцированные оценки допустимых уровней радиа-



ционного воздействия на биоту и обосновать методические подходы к радиационной защите окружающей среды. Растущий интерес к этой проблематике обусловлен всемирным признанием идей экоцентризма, когда благополучие человечества осознается как неразрывно связанное с экологическим благополучием других обитателей нашей планеты.

#### Литература

1. Казаков С.В., Линге И.И. О гигиеническом и экологическом подходах в радиационной защите // Радиационная биология. Радиоэкология, 2004. Т. 44. № 4. С. 482-492.
2. Удалова А.А., Гераськин С.А., Алексахин Р.М., Киселев С.М. Современные подходы к оценке радиационного воздействия на окружающую среду // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2013. Т. 58. № 4. С. 23-33.
3. Удалова А.А., Гераськин С.А., Дубынина М.А. База данных по действию ионизирующих излучений на растения: опыт создания и перспективы использования // Радиационная биология. Радиоэкология, 2012. Т. 52. № 5. С. 517-533.
4. Удалова А.А. Биологический контроль радиационно-химического воздействия на окружающую среду и экологическое нормирование ионизирующих излучений: Дис. ... докт. биол. наук. Обнинск, 2011. 434 с.
5. Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards. Technical Report Series 332. Vienna, IAEA, 1992.
6. Effects on Non-Human Biota. Annex to Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, United Nations, New York, 2008.
7. Garnier-Laplace J., Della-Vedova C., Gilbin R. et al. First derivation of predicted-no-effect values for freshwater and terrestrial ecosystems exposed to radioactive substances // Environ. Sci. Technol., 2006. Vol. 40. P. 6498-6505.
8. Garnier-Laplace J., Copplestone D., Gilbin R. et al. Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA integrated approach // J. Environ. Radioact., 2008. Vol. 99. P. 1474-1483.
9. Garnier-Laplace J., Della-Vedova C., Andersson P. et al. A multi-criteria weight of evidence approach for deriving ecological benchmarks for radioactive substances // J. Radiol. Prot., 2010. Vol. 30. P. 215-233.
10. ICRP Publication 60. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // Ann. ICRP, 1991. Vol. 21. P. 1-201.
11. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // Ann. ICRP, 2007. Vol. 37. P. 1-332.
12. ICRP Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants // Ann. ICRP, 2009. Vol. 38. P. 1-242.

**RADIATION PROTECTION OF THE ENVIRONMENT:  
ECOCENTRIC STRATEGY DEVELOPMENT****A.A. Oudalova**Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia,  
[oudalova@mail.ru](mailto:oudalova@mail.ru)

Nowadays trends in improvement of a system of the environment radiation protection are shortly reviewed. Findings are presented from studies on development of approaches for establishing critical for the environment dose and dose rates. Calculations are realized on the example of agrarian cenoses. Estimates obtained are in agreement with internationally adopted recommendations on the no-effect levels of radiation impact for biota.

**ПСИХОНЕВРОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС  
ЛИКВИДАТОРОВ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ****В.П. Федоров, О.П. Гундарова, Н.В. Маслов**Воронежская государственная медицинская академия  
им. Н.Н. Бурденко, Воронеж, Россия, [fedor.vp@mail.ru](mailto:fedor.vp@mail.ru)

Авария на Чернобыльской АЭС поставила задачу оценки ближайших и отдаленных последствий радиационного облучения в малых дозах и разработки на этой основе комплекса организационных медицинских мероприятий, способствующих поддержанию требуемого уровня профессионального здоровья и работоспособности ликвидаторов. Тем более, что выявлена новая проблема действия ионизирующего излучения на организм в дозах ниже вызывающих острую или хроническую лучевую болезнь. Это значительный рост в отдаленных сроках психосоматических заболеваний [1, 2, 5, 7-9]. Однако до настоящего времени нет точных сведений о патогенезе заболеваний нервной системы у ликвидаторов. Зачастую органические изменения со стороны нервной системы трактуются как функциональные и, наоборот, а иногда жалобы ликвидаторов расцениваются специалистами как проявление установки на получение льгот или отражение радиофобии [2, 12]. Тем не менее, нейropsychические заболевания у участников ЛПА на ЧАЭС являются ведущей причиной инвалидизации. Поэтому необходимо комплексное изучение последствий влияния малых доз радиации на состояние здоровья, дифференцировав факторы нерадиационной природы и проявления радиофобии [13]. Необходимо использовать более объективные методики исследования, в том числе и экспериментальные, поддающиеся математическому моделированию и прогнозированию с последующей экстраполяцией на человека полученных данных [3].

Правомочность такого подхода к проблеме доказана еще в 1950-е гг. школой Н.А. Краевского.

Цель работы – разработка и обоснование мероприятий для оценки и профилактики нарушений психоневрологического статуса авиационных специалистов после выполнения работ на радиоактивно загрязненной местности. Для этого изучали заболеваемость вертолетчиков-ликвидаторов с акцентом на психоневрологический статус до и после аварии на ЧАЭС. Оценивали профессиональное долголетие вертолетчиков-ликвидаторов и причины, вызывающие их дисквалификацию. Анализировали социально-гигиенические условия качества жизни и их влияние на психоневрологический статус ликвидаторов. В радиобиологическом эксперименте на крысах изучали дозо-временную зависимость изменений нейронов головного мозга к радиационному воздействию в дозах от 10 до 100 сЗв (для человека это соответствует от 5 до 50 сЗв). Оценивали радиомодифицирующее действие сопутствующих факторов полета и парциальной недостаточности здоровья, вызывающих изменения норм радиационного воздействия. Проведено математическое моделирование нейроморфологических эффектов в зависимости от дозы, режима облучения, длительности пострадиационного периода и разработаны практические рекомендации по сохранению здоровья ликвидаторов. Методическое обоснование проведенных исследований достаточно подробно представлено нами в монографиях [1, 4, 6, 10].

В результате исследования установлено, что у летного состава вертолетной авиации на протяжении 15 лет после участия в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС выявляются характерные изменения в уровне заболеваемости, профессионального долголетия и дисквалификации, выраженность которых находится в связи с предшествующими облучению заболеваниями, особенностями медицинского контроля и социально-гигиенических условий жизни в пострадиационном периоде. До аварии 20% вертолетчиков имели различные хронические заболевания, среди которых более 50% составляли болезни опорно-двигательного аппарата. При облучении в малых дозах (25 сЗв) у ликвидаторов до четырех раз возрастает частота хронической патологии по основным классам заболеваний, патогенетическим механизмом которых выступают психогенно-травмирующие факторы. Среди ликвидаторов, увольняющихся в запас, 90% имели различные заболевания с преобладанием болезней сердечно-сосудистой системы – 52%, нервной системы – 39, опорно-двигательного аппарата – 27, органов желудочно-кишечного тракта – 21, дыхательной системы – 29% и пр. По два диагноза имели 38% и по три – 11% ликвидаторов. В контрольной группе заболевания имели 70% вертолетчиков. Преобладали болезни сердечно-сосудистой системы – до 30%, опорно-двигательной – до 20%, нервной системы – до 15%, органов желудочно-кишечного тракта – до 10%, органов дыхания – до 10%.

гательного аппарата – 29, дыхательной системы – 30, желудочно-кишечного тракта – 17% и пр. По два заболевания имели 17 и три – 4% увольняющихся вертолетчиков.

Сокращение профессионального долголетия ликвидаторов связано не только с прицельным обследованием и, как следствие, с выявлением хронических заболеваний, но также со сложностью условий труда и трудностями индивидуального приспособления черномыльцев к особенностям работы по мере развития возрастных изменений в состоянии здоровья, психики и социального положения. При этом заболевания нервной системы как самостоятельные нозологические единицы составляют до 35% дисквалификации, сердечно-сосудистой системы – до 45. Качество жизни вертолетчиков-ликвидаторов далеко от психологического комфорта и во многом определяет их профессиональное долголетие.

В поставарийный период у вертолетчиков-ликвидаторов происходят неспецифические изменения параметров кроветворной системы и иммунного статуса в пределах популяционной нормы и отражающих характер восстановительно-компенсаторных процессов в организме на различных уровнях гомеостатического регулирования. Частичная нормализация показателей наблюдается через 10 лет после облучения и связана с завершением формирования предпатологических стрессовых состояний сложного генеза. Для лиц с парциальной недостаточностью здоровья показатели иммунного статуса выходят за границы функциональной нормы, что требует снижения дозы аварийного облучения по сравнению с ликвидаторами, не имеющими заболеваний до аварии.

Нейроморфологические исследования показали незначительные колебания структурно-функционального состояния нервных клеток головного мозга в различные сроки после облучения, их фазный характер и в целом достаточную устойчивость нейронной популяции, белка и нуклеиновых кислот к воздействию изученных доз ионизирующего излучения. Однако не все показатели соответствовали возрастному контролю и могли влиять на состояние психоневрологического статуса. Сопутствующие факторы полета (вибрация, измененная газовая среда, электромагнитные излучения и т.д.) усиливают радиационные эффекты в нервной системе и вызывают необходимость снижения допустимой дозы облучения у вертолетчиков-ликвидаторов по сравнению с наземными службами. В целом, малые дозы ионизирующего излучения имеют нелинейный стохастический характер, не вызывают значимых органических изменений в нервной системе крыс и в изученном диапазоне доз (10-100 сЗв) не являются, видимо, ведущей причиной нарушения психоневрологического статуса ликвидаторов радиационных аварий.

Математическое моделирование нейроморфологических эффектов в головном мозге при малых радиационных воздействиях адекватно отражает выявленные изменения, позволяет дифференцировать реактивные от возрастных изменений и может быть использовано для их прогнозирования при дозо-временных параметрах, выходящих за рамки исследования и экстраполяции на человека.

Основными мерами профилактики нарушений психоневрологического статуса должны стать профессиональный отбор и обучение ликвидаторов, профессиональная медико-психологическая служба, создание соответствующих социально-гигиенических условий, пропорциональных риску, которому подвергаются ликвидаторы и их семьи, а также снижение уровня профессиональных вредностей.

### Литература

1. Гундарова О.П., Федоров В.П., Афанасьев Р.В. Оценка психоневрологического статуса ликвидаторов радиационных аварий. Воронеж: Научная книга, 2012. 232 с.
2. Гуськова А.К. Радиация и мозг человека // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2001. Т. 46. № 5. С. 47-55.
3. Даренская Н.Г., Ушаков И.Б., Иванов И.В. Экстраполяция экспериментальных данных на человека: принципы, подходы, обоснование методов и их использование в физиологии и радиобиологии. М.-Воронеж: Истоки, 2004. 232 с.
4. Маслов Н.В., Федоров В.П., Афанасьев Р.В. Морфофункциональное состояние теменной коры при действии малых доз ионизирующего излучения. Воронеж: Научная книга, 2012. 228 с.
5. Румянцева Г.М. Радиационные катастрофы и психическое здоровье населения // Российский психиатрический журнал, 1998. № 2. С. 35-41.
6. Сгибнева Н.В., Федоров В.П. Морфофункциональное состояние сенсорной коры после малых радиационных воздействий. Воронеж: Научная книга, 2013. 252 с.
7. Титиевский С.В., Табачников С.И. Динамика психических расстройств у участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова, 1997. Т. 97. № 11. С. 61.
8. Торубаров Ф.С., Зверева З.Ф. Неврологические аспекты острой лучевой болезни человека (клинические наблюдения). М., 2009. 208 с.
9. Ушаков И.Б., Арлащенко Н.И., Солдатов С.К. Экология человека после Чернобыльской катастрофы: радиационный экологический стресс и здоровье человека. М.-Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. 723 с.
10. Ушаков И.Б., Федоров В.П., Саурин О.С. Радиационные морфофункциональные эффекты мозга. Воронеж: Научная книга, 2010. 287 с.
11. Федоров В.П., Афанасьев Р.В., Зуев В.Г. Малые радиационные воздействия и мозг. Структурно-функциональные паттерны // Международный журнал по иммунореабилитации, 2010. Т. 12. № 2. С. 229.
12. Холодова Н.Б. Метаболические и дисциркуляторные изменения в головном мозге в отдаленные сроки после облучения малыми дозами иони-

зирующего излучения // Журн. неврологии и психиатрии, 2008. № 6. С. 70-71.

13. Ярмоненко С.П. Малые дозы – «большая беда» // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 1996. Т. 41. № 2. С. 32-39.

## PSYCHONEUROLOGICAL STATUS LIQUIDATORS OF RADIATION ACCIDENT

V.P. Fedorov, O.P. Gundarova, N.V. Maslov

N.N. Burdenko Voronezh State Medical Academy, Voronezh, Russia,  
fedor.vp @mail.ru

Retrospective analysis of health status of liquidators Chernobyl accident, career longevity, causes disqualification, quality of life, as well as modeling of the radiation accident in radiobiological experiment showed that the increase in the incidence of nervous system of the liquidators did not received doses of deterministic radiation in largely due to the traumatic factors.

## ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОАКТИВНО ЧИСТЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ УКРАИНЫ

И.М. Хоменко<sup>1</sup>, Н.И. Омелянец<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальная медицинская академия последипломного образования им. П.Л. Шупика, Киев, Украина

<sup>2</sup> Национальный научный центр радиационной медицины НАМН Украины, Киев, Украина, [khomen2010@ukr.net](mailto:khomen2010@ukr.net)

В отдаленном периоде после Чернобыльской катастрофы (ЧК) основным дозообразующим радионуклидом продолжает оставаться  $^{137}\text{Cs}$ , который формирует до 90% дозы внутреннего облучения проживающего на радиоактивно загрязненных территориях (РЗТ) Украины населения [1, 2].

Результаты дозиметрической паспортизации 2011 г. отнесенных к радиоактивно загрязненным в 12 областях страны 2163 населенных пунктов показывают, что еще более чем в 25 поселениях Житомирской и Ровенской областей паспортные среднегодовые дозы облучения человека превышают национальный критерий 1 мЗв в год. Их источником считают употребление радиоактивно загрязненных пищевых продуктов местного производства, что и определяет степень радиационной безопасности населения РЗТ [3]. Основными из этих продуктов являются молоко, мясо и дикорастущие грибы и ягоды. Поэтому в системе мер радиологической защиты населения замена местных продуктов питания с высокими уровнями

ми радиоактивного загрязнения чистыми продолжает оставаться одной из наиболее эффективных мер [4].

Цель проведенных нами исследований – оценка состояния использования радиоактивно чистых пищевых продуктов населением наиболее радиоактивно загрязненных районов Ровенской и Волынской областей и его влияние на формирование уровней облучения.

Объектом исследования были Заречненский район Ровенской области и Маневицкий район Волынской области.

Состояние использования продуктов питания местного производства и обеспечения завозными радиоактивно чистыми продуктами изучали путем социологического опроса жителей исследуемых районов по специально разработанной нами анкете. Оценки доз облучения проводили по результатам обобщений данных областной санитарно-эпидемиологической станции и областного центра радиологической защиты населения. Их определяли по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в организме человека с использованием стандартного сертифицированного счетчика излучений человека. Анализу подвергали данные по селам за 1997-2012 гг. Полученные результаты подвергали математико-статистическому анализу с использованием пакетов SPSS и MS Excel.

Большинство опрошенных (84.9% в Волынской области и 58 – в Ровенской) отмечают, что обеспечение радиоактивно чистыми продуктами практически не осуществлялось. Сегодня 45.6% жителей Волынской и 20.2% Ровенской областей не имеют возможности их приобретать. 73.1% ровенских респондентов и 42.0% – волыньских считают, что могут приобрести их лишь частично (см. таблицу).

Пути обеспечения радиоактивно чистыми продуктами питания были разнообразными. Так, 12.1% населения Волыни имело возможность приобретать чистые продукты организованно через торговую сеть, 3.5% – через сельсовет, а 17.1% – индивидуально. Большинство опрошенных (55.8% на Волыни и 58.2 – в Ровенской области) отмечает, что в 1986-1990 гг. не было возможности приобрести радиоактивно чистые продукты питания. Население Ровенской

**Наличие возможности приобретения радиоактивно чистых продуктов питания жителями РЗТ Волынской и Ровенской областей в динамике наблюдений, %**

Годы	Волынская область				Ровенская область			
	Да	Нет	Полностью	Частично	Да	Нет	Полностью	Частично
1986	5.5	84.9	2.0	7.5	0.5	58.0	0	41.5
1987-1990	5.6	65.6	2.1	26.7	2.4	50.7	0	46.9
1991-2011	8.3	45.6	4.1	42.0	6.3	20.2	0.5	73.1

области вообще не имело возможности приобретать радиоактивно чистые пищевые продукты через сельсовет и только 19.9% могли приобретать их индивидуально.

Как свидетельствуют приведенные на рисунке данные, наибольшее количество лиц с превышением дозы внутреннего облучения наблюдалось в 1997-2000 гг. Это стало результатом снижения, начиная с 1994 г., в системе контрмер объема радиологической защиты населения на РЗТ в целом в стране. В связи с практически полной приостановкой в последующие годы контрмер и, в первую очередь, обеспечения радиоактивно чистыми продуктами питания удельный вес лиц с повышенными уровнями облучения вновь стал возрастать.

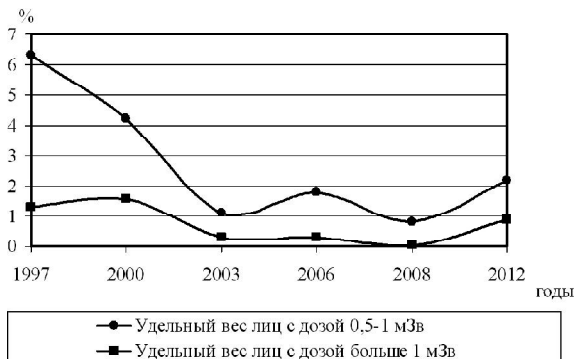
Так, если в 2006 г. удельный вес жителей с превышением дозы облучения более 1 мЗв в год составлял 0.3%, то в 2012 г. – 0.88. Одновременно произошло и возрастание удельного веса лиц, у которых уровень дозы составляет 0.5-1.0 мЗв в год: с 0.82 до 2.19% соответственно.

Изучение уровней доз внутреннего облучения населения наиболее загрязненных сел Волынской области Галузии и Прилесного показало, что наибольшее количество лиц с превышением дозы наблюдалось в 1998-2001 гг. Начиная с 2001 г. их доля постепенно уменьшалась, но в 2008 г. превысила уровни 2004-2007 гг. и достигла  $11.0 \pm 0.31\%$  в с. Галузия и  $15.8 \pm 0.36\%$  – в с. Прилесное ( $p < 0.05$ ).

### Выводы

1. Уменьшение, а с 2008 г. практически полная приостановка осуществления контрмер и, в первую очередь, обеспечения радиоактивно чистыми продуктами питания обусловили увеличение объемов потребления населением радиоактивно загрязненных территорий Украины радиоактивно загрязненных пищевых продуктов местного производства и возрастание количества лиц с превышением

установленных национальным законодательством уровней доз облучения.



Удельный вес лиц с превышением национальной границы дозы облучения из числа обследованных жителей Заречненского района Ровенской области, 1997-2012 гг., %.



2. В Украине и через 27 лет после взрыва атомного реактора на ЧАЭС продолжается хроническое облучение населения радиоактивно загрязненных территорий малыми дозами облучения.

#### Литература

1. 20 років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє / Національна доповідь України. К.: Атіка, 2006. 223 с.

2. 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього / Національна доповідь України. К.: КІМ, 2011. 356 с.

3. Загальнодозиметрична паспортизація та результати ЛВЛ-моніторингу в населених пунктах України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської катастрофи. Дані за 2011 р. - Збірка 14 [Електронний ресурс] / МОЗ України, НАМН України, МНС України, Держагенство України з управління зоною відчуження, ДУ «ННЦРМ НАМН України», НДІ радіаційного захисту АТН України. К.: 2012. 101 с. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/www.mns.gov.ua/files/2012/8/13/Zbirka14.pdf>.

4. Закон України «Про загальнодержавну програму подолання наслідків Чорнобильської катастрофи на 2006-2010 роки» від 14 березня 2006 р. № 3522-IV. Режим доступу: <http://www.rada.gov.ua/cgi-bin/lows/main.cgi?nreg=3522-15>.

### INFLUENCE OF USING NON-RADIOACTIVELY POLLUTED FOODSTUFFS ON FORMING INTERNAL IRRADIATION DOSES OF THE INHABITANTS OF THE RADIOACTIVELY CONTAMINATED TERRITORIES OF UKRAINE

I.M. Khomenko<sup>1</sup>, N.I. Omelianets<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Medical Academy of Postgraduate Education named after PL Shupyk,

<sup>2</sup> National Research Center for Radiation Medicine of NAMS of Ukraine,  
Kiev, Ukraine, [khomen2010@ukr.net](mailto:khomen2010@ukr.net)

The inhabitants of the radioactively contaminated territories of Ukraine are shown to use local radiocontaminated foodstuffs 27 years after Chernobyl accident.

Due to this fact the chart average annual radiation doses received by people go beyond 1mSv per year in some human settlements.

The reduced countermeasures, and the practically complete cessation of realizing the countermeasures since 2008, led to the increase in number of the people who received the radiation doses above 1mSv in the most contaminated areas of Rivne and Volyn' oblast (region).

As it is important to prevent and minimize the rates of internal irradiation in the remote period after the catastrophe, to provide the inhabitants dwelling in the radioactively contaminated territories with non-radioactively polluted foodstuffs is still actual.

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ НЕКОТОРЫХ ВИРУСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ СРЕДИ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ДИКОРАСТУЩЕЙ ФЛОРЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ

**А.В. Шевченко, И.Г. Будзанивская, В.П. Полищук**  
Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,  
Киев, Украина, [alexshevchenko@ukr.net](mailto:alexshevchenko@ukr.net)

Стрессовые факторы химической природы, такие как тяжелые металлы и радионуклиды, способны индуцировать ряд биологически значимых феноменов в развитии вирусных инфекций растений [1, 3, 7, 8, 10]. В частности, тяжелые металлы приводят к существенному повышению концентрации вирусов в тканях растений, изменениям в образовании вирусных включений, а также интенсификации вирусной инфекции на клеточном уровне. Это свидетельствует в пользу стимулирующего влияния отдельных стрессовых факторов на системные вирусные заболевания [2]. Кроме этого показано, что развитие вирусных инфекций высших растений при хроническом воздействии радиоактивного излучения может сопровождаться появлением нетипичных симптомов и, вероятно, генетическими изменениями вирусов [9]. Тем не менее, вопрос о развитии и распространенности вирусных заболеваний в подобных условиях на популяционном уровне остается открытым. Отдельные несистематические мониторинговые исследования вирусных инфекций растений в загрязненных регионах указывают на более широкое распространение вирусов, поражающих коммерчески значимые растительные культуры в Украине [2, 6]. В последние годы обращается внимание на вирусные заболевания дикорастущих растений, которые могут выступать в качестве резервуаров инфекции и являться потенциальной причиной изменчивости вирусов при длительном сосуществовании с нетипичными хозяевами в «аномальных» условиях [4, 8].

В связи с этим нами была проведена предварительная оценка естественной распространенности вирусных заболеваний среди дикорастущих растений в условиях хронического воздействия радиоактивного излучения различной интенсивности в Чернобыльской зоне отчуждения (ЧЗО) – идеального полигона для изучения биологических последствий радиоактивного загрязнения среды.

Растительный материал для исследований отбирался в июне-июле 2011 г. на опытных участках, расположенных в наиболее загрязненной радионуклидами центральной части ЧЗО: «Чистоголовка» и «Янов». Контрольным участком был г. Чернобыль («Чернобыль»). Названия мест отбора образцов соответствуют ближайшему населенному (отселенному) пункту. Всего отобрано 22 образца растений

разных видов на участках с различным уровнем радиоактивного загрязнения (табл. 1). Плотность загрязнения участков по  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  оценивалась по электронной карте аэросъемки от 1992 г. В пересчете на июль 2011 г. параметры внешнего гамма-излучения на участке измерялись радиометром МКС-01Р. Оценку мощности поглощенной дозы внешнего гамма-излучения проводили на основе показаний термомюминисцентных дозиметров, установленных в местах отбора образцов сроком на 10-30 сут. Общая радиоэкологическая характеристика опытных участков приведена в табл. 1.

Растения различной таксономической принадлежности отбирали по визуальным вирусоподобным симптомам и далее анализировали методами трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ), биологического тестирования и иммуноферментного анализа (ИФА) в непрямой модификации.

ТЭМ проводили согласно общепринятой методике с использованием медных сеточек, покрытых формваровой пленкой, на микроскопе «ЭМ-120» (Сумы, Украина); ИФА – с применением антисыворотки собственного производства по общепринятой методике.

Методом ТЭМ в восьми образцах показано наличие вирусных и вирусоподобных частичек различной морфологии: палочковидных, нитевидных, сферических и бациллоидных.

Биологическое тестирование с использованием растений-индикаторов *Nicotiana tabacum* cv. Samsun, инокулированных осажденным гомогенатом 10 отобранных образцов растений, показало развитие вирусоспецифических симптомов на растениях – мозаики, деформации молодых побегов, энциций.

Как видно из анализа результатов, данные микроскопии и биологического тестирования в большинстве случаев коррелировали.

Непрямой иммуноферментный анализ с использованием кроличьей поликлональной сыворотки к вирусу табачной мозаики (ВТМ) подтвердил наличие данного вируса в пяти образцах, что также согласуется с результатами микроскопии и биологического тестирования (табл. 2).

Обращает на себя внимание тот факт, что наибольшая концентрация ВТМ наблюдалась в растениях *Lupinus perennis* (*Fabaceae*).

Таблица 1

Радиоэкологическая характеристика опытных участков

Участок	Плотность загрязнения, МБк/м <sup>2</sup>		ПЕД, мкЗв/час	ТЛД-дозиметрия, мкЗв/сут.
	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$		
Чистоголовка	3.7-4.5	7.6-11.6	20-26	416.0
Янов	1.8-3.7	5.5-7.4	15-20	312.0
Чернобыль	0.02-0.04	0.02-0.04	0.4-0.6	8.7

Таблица 2

**Результаты диагностики вирусов методами ТЭМ,  
биологического тестирования и ИФА на опытных участках ЧЗО**

Растения	Результаты ТЭМ	Симптомы на <i>N. tabacum</i>	ИФА, дикорастущие растения	ИФА, <i>N.</i> <i>tabacum</i>
Чистоголовка				
<i>Deschampsia ceaspitosa</i>	Бактерии			
<i>Convolvulus arvensis</i>	Сферические и палочковидные частички	++		
<i>Lupinus perensis</i>	Палочковидные частички	++	+++++	++
<i>Tanacetum vulgare</i>				
<i>Viola rhichenbachiana</i>	Сферические частички			
<i>Bromopsis inermis</i>				
<i>Solidago virgaurea</i>		+		
<i>Artemisia vulgaris</i>				
<i>Fragaria vesca</i>	Сферические и палочковидные частички	++	++	++
<i>Dactylis glomerata</i>	Сферические частички			
<i>Festuca pratensis</i>	Сферические частички	+		
Янов				
<i>Melilotus albus</i>				
<i>Artemisia vulgaris</i>	Бацилло- и палочковидные частички	+		
<i>Fragaria vesca</i>		++	++	++
<i>Deschampsia ceaspitosa</i>				
<i>Festuca pratensis</i>				
<i>Calamagrostis epigeos</i>				++
<i>Tanacetum vulgare</i>				
<i>Bromopsis inermis</i>				
<i>Poa palustris</i>				
Чернобыль				
<i>Dactylis glomerata</i>				
<i>Festuca pratensis</i>	Сферические частички			++

*Примечание.* «+» – положительная реакция (развитие вирусных симптомов на растениях-индикаторах, детекция вируса методами ТЭМ и/или ИФА). Количество плюсов условно отражает суровость симптомов или оценку количества вируса в ТЭМ/ИФА.

Однако, согласно литературе, данный вид растения не описан как хозяин для этого вируса [5]. Гипотетически детекция ВТМ в растениях *Lupinus perennis* может также являться результатом адаптации вируса к новому хозяину вследствие хронического воздействия радиоактивного излучения (как на растение, так и на вирус).

С другой стороны, факт обнаружения вируса в нетипичном хозяине может также быть следствием изменения биоразнообразия растений, способных расти в значительно загрязненной среде, и числа видов растений (потенциальных «хозяев»), гипотетически способных обеспечить успешную репликацию ВТМ.

Дальнейшая работа будет посвящена дополнительному скринингу дикорастущих растений ЧЗО на наличие вирусов, их изучению, а также анализу генома изолята ВТМ, обнаруженного в растениях *Lupinus perennis*, для его сравнения с известными штаммами этого вируса.

#### Литература

1. Davis M.A., Murphy J.F., Boyd R.S. Nickel increases susceptibility of a nickel hyperaccumulator to turnip mosaic virus // *J. of Environmental Quality*, 2001. Vol. 30 (1). P. 85-90.

2. Dmitriev A., Shevchenko O., Polischuk V., Guscha N. Effects of Low Dose Chronic Radiation and Heavy Metals on Plants and their Fungal and Virus Infections // *Data Science Journal*, 2009. P. 1-18.

3. Miteva E., Maneva S., Hristova D. Heavy metal accumulation in virus-infected tomatoes // *J. of Phytopatology*, 2001. Vol. 149. P. 179-184.

4. Muthukumar V. et al. Non-cultivated plants of the Tallgrass Prairie Preserve of northeastern Oklahoma frequently contain virus-like sequences in particulate fractions // *Virus Research*, 2009. Vol. 141. P. 169-173.

5. Plant Viruses Online Descriptions and Lists from the VIDE Database// <http://pvo.bio-mirror.cn/descr803.htm#Range>

6. Polischuk V.P., Shevchenko T.P., Budzanivska I.G. et al. Effects of Radioactive and Chemical Pollution on Plant Virus Frequency Distribution // *NATO Security through Science Series – Environmental Security*, 2005. Vol. 2. P. 87-92.

7. Shevchenko A.V., Budzanivska I.G., Shevchenko T.P., Polischuk V.P. Plant virus infection development as affected by heavy metal stress // *Arch. Phytopathol. Plant Prot.*, 2004. Vol. 37. P. 139-146.

8. Поліщук В.П., Будзанівська І.Г., Рижук С.М. и др. Моніторинг вірусних захворювань рослин в біоценозах України. К.: Фітосоціоцентр, 2001. 220 с.

9. Тивончук Т.П., Поліщук В.П., Бойко А.Л. Вивчення штамового різноманіття вірусу тютюнової мозаїки на території України // *Агроекологія та біотехнологія*, 1998. Вип. 2. С. 209-213.

10. Шевченко О.В., Будзанівська І.Г., Патица В.П., Поліщук В.П. Вплив важких металів на перебіг вірусних інфекцій рослин. К.: Фітосоціоцентр, 2003. 224 с.

## SPREAD OF SOME VIRUS DISEASES AMONG REPRESENTATIVES OF WILD FLORA IN CHERNOBYL REGION

T.P. Shevchenko, I.G. Budzanivska, V.P. Polischuk  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kiev, Ukraine,  
[alexshevchenko@ukr.net](mailto:alexshevchenko@ukr.net)

The work was focused on preliminary screening of wild plants in Chernobyl region for virus infections. Sampling was based on visual symptoms and on radioecological description of experimental plots. Collected plant samples were further analyzed via three complimentary methods: bioassay, electronic microscopy and ELISA. Results achieved with different techniques were in good correlation and confirmed significant spread of virus infections in representatives of wild flora in Chernobyl region. New reservoir plant for TMV, *Lupinus perennis*, has been identified. Presented data is a direct proof of efficient virus circulation in populations of wild plants, and are of importance for virus ecology and evolution.

## ФОРМИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ НА ОРГАНИЗМ

Л.Н. Шишкина, М.А. Климович, М.В. Козлов  
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,  
Москва, Россия, [shishkina@sky.chph.ras.ru](mailto:shishkina@sky.chph.ras.ru)

Механизм формирования биологических последствий воздействия ионизирующей радиации в малых дозах на организм до сих пор является одним из наиболее дискуссионных разделов радиобиологии. Активно обсуждается и вопрос о том, что наиболее существенно для формирования последствий воздействия ионизирующих излучений в малых дозах в тканях млекопитающих – сама доза облучения или ее мощность. Кроме того, отсутствие четко выраженных радиобиологических эффектов облучения животных в малых дозах диктует необходимость поиска показателей, изменения величин которых позволили бы оценить состояние метаболизма сложной системы в целом.

Окислительные процессы, стационарность которых в тканях млекопитающих в норме обеспечивается функционированием физико-химической системы регуляции перекисного окисления липидов (ПОЛ) [18], играют важную роль в регуляции клеточного метаболизма [1, 4, 22, 24], вследствие участия липидов при физиологических температурах в реакциях окисления на стадиях зарождения радикалов и продолжения цепи [14, 20]. Ранее высо-

кая чувствительность параметров системы регуляции ПОЛ к действию ионизирующей радиации в малых дозах была выявлена как в лабораторных экспериментах, так и в тканях мышевидных грызунов, отловленных на загрязненных радионуклидами территориях [3, 5, 10, 18, 19]. Это обусловлено обратной зависимостью показателей ПОЛ от дозы облучения и ее мощности [1, 13, 23, 25], а также неодинаковой чувствительностью и способностью к восстановлению параметров физико-химической системы регуляции ПОЛ после действия повреждающих факторов [18, 19].

Для оценки вклада дозы и/или мощности дозы, а также роли ЛПЭ излучения в механизме формирования биологических последствий воздействия ионизирующего излучения (ИИ) в малых дозах на организм проводили следующие эксперименты:

1.  $\gamma$ -облучение мышей SHK(самцы) в дозе 15 сГр, мощность дозы – 0.01, 0.25 и 9.0 сГр/мин.;
2. рентгеновское облучение мышей SHK (самки) в дозе 16 сГр, мощность дозы – 44 сГр/мин.;
3. рентгеновское облучение белых беспородных мышей (самки) в дозах менее 1.5 мГр с убывающей во времени мощностью дозы.

Антиоксидантный статус и интенсивность процессов ПОЛ в тканях мышей модифицировали проведением экспериментов в разные сезоны [8, 17]. Контрольными являлись мыши из той же партии, забой которых осуществляли декапитацией одновременно с соответствующей опытной группой с 10 до 11 ч утра, чтобы исключить суточные колебания значений изученных параметров. Измерения проводили либо для каждого животного индивидуально, либо объединяли биологический материал от двух-четырех особей. Выбор кровеносных органов как объектов исследования проведен на основании результатов собственных исследований и анализа данных литературы, свидетельствующих о том, что наиболее чувствительными к действию ИИ в малых дозах являются плазма крови [7, 18] и печень [10, 11]. Головной мозг является органом с наиболее устойчивыми биохимическими и биофизическими характеристиками [9], а его липиды всегда проявляют прооксидантные свойства [20]. Высокая чувствительность относительной массы (индекса) органов у природных популяций мышевидных грызунов к воздействию неблагоприятных экологических факторов [12, 15], как и достоверное изменение массы селезенки мышей SHK и линии СВА при действии низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения в малых дозах [5, 7], также позволяют рассматривать эти показатели в качестве радиобиологических маркеров при оценке степени воздействия облучения в малых дозах в лабораторных исследованиях.

Анализ параметров системы регуляции ПОЛ и морфофизиологических показателей свидетельствует о высокой биологической эф-

фективности воздействия ИИ с разной ЛПЭ в малых дозах на организм. Масштаб и направленность изменения показателей имеют сложный нелинейный характер в зависимости от дозы или мощности дозы ионизирующих излучений, времени после воздействия и исходного значения показателей в группах контрольных мышей. Выявлено отсутствие нормализации большинства изученных параметров в отдаленные сроки после воздействия во всех вариантах экспериментов. Уменьшение способности липидов к окислению и рост жесткости мембранной системы печени, очевидно, может рассматриваться как адаптация организма на воздействие рентгеновского излучения в малых дозах, поскольку при воздействии  $\gamma$ -излучения в малой дозе обнаружены рост отношения сумм более легко- и более трудноокисляемых фракций и уменьшение основных фракций фосфолипидов в печени облученных мышей. Анализ взаимосвязей между изученными параметрами, проведенный с использованием разработанного программного обеспечения, свидетельствует о значительных нарушениях регуляции биохимических процессов в тканях облученных животных и существенной роли характеристик липидов в механизме формирования биологических последствий воздействия ИИ в малых дозах на организм в зависимости от мощности дозы и ЛПЭ излучения.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» (2012-2013 гг).

### Литература

1. Биоантиоксиданты в лучевом поражении и злокачественном росте / *Е.Б. Бурлакова, А.В. Алесенко, Е.М. Молочкина* и др. // М.: Наука, 1975. 211 с.
2. Биологическая эффективность рентгеновского излучения в малых дозах переменной мощности / *М.А. Климович, К.Ф. Сергейчев, Д.М. Карфидов* и др. // Технологии живых систем, 2010. Т. 7. № 8. С. 17-29.
3. Биологические эффекты радиационного загрязнения в популяциях мышевидных грызунов / *А.Г. Кудяшева, Л.Н. Шишкина, О.Г. Шевченко* и др. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 214 с.
4. *Бурлакова Е.Б., Храпова Н.Г.* Перекисное окисление липидов мембран и природные антиоксиданты // *Успехи химии*, 1985. Т. 54. Вып. 9. С. 1540-1558.
5. *Загорская Н.Г., Кудяшева А.Г., Шевченко О.Г., Шишкина Л.Н.* Влияние хронического воздействия  $\gamma$ -излучения в малых дозах в ранние периоды онтогенеза на окислительные процессы в органах грызунов // *Радиационная биология. Радиоэкология*, 2007. Т. 47. № 4. С. 493-500.
6. *Климович М.А., Козлов М.В., Шишкина Л.Н.* Изменения показателей липидов печени мышей спустя месяц после воздействия на организм низкоинтенсивного рентгеновского излучения в малых дозах переменной мощности // *Радиационная биология. Радиоэкология*, 2012. Т. 52. № 1. С. 58-65.



7. Климович М.А., Смотряева М.А., Гаинцева В.Д., Шишкина Л.Н. Выявление тестов для оценки биологических последствий воздействия рентгеновского излучения в малых дозах переменной мощности на животных // Радиационная биология. Радиоэкология, 2009. Т. 49. № 4. С. 473-477.

8. Козлов М.В., Урнышева В.В., Шишкина Л.Н. Взаимосвязь параметров системы регуляции перекисного окисления липидов и морфофизиологических показателей печени мышей // Журнал эволюц. биохим. и физiol., 2008. Т. 44. № 4. С. 398-402.

9. Крекс Е.М. Липиды клеточных мембран. Л.: Наука, 1981. 340 с.

10. Кудряшева А.Г., Шишкина Л.Н., Загорская Н.Г., Таскаев А.И. Биохимические механизмы радиационного поражения природных популяций мышевидных грызунов. СПб.: Наука, 1997. 156 с.

11. Маслова К.И., Материй Л.Д., Ермакова О.В., Таскаев А.И. Атлас патоморфологических изменений у полевок-экономок из очагов локального радиоактивного загрязнения. СПб.: Наука, 1994. 192 с.

12. Оленев Г.В., Пасчаник Н.М. Экологический анализ феномена гипертрофии селезенки с учетом типов онтогенеза цикломорфных грызунов // Экология, 2003. № 3. С. 208-219.

13. Полякова Н.В., Шишкина Л.Н. Воздействие  $\gamma$ -радиации разной мощности на процессы перекисного окисления липидов в тканях мышей // Радиационная биология. Радиоэкология, 1995. Т. 35. № 2. С. 181-188.

14. Хрустова Н.В., Шишкина Л.Н. Роль пероксидов в механизме низкотемпературного автоокисления метилолеата и его растворов с липидами // Кинетика и катализ, 2004. Т. 42. № 6. С. 848-858.

15. Шварц С.С., Смирнов В.С., Добринский Л.И. Метод морфофизиологических индикаторов в экологии наземных позвоночных. Свердловск, 1968. 388 с. (Тр. Ин-та экологии растений и животных. Вып. 58).

16. Шевченко О.Г., Шуктомова И.И., Шишкина Л.Н. Характеристики липидов эритроцитов крови полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в районах с повышенной естественной радиоактивностью // Радиационная биология. Радиоэкология, 2011. Т. 51. № 5. С. 624-632.

17. Шишкина Л.Н., Бурлакова Е.Б. Значение антиоксидантных свойств липидов в лучевом поражении и репарации мембран // Химическая и биологическая кинетика. Новые горизонты. Т. 2. Биологическая кинетика. М.: Химия, 2005. С. 265-395.

18. Шишкина Л.Н., Кушнирева Е.В., Смотряева М.А. Новые подходы к оценке биологических последствий воздействия радиации в малых дозах // Радиационная биология. Радиоэкология, 2004. Т. 44. № 3. С. 289-295.

19. Шишкина Л.Н., Смотряева М.А. Связь повреждения мембраны и ДНК с процессом перекисного окисления липидов при слабых воздействиях // Биофизика, 2000. Т. 45. Вып. 5. С. 844-852.

20. Шишкина Л.Н., Хрустова Н.В. Кинетические характеристики липидов тканей млекопитающих в реакциях автоокисления // Биофизика, 2006. Т. 51. Вып. 2. С. 340-346.

21. Klimovich M.A., Kozlov M.V., Shishkina L.N. Sensitive Indices of the Murine Liver Lipids to the Action of Low Intensity X-Ray Radiation at Low Doses // New Steps in Physical Chemistry, Chemical Physics and Biochemical Physics. N.-Y.: Nova Science Publishers, 2013. Chapter 27. P. 239-263.

22. Membrane Lipid Oxidation / Ed. C. Vigo-Pelfrey. Boston: CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, 1991. Vol. III. 300 p.

23. *Petkau A., Chelack W.S.* Radioprotective effect of superoxide dismutase on model phospholipid membranes // *Biochim. Biophys. Acta*, 1976. Vol. 433. № 3. P. 445-456.

24. Reactive Oxygen Species, Cell Signaling, and Cell Injury / *K. Hensley, K.A. Robinson, P. Gabbita P. et al.* // *Free Radic. Biol. & Med.*, 2000. Vol. 28. № 10. P. 1456-1462.

25. *Stark G.* The effect of ionizing radiation on lipid membranes // *Biochim. Biophys. Acta*, 1991. Vol. 1070. P. 103-122.

#### **BIOLOGICAL CONSEQUENCES DEVELOPMENT UNDER THE IONIZING IRRADIATION ACTION AT LOW DOSES ON ORGANISM**

**L.N. Shishkina, M.A. Klimovich, M.V. Kozlov**  
Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academic of Sciences,  
Moscow, Russia, [shishkina@sky.chph.ras.ru](mailto:shishkina@sky.chph.ras.ru)

Results of investigations on the development of the biological consequences (regulation of the lipid peroxidation, morphophysiological parameters) under the  $\gamma$ - and X-ray irradiation action at low doses with the different dose rate on the laboratory mice are generalized.

---

#### **ОНТОГЕНЕТИЧЕСКАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЯХ ГРЫЗУНОВ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ ДЛИТЕЛЬНОЕ РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ**

**Л.Э. Ялковская, Е.Б. Григоркина, С.В. Зыков**  
Институт экологии растений и животных УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия, [lida@ipae.uran.ru](mailto:lida@ipae.uran.ru), [grigorkina@ipae.uran.ru](mailto:grigorkina@ipae.uran.ru)

Анализ отдаленных эколого-генетических и морфогенетических последствий загрязнения экосистем радионуклидами и хронического воздействия малых доз ионизирующей радиации приобрел особую актуальность после аварии на Чернобыльской АЭС (Украина, 1986 г.) и на АЭС Фукусима-1 (Япония, 2011 г.). В этой связи несомненную ценность представляют результаты исследований, проводимых начиная с 60-х гг. прошлого века на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), образовавшегося в результате крупной радиационной аварии на Южном Урале вблизи г. Кыштым в 1957 г. и протянувшегося узкой полосой на северо-восток, пересекая Челябинскую, Свердловскую и Тюменскую области. На сегодняшний день с момента инцидента прошло более 55 лет, однако  $^{90}\text{Sr}$  – основной дозообразующий радионуклид на данной территории – имеет длительный (порядка 30 лет) период полураспада и

является источником внутреннего облучения животных, обуславливая отдаленные эффекты длительного радиационного воздействия. Грызуны – одни из наиболее удобных и традиционно используемых для индикации состояния наземных экосистем. Проведенная нами оценка генетической компоненты нарушений, наблюдаемых в настоящее время на ВУРСе в природных популяциях двух видов мышей, выявила повышенные уровни хромосомных aberrаций в клетках костного мозга животных [6], сопоставимые по значениям с наблюдаемыми в первые десятилетия после аварии [3]. В настоящей работе приведены результаты сравнительного исследования флуктуирующей асимметрии (ФА) краниометрических признаков у грызунов. ФА – незначительные ненаправленные отклонения билатеральных структур от строгой симметрии, является мерой онтогенетической нестабильности, которая возрастает под влиянием геномного или средового стресса, что позволяет использовать ее для оценки популяционного благополучия [4, 8, 9].

Модельными объектами для проведения исследований служили три вида грызунов: красная полевка (*Clethrionomys rutilus*), малая лесная мышь (*Sylvaemus uralensis*) и полевая (*Apodemus agrarius*) мышь, отловленные в 2006-2007 гг. в головной части ВУРСа и на сопредельном контрольном участке (табл. 1).

Измерения 20 краниометрических признаков (см. рисунок) были выполнены на оцифрованных изображениях черепа и нижней челюсти животных (трижды на каждой стороне с помощью програм-

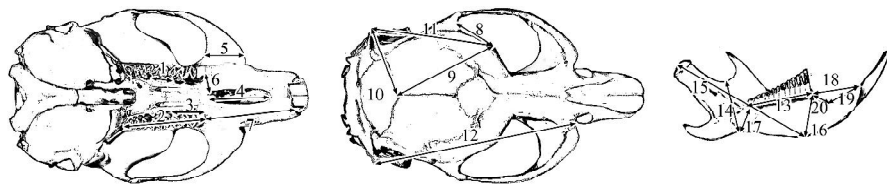


Схема краниометрических промеров. *Осевой череп*: 1. Альвеолярная длина M2; 2. Альвеолярная длина верхнего зубного ряда; 3. Альвеолярная длина M1; 4. Длина резцового отверстия; 5. Максимальная ширина проекции скуловых дуг; 6. Расстояние от альвеолы M1 до края резцовых отверстий; 7. Расстояние от альвеолы M1 до альвеолы резца; 8. Расстояние от заднего края скуловой дуги до заглазничных бугорков; 9. Расстояние от середины межтеменной кости до заглазничных бугорков; 10. Расстояние от середины межтеменной кости до края шва затылочной кости; 11. Расстояние от края шва затылочной кости до заглазничных бугорков; 12. Расстояние от края шва затылочной кости до переднего края скуловых дуг. *Нижняя челюсть*: 13. Альвеолярная длина нижнего зубного ряда; 14. Высота нижней челюсти; 15. Расстояние от вершины сочленовного отростка до симфизиального бугорка; 16. Расстояние от переднего края альвеолы m1 до симфизиального бугорка; 17. Высота челюсти в районе альвеолы m3; 18. Длина диастемы; 19. Расстояние от альвеолы резца до самой глубокой точки диастемы; 20. Расстояние от переднего края альвеолы m1 до самой глубокой точки диастемы.

Таблица 1

## Радиоэкологическая характеристика участков отлова

Место отлова	Плотность загрязнения почвы $^{90}\text{Sr}$ , кБк/м <sup>2</sup> *	γ-фон на уровне почвы, мкР/ч**	Объем выборок		
			<i>C. rutilus</i>	<i>S. uralensis</i>	<i>A. agrarius</i>
ВУРС – окрестности оз. Урускль (55°49' с.ш., 60°55' в.д.)	2322	22-76	11	27	11
Контроль – окрестности пос. Метлино (55°48' с.ш., 61°00' в.д.)	44	12	11	32	35

Примечание. \* По [5]; \*\* по [2].

мы TPS.dig [10]). При анализе ФА следовали методологии Палмера и Стробека [8]; в качестве показателя ФА использовали независимый от размера признака индекс ФА2. При расчете индекса результаты повторных измерений усредняли.

Учитывая модульный характер онтогенеза [1, 7], интегральные показатели ФА для каждой особи были вычислены отдельно для черепа (12 признаков) и нижней челюсти (8) путем усреднения ФА2 соответствующих признаков. Значимость межгрупповых различий исследована с помощью трехфакторного дисперсионного анализа с факторами «вид», «популяция» (в зависимости от уровня радиационного загрязнения мест отлова) и «отдел черепа» (т.е. интегральные показатели ФА черепа и нижней челюсти). Эффекты всех факторов, а также взаимодействия «вид× популяция» и «вид×отдел черепа» оказались значимыми ( $F = 3.75-28.18$ ;  $p \leq 0.018$ ). При оценке влияния радиационного воздействия на онтогенетическую нестабильность учитывали полученные результаты, проводя межпопуляционные сравнения ФА внутри вида отдельно для черепа и нижней челюсти. У изучаемых видов грызунов векторы межпопуляционных различий ФА как черепа, так и нижней челюсти были однонаправлены (табл. 2).

У красной полевки, малой лесной и полевой мышей из головной части ВУРСа наблюдается увеличение онтогенетической нестабильности обоих краниальных отделов по сравнению с животными из сопредельного контроля. В случае ФА нижней челюсти у *A. agrarius* отличия высоко достоверны ( $p < 0.0001$ ). На примере полевой мыши с помощью коэффициента корреляции Спирмена ( $R_s$ ) проведен анализ связи ФА2 с удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$  в костной и мышечной тканях животных на индивидуальном уровне. Значения  $R_s$  для большинства признаков черепа (10 из 12 признаков) и нижней челюсти (семь из восьми признаков) были положительными. Связь

Таблица 2

**Величина флуктуирующей асимметрии (ФА2) черепа и нижней челюсти  
у трех видов грызунов с исследуемых участков**

Вид	Место отлова	ФА2 ( $\times 10^{-4}$ )	
		Череп	Нижняя челюсть
<i>C. rutilus</i>	ВУРС	307.92	465.29
	Контроль	282.76	391.48
<i>S. uralensis</i>	ВУРС	256.63	291.99
	Контроль	245.51	268.06
<i>A. agrarius</i>	ВУРС	287.88	425.94
	Контроль	227.89	266.75

величины интегральных показателей ФА2 с содержанием  $^{90}\text{Sr}$  также оказалась положительной, при этом в случае ФА черепа статистически значимой ( $R_s = 0.810$ ;  $p < 0.05$ ).

Таким образом, в популяциях красной полевки, малой лесной и полевой мышей с территории ВУРСа с первоначальным загрязнением почвы  $^{90}\text{Sr}$  300 Ки/км<sup>2</sup>, несмотря на более чем полвека со дня аварии, наблюдаются повышенные уровни онтогенетической нестабильности. Результаты анализа связи показателей нестабильности развития с удельной активностью  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани грызунов указывают на радиационную природу наблюдаемых эффектов.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №12-П-4-1071.

### Литература

1. Гилева Э.А., Ялковская Л.Э., Бородин А.В. и др. Флуктуирующая асимметрия краниометрических признаков у грызунов (Mammalia: Rodentia): межвидовые и межтаксонные сравнения // Журнал общей биологии, 2007. Т. 68. № 2. С. 148-157.
2. Григоркина Е.Б., Оленев Г.В., Модоров М.В. Анализ населения грызунов в районах техногенного неблагополучия: (на примере *Apodemus (S.) uralensis* из зоны ВУРСа) // Экология, 2008. № 4. С. 299-306.
3. Дубинин Н.П., Шевченко В.А., Алексеенко А.Я. и др. О генетических процессах в популяциях, подвергающихся хроническому воздействию ионизирующей радиации // Успехи современной генетики, 1972. № 4. С. 170-206.
4. Захаров В.М. Асимметрия животных (популяционно-фенетический подход). М.: Наука, 1987. 216 с.
5. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа. Екатеринбург: Изд-во «Голицкий», 2008. 204 с.
6. Ялковская Л.Э., Григоркина Е.Б., Тарасов О.В. Цитогенетические последствия хронического радиационного воздействия на популяции гры-

зунов в зоне влияния Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология, 2010. Т. 50. № 4. С. 466-471.

7. *Klingenberg C.P., Mebus K., Auffray J-C.* Developmental integration in a complex morphological structure: how distinct are the modules in the mouse mandible? // *Evol. Dev.*, 2003. Vol. 5. P. 522-531.

8. *Palmer A.R., Strobeck C.* Fluctuating asymmetry analyses revisited // *Developmental instability: causes and consequences*. N.-Y.: Oxford Univ. Press, 2003. P. 279-319.

9. *Parsons P.A.* Fluctuating asymmetry: a biological indicator of environmental and genomic stress // *Heredity*, 1992. Vol. 68. № 4. P. 361-364.

10. *Rohlf F.J.* TpsDig: Program. Version 1.31. N.-Y.: State Univ. at Stony Brook, 2001.

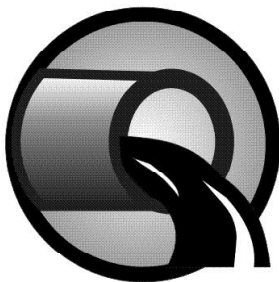
### DEVELOPMENTAL INSTABILITY IN RODENT POPULATIONS, EXPOSED TO LONG-TERM IONIZING RADIATION

L.E. Yalkovskaya, E.B. Grigorkina, S.V. Zykov

Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, [lida@ipae.uran.ru](mailto:lida@ipae.uran.ru), [grigorkina@ipae.uran.ru](mailto:grigorkina@ipae.uran.ru)

Long-term effects of Kyshtym radiation accident (1957) – Eastern Urals Radioactive Trace zone (EURT) – in three rodent species (*Clethrionomys rutilus*, *Sylvaemus uralensis*, *Apodemus agrarius*) were studied. We observe the higher levels of fluctuating asymmetry of 20 cranial measurements in animals inhabiting the EURT zone (the initial soil pollution by  $^{90}\text{Sr}$  is 300  $\text{Cu}/\text{km}^2$ ) as compared by control ones. Significant positive correlation the developmental instability and the  $^{90}\text{Sr}$  concentration in bone tissue of rodents indicate to radiation nature of observed effects.

**Секция 4. СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ  
ФАКТОРОВ РАДИАЦИОННОЙ  
И НЕРАДИАЦИОННОЙ ПРИРОДЫ**







## ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО И ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ЖИТЕЛЕЙ ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Н.К. Белишева<sup>1</sup>, Л.В. Талыкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кольский НЦ РАН, Апатиты, Россия, [natalybelisheva@mail.ru](mailto:natalybelisheva@mail.ru)

<sup>2</sup> Северо-западный научный центр гигиены и общественного здоровья  
Роспотребнадзора, Кировск, Россия, [talyk@mail.ru](mailto:talyk@mail.ru)

Наибольшему хроническому воздействию техногенных и природных источников ионизирующей радиации подвергаются жители Евро-Арктического региона. Определенный вклад в загрязнение северных территорий вносят радионуклиды, образовавшиеся в результате ядерных взрывов в атмосфере, которых только на Новой Земле с 1955 по 1962 г. было произведено 87 [5]. Природные же источники ионизирующей (ИИ) радиации являются ведущим фактором облучения населения Мурманской области, с суммарным вкладом в коллективную дозу облучения до 82,38%. Среди природных ИИ радиации наибольшей спецификой обладают вариации нейтронной компоненты космических лучей (КЛ), интенсивность которых возрастает с широтой от экватора к северу почти в два раза. И, несмотря на выраженную биоэффективность нейтронной компоненты вторичных КЛ [1-4], комбинированные эффекты воздействия вариаций нейтронной компоненты КЛ в сочетании с техногенными ИИ излучения на жителей северных регионов до сих пор не изучены.

Цель данной работы – оценка эффектов воздействия ИИ радиации техногенного и природного происхождения на заболеваемость жителей Евро-Арктического региона.

Материал для исследования включал данные по структуре заболеваемости населения пос. Баренцбург (архипелаг Шпицберген) (1980-2000 гг.) [2]; базу данных по врожденным порокам развития у детей и репродуктивного здоровья женщин (ФГУН «Северо-западного научного центра гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; г. Кировск, Мурманский регион); материалы отчетов (2009, 2010) Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Мурманской области, доклад Государственного комитета по охране окружающей среды Мурманской области (1999), а также материалы Научного Комите-

та ООН по действию атомной радиации [5]. Данные нейтронного монитора получены в ППГИ Кольского НЦ РАН. Для статистического анализа использовали программное обеспечение Statistica 6.0.

Анализ зависимости между среднегодовыми значениями частоты случаев различной заболеваемости в пос. Баренцбург и среднегодовыми эффективными дозами от радионуклидов, образующихся в атмосфере при ядерных испытаниях, показал, что ядерные испытания в северном полушарии приводят к росту заболеваемости жителей Баренцбурга. Обнаружены значимые ( $p < 0.05$ ) корреляции между частотой случаев болезней периферической нервной системы ( $r = 0.59$ ), болезнями почек и мочевыводящих путей ( $r = 0.49$ ), осложнениями беременности и послеродового периода ( $r = 0.69$ ), инфекциями кожи и подкожной клетчатки ( $r = 0.71$ ), а также общим числом случаев заболеваемости ( $r = 0.68$ ) и среднегодовыми эффективными дозами (включающими внешнее и внутреннее облучение) от радионуклидов, образующихся в атмосфере при ядерных испытаниях. За период исследования (1980-2000 гг.) средние годовые эффективные дозы при внешнем и внутреннем облучении составили  $8.14 \pm 0.41 \mu Sv$  с минимальными и максимальными значениями 5.87-12.4, т.е. среднегодовые дозы, практически, на три порядка ниже фоновых значений ионизирующей радиации ( $3.32 mSv/год$  в Мурманской области), ассоциированы с эффектами, отраженными в статистике заболеваемости жителей Баренцбурга.

Исследование эффектов воздействия ядерных испытаний в атмосфере на жителей Мурманской области показало обратную картину: снижение средней годовой эффективной дозы ассоциировано с возрастанием заболеваемости населения. За период исследования 1995-1999 гг. значимые ( $p < 0.05$ ) коэффициенты корреляции были найдены между средними годовыми (от внутреннего и внешнего облучения) дозами от радионуклидов и заболеваемостью взрослого населения: новообразованиями ( $r = -0.89$ ), болезнями эндокринной системы ( $r = -0.99$ ), крови и кроветворных тканей ( $r = -0.97$ ), системы кровообращения ( $r = -0.86$ ), органов дыхания ( $r = -0.85$ ), пищеварения ( $r = -0.95$ ), мочеполовой ( $r = -0.95$ ), костно-мышечной систем ( $r = -0.90$ ). Аналогичный характер связи был найден между средними годовыми дозами облучения и детской заболеваемостью, в частности, заболеваемостью детей первого года жизни за период 1991-1999 гг. ( $r = -0.93$ ,  $p < 0.05$ ) и заболеваемостью новорожденных ( $r = -0.93$ ,  $p < 0.05$ ). Такая связь, скорее всего, свидетельствует об отдаленных последствиях действия ионизирующего излучения, предполагающих множественные эффекты, вызванные хроническим облучением, в том числе, геномную нестабильность, снижение иммунорезистентности, повышение сенсibilизации к воздействию токсических соединений и природных факторов среды.

Прямая корреляция была найдена между средними годовыми эффективными дозами от радионуклидов и показателями младенческой ( $r = 0.68$ ,  $p < 0.05$ ), перинатальной ( $r = 0.94$ ,  $p < 0.05$ ) смертности и мертворожденностью ( $r = 0.98$ ,  $p < 0.05$ ) за период с 1991 по 1999 г., а также частотой случаев врожденных аномалий

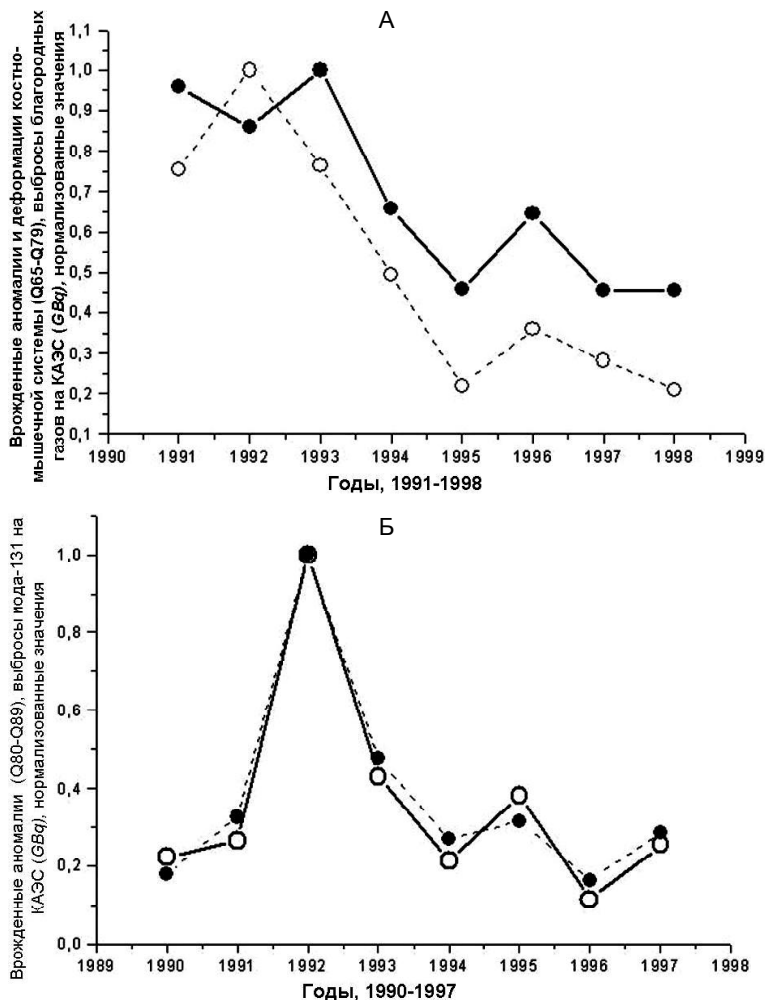


Рис. 1. Сравнение кривых выбросов благородных газов (А) и йода-131 (Б) – штрих-линии на КАЭС, с динамикой врожденных аномалий и деформаций костно-мышечной системы (Q65-Q79) (А) и других врожденных аномалий (Q80-Q89) (Б) – сплошные линии.

органов пищеварения (Q38-Q45), ( $r = 0.44$ ,  $p < 0.05$ ) за период 1973-1999 гг., что подчеркивает факт относительного увеличения риска при облучении с уменьшением возраста на момент облучения [5]. Не исключено, что рост заболеваемости и, в частности, онкологии,

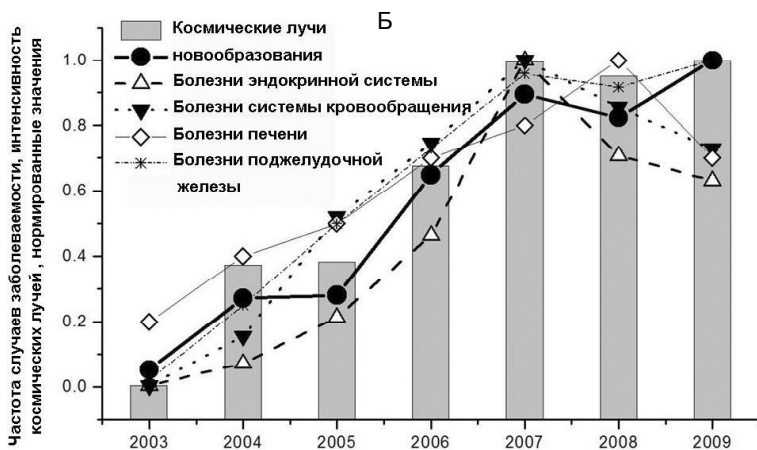
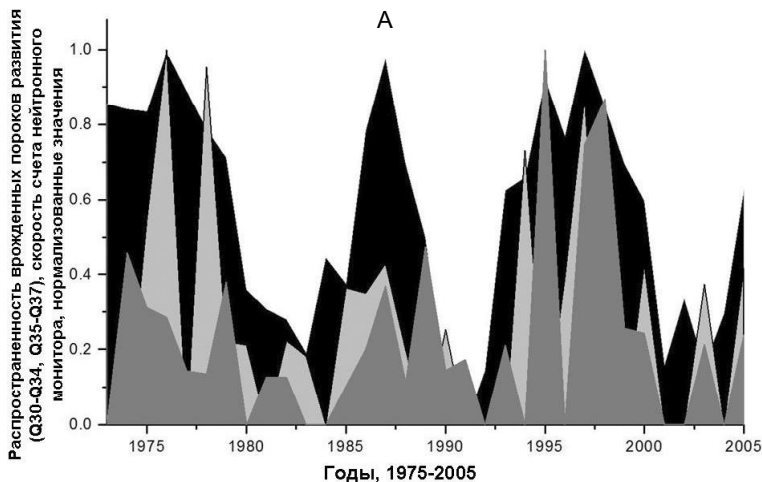


Рис. 2. Связь вариаций нейтронной компоненты КЛ у поверхности Земли с врожденными пороками развития у детей (А) и заболеваемостью взрослого населения (Б). А – скорость нейтронного счета, черная область; врожденные аномалии органов дыхания (Q30-Q34), темно-серая область; расщелина губы и неба (заячья губа и волчья пасть) (Q35-Q37), светло-серая область. Б – скорость счета нейтронного монитора (космические лучи), частота случаев новообразований, болезней эндокринной системы, системы кровообращения, печени и поджелудочной железы, нормированные значения.

связан с тем, что в период пика ядерных испытаний (1956-1965) часть населения была облучена внутриутробно, в силу чего приобрела потенциально большую чувствительность к индукции опухолей. О высокой чувствительности детского организма в период пренатального развития к облучению свидетельствуют также результаты оценки влияния залповых выбросов в атмосферу благородных газов и иода-131 на Кольской атомной электростанции (КАЭС), 1990-1997 гг. Выбросы благородных газов ( $GBq$ ) ассоциированы с возрастанием случаев перинатальной смертности ( $r = 0.87$ ,  $p < 0.05$ ) и мертворожденности ( $r = 0.92$ ,  $p < 0.05$ ). Более того, оказалось, что возрастание выбросов благородных газов (со сдвигом в год до рождения ребенка) связано с ростом частоты случаев врожденных аномалий и деформаций костно-мышечной системы (Q65-Q79),  $r = 0.84$ ,  $p < 0.05$  (рис. 1А), а также с возрастанием всех классов врожденных пороков развития у детей  $r = 0.73$ ,  $p < 0.05$ . Выбросы иода-131 привели к увеличению частоты случаев других врожденных аномалий (Q80-Q89),  $r = 0.98$ ,  $p < 0.05$  (рис. 1Б).

Оценка зависимости врожденных пороков развития у детей за период с 1973 по 2005 г. от фоновых вариаций нейтронной компоненты КЛ у поверхности Земли выявила связь между скоростью счета нейтронного монитора (рис. 2А), динамикой распространенности врожденных аномалий органов дыхания (Q30-Q34),  $r = 0.35$ ,  $p < 0.05$  и аномалиями развития, проявляющимися в расщелине губы и неба (заячья губа и волчья пасть) (Q35-Q37),  $r = 0.48$ ,  $p < 0.05$ . Связь ( $p < 0.05$ ) между вариациями нейтронной компоненты КЛ и заболеваемостью взрослого населения показана на рис. 2Б.

Полученные данные показывают, что заболеваемость жителей Евро-Арктического региона ассоциирована с воздействием ионизирующей радиации техногенного и природного происхождения. Можно предполагать, что генотоксические агенты со сходным спектром биологических эффектов, действуя на одни и те же мишени и в одно и то же время, будут взаимодействовать аддитивным образом [5], способствуя росту заболеваемости населения.

#### Литература

1. Белишева Н.К., Белова Т.П., Жиров В.К. Эффекты воздействия вариаций космических лучей на функциональное состояние биосистем / Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды. К 50-летию радиоэкологических исследований в Республике Коми: Матер. Междунар. конф. Сыктывкар, 2009. С. 9-13.
2. Белишева Н.К., Виноградов А.Н., Вашенюк Э.В. и др. Медико-биологические исследования на Шпицбергене как действенный подход для изучения биоэффективности космической погоды // Вестник Кольского НЦ РАН, 2010. № 1. С. 26-33.

3. *Белишева Н.К., Талыкова Л.В., Мельник Н.А.* Вклад высокоширотных гелиогеофизических факторов в картину заболеваемости населения Мурманской области // Известия Самарского НЦ РАН, 2011. Т. 13. № 1(8). С. 1831-1836.

4. *Belisheva N.K., Lammer H., Biernat H.K., Vashenyuk V.E.* // *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 8, 7–17, 2012 [www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012](http://www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/doi:10.5194/astra-8-7-2012).

5. United Nations. Sources and Effects of Radiation. Vol. I: Sources; Vol. II: United Nations Scientific Committee on of Atomic Radiation, 2000 Report to the Assembly, with scientific annexes. ANNEX C. Exposures to the public from man-made sources of radiation. United sales publications E.00.IX.3 and Nations. N.-Y., 2000.

### EFFECTS OF MAN-MADE AND NATURAL SOURCES OF RADIATION ON THE MORBIDITY OF RESIDENTS IN EURO-ARCTIC REGION

**N.K. Belisheva<sup>1</sup>, L.V. Talykova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> KSC RAS, Apatity, Russia, [natalybelisheva@mail.ru](mailto:natalybelisheva@mail.ru)

<sup>2</sup> Central Research North-West Sci.Center of Hygiene and Public Health, Kirovsk, [talyk@mail.ru](mailto:talyk@mail.ru)

It is shown that the testing of nuclear weapons in the northern hemisphere, the emissions of the Kola nuclear power plant and the variation of the neutron component of cosmic rays associate with morbidity of the population and the congenital malformation in children.

### НАКОПЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ <sup>90</sup>Sr И <sup>137</sup>Cs РУКОКРЫЛЫМИ (СИРОПТЕРА), ОБИТАЮЩИМИ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПО «МАЯК»

**А.В. Дмитриева<sup>1</sup>, А.И. Смагин<sup>1, 2</sup>, О.Л. Орлов<sup>3, 4</sup>**

<sup>1</sup> Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озерск, Россия, [d\\_a.v@mail.ru](mailto:d_a.v@mail.ru)

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия, [Smagin54@mail.ru](mailto:Smagin54@mail.ru)

<sup>3</sup> Уральский государственный педагогический университет, Екатеринбург, Россия, [o\\_l\\_orlov@mail.ru](mailto:o_l_orlov@mail.ru)

<sup>4</sup> Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В 1993 г. на юго-западном берегу оз. Акакуль Челябинской области в деревянных домиках базы отдыха были обнаружены очаги радиоактивного загрязнения (см. рисунок, К 1), в которых мощность экспозиционной дозы (МЭД)  $\gamma$ -излучения достигала значений в 400-1000 мкР/ч, а плотность потока  $\beta$ -частиц (ППБЧ) – 420 част./



Цель работы – изучить структуру колонии и современные уровни радиоактивного загрязнения техногенными радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  выбранных мест базирования колоний летучих мышей в строениях детского оздоровительного лагеря «Звездочка» на берегу оз. Акакуль Челябинской области.

В задачи исследования входило изучение половозрастного и видового состава популяций рукокрылых, выявление пятен радиоактивного загрязнения на территории оздоровительного лагеря «Звездочка», определение уровней удельной активности животных, обусловленных содержанием  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в тушках летучих мышей.

Исследования проводили в июле 2010 г., МЭД  $\gamma$ -излучателей и ППБЧ определяли дозиметром-радиометром МКС-05 «ТЕРРА» и дозиметром-радиометром ДСК-96. Животных отлавливали ряжевыми сетями, затем усыпляли эфиром. Определяли пол и возраст рукокрылых, содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  находили стандартизованными методами. Концентрацию радионуклида рассчитывали на сырую массу тушки. Рукокрылых контрольной группы отбирали на территории Свердловской области (см. рисунок). В Нижнесергинском районе (Природный парк «Оленьи ручьи» – К 8) и в Каменском районе (Смолинская пещера – К 9) были собраны тушки погибших во время зимовки прудовых ночниц (*Myotis dasycneme* Boie), а в окрестностях г. Новоуральска, в 5 км к востоку от промышленной площадки ОАО «Уральский электрохимический комбинат» (К 10) отловлены двухцветные кожаны (*Vespertilio murinus* Linnaeus) – шесть особей.

На территории детского лагеря «Звездочка» обнаружено два пятна радиоактивного загрязнения, в одном из которых значения ППБЧ достигало 2250  $\gamma$ -част./ $\text{см}^2$ -мин. Несмотря на ежегодные проверки санитарными службами и систематическую дезактивацию помещений, радиоактивное загрязнение небольших участков некоторых зданий в лагере «Звездочка» остается достаточно высоким.

На территории лагеря «Звездочка» обследовали две колонии рукокрылых (строения 1 и 2), было отловлено 15 животных, одна особь обнаружена мертвой. Установлено, что колония летучих мышей, обитающая в строении 1, сформирована особями прудовой ночницы (*Myotis dasycneme* Boie), двухцветного кожана (*Vespertilio murinus* Linnaeus) и северного кожана (*Eptesicus nilssonii* Keyserling et Blasius). В состав колонии входили не только самки, но и взрослые самцы, что нехарактерно для выводковой колонии [1]. Вероятно, взрослые самцы двухцветного кожана и северного кожана используют данное строение как временное убежище, что свидетельствует о привлекательности данного помещения для представителей отряда рукокрылых [1, 4]. В строении 2 обитает смешанная выводковая колония, сформированная двумя видами летучих мышей – прудовая ночница и двухцветный кожан.



Было установлено, что удельные активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в тушках животных, отловленных на территории детского лагеря «Звездочка», варьируют в пределах нескольких порядков величин. В частности, среди восьми особей прудовых ночниц из этой колонии одна особь содержала  $1 \cdot 10^4$  кБк/кг  $^{90}\text{Sr}$  и  $3 \cdot 10^3$  –  $^{137}\text{Cs}$  при среднем значении этого показателя для всей выборки данного вида  $2 \cdot 10^2$  и  $1 \cdot 10^1$  кБк/кг соответственно. По данным исследований 1999 г. [6], значения удельной активности по  $^{90}\text{Sr}$  в тушках прудовых ночниц варьировали в пределах двух порядков, а по  $^{137}\text{Cs}$  трех порядков величины, также было установлено, что средние значения удельной активности животных, обитавших в колониях лагеря «Звездочка», составляли 70 кБк/кг для  $^{90}\text{Sr}$ , и ~40 – для  $^{137}\text{Cs}$  на сырой вес соответственно. Средняя концентрация Sr-90 в тушках прудовой ночницы, двухцветного кожана и северного кожанка, отловленных на территории лагеря «Звездочка», составляет соответственно  $200 \pm 74$ ,  $100 \pm 82$  и  $42 \pm 11$  кБк/кг сырой массы против аналогичных видов рукокрылых на контрольных территориях  $0.05 \pm 0.02$ ,  $0.2 \pm 0.09$  и  $0.1 \pm 0.05$  кБк/кг. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  соответственно  $7 \pm 3$ ,  $1 \pm 0.7$  и 6 кБк/кг сырой массы против значения 0.0001 кБк/кг на условно контрольной территории. В тушках всех исследованных животных  $^{90}\text{Sr}$  накапливается достоверно больше, чем  $^{137}\text{Cs}$ . [3, 4, 7]. На условно контрольной территории в тушках летучих мышей из Новоуральска среди шести животных двухцветного кожана три особи имели концентрацию  $^{90}\text{Sr}$  примерно на порядок величин выше, чем три другие (0.36 и 0.03 кБк/кг соответственно).

По нашему предположению, наиболее вероятны два пути поступления техногенных  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в организм летучих мышей, обитающих на рассматриваемой территории.

Путь 1 – поступление с вдыхаемыми радиоактивными пылевыми частицами. Многие виды рукокрылых – синантропные животные. На Урале зимний период животные проводят в пещерах, подвалах домов, заброшенных шахтах и штольнях. На территории промышленной площадки ПО «Маяк» находится большое количество убежищ, пригодных для зимовки рукокрылых – насосные станции, бомбоубежища и др. В химическом цикле работы ПО «Маяк» широко используются «водные технологии», поэтому зимой в зданиях химического производства сохраняется небольшая положительная температура и избыточная влажность. Вероятно, летучие мыши по мере развития производства планомерно осваивали промышленные территории. Это предположение подтверждает факт нарастания удельных активностей радионуклидов в слоях гуано с течением времени [4], а также то, что многолетние тщательные поиски зимних убежищ загрязненных животных в окрестных пещерах не принесли результатов [4, 7]. При формировании зимних

колоний в промышленных помещениях ПО «Маяк» радиоактивное загрязнение животных может происходить за счет поступления в организм радиоактивных пылевых частиц с вдыхаемым воздухом, а также осаждения частиц на кожных и волосных покровах.

Путь 2 – поступление с пищей. Рукокрылые отличаются высокой скоростью обменных процессов, поэтому и нуждаются в большом количестве пищи. Во время кормления одна особь поедает 500-600 насекомых в час, а масса съеденной пищи может достигать 35-40% от массы тела голодной особи. Животные, обитающие большими колониями, вынуждены совершать перелеты на значительные расстояния. Вероятно, что радиоактивное загрязнение зверьков вызвано поступлением радионуклидов по цепи: донные отложения водоемов-хранилищ отходов – личинки насекомых, развивающиеся на дне водоемов, – летучие мыши. Летучие мыши, используя слух и эхолокацию, вполне способны прилетать кормиться на технологические водоемы ПО «Маяк» в район массовых вылетов насекомых [3].

До настоящего времени точно не установлено, каким образом техногенные  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  поступают в организм летучих мышей.

#### Литература

1. *Большаков В.Н., Орлов О.Л., Снитько В.П.* Летучие мыши Урала. Екатеринбург: Академкнига, 2005. 176 с.
2. *Дмитриева А.В.* Накопление  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  некоторыми видами позвоночных животных в зоне воздействия ПО «Маяк» как фактор облучения человека: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Омск, 2012. 18 с.
3. *Орлов О.Л., Смагин А.И., Тарасов О.В.* Исследование зоогенного выноса радионуклидов рукокрылыми // Вопросы радиационной безопасности, 2005. № 4. С. 12-19.
4. *Смагин А. И., Тарасов О. В., Любашевский Н.М., Орлов О.Л.* Роль рукокрылых в зоогенной миграции радионуклидов // Вопросы радиационной безопасности, 2000. № 3. С. 64-70.
5. *Смагин А.И., Стукалов П.М., Тарасов О.В.* и др. Изучение роли летучих мышей в переносе радионуклидов в окружающей среде / Отчет. Инв. № 5620. ПО «Маяк» Центральная заводская лаборатория, 2000. 20 с.
6. *Смагин А.И.* Экология промышленных водоемов предприятия ядерно-топливного цикла на Южном Урале. Озерск: Редакционно-издательский центр ВРБ, 2007. 190 с.
7. *Smagin A.I., Dmitrieva O.L., Orlov O.L., Nevolina I.V.* About radionuclide transfer on bats (Chiroptera) in Southern Urals // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» (<http://ipb.mos.ru/ttb>). Вып. 1 (41). С. 1-6.

**<sup>90</sup>Sr AND <sup>137</sup>Cs CONCENTRATION FACTORS IN CHIROPTERA SPECIES FROM THE MAYAK PRODUCTION ASSOCIATION EXPOSURE ZONE****A.V. Dmitrieva<sup>1</sup>, A.I. Smagin<sup>1, 2</sup>, O.L. Orlov<sup>3, 4</sup>**<sup>1</sup> South Ural biophysical institute of the Federal Medical-Biological Agency, Ozersk, Russia<sup>2</sup> National research South Ural State University, Chelyabinsk, Russia<sup>3</sup> Ural State Pedagogical Institute, Ekaterinburg, Russia<sup>4</sup> Institute of Plant and Animal Ecology, Urals Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Structure of some Chiroptera species colonies and modern radioactive contamination levels in the health camp on the bank of the Akakul lake (Chelyabinsk region) was assessed. Several mechanisms of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs intake into Chiroptera bodies are supposed.

**РЕАКЦИЯ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА НА ДЕЙСТВИЕ СТРЕССА И ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ****Е.М. Кадукова, Д.Г. Сташкевич, М.А. Бакшаева, Ф.И. Куц, А.Д. Наумов**  
Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Беларусь,  
[helena.kad@mail.ru](mailto:helena.kad@mail.ru)

В реальных условиях жизнедеятельности организмов реализация эффектов радиации происходит на фоне действия других факторов. При этом проявляется их комплексное воздействие на различные системы организма, в частности, на нервную и сердечно-сосудистую. Нервная система выполняет не только основные регуляторные, но и интегральные функции при развитии адаптационных и компенсаторных проявлений в ответ на воздействия разной природы.

Эмоциональный стресс – один из факторов, наиболее часто сопутствующих действию радиации. Имобилизация также является одним из стрессогенных факторов. При резком ограничении двигательной активности обнаружены глубокие морфологические и функциональные изменения в структурах головного мозга, биохимические изменения в центральной нервной системе (ЦНС).

Цель работы – оценить влияние стрессогенного фактора на организм экспериментальных животных после действия ионизирующего излучения (ИИ).

Исследования выполнены на самках белых крыс стадного разведения (6 мес.). Животных подвергали внешнему острому облучению (1.0 Гр) на установке ИГУР (источник  $\gamma$ -лучей <sup>137</sup>Cs, мощность дозы 46.2 сГр/мин.), а также иммобилизационному стрессу (фикса-

ция на спине) в течение 6 ч. Животных брали в опыт через 1 сут. после стрессирования (3-и и 10-е сут. после облучения).

Для оценки функционального состояния регуляторных систем организма использовали установку «РИТМ». По специальным программам проводился математико-статистический анализ сердечного ритма по 100 и более последовательным кардиоинтервалам [1]. Анализировались следующие показатели: частота сердечных сокращений, уд./мин. (ЧСС), вариационный размах (ВР) – показатель, отражающий степень вариабельности величин RR-интервалов, индекс напряжения регуляторных систем в усл. ед. (ИН), индекс вегетативного равновесия (ИВР) в усл. ед., индекс централизации в усл. ед. (ИЦ), показатель адекватности процессов регуляции в усл. ед. (ПАПР).

На 10-е сут. после облучения у экспериментальных животных под общим тиопенталовым наркозом извлекали сердце для приготовления препарата изолированного сердца по Лангендорфу. Биомеханическую активность сердца регистрировали при помощи латексного баллончика, введенного в левый желудочек, и датчика давления. Рассчитывали и анализировали следующие параметры: ЧСС (HR) (сокр./мин.);  $+dP/dt_{\max}$  – максимальная скорость нарастания внутрижелудочкового давления (мм. рт. ст./с);  $-dP/dt_{\max}$  – максимальная скорость падения внутрижелудочкового давления (мм. рт. ст./с); AoF – объемная скорость коронарного потока – как разница между объемом раствора, поступающего в аорту, и величиной его сброса по отводящей системе из аорты (мл/мин.).

Определяли «триаду Селье»: массу надпочечников, массу иммунокомпетентных органов (тимуса и селезенки).

Для оценки функции ЦНС применялся тест «Открытое поле» (ОП), характеризующий ориентировочно-исследовательскую деятельность и двигательную активность экспериментальных животных [3]. В ОП регистрируется ряд элементарных двигательных актов и поз, совокупность которых характеризует целостное поведение. Следует отметить, что само помещение животного на арену ОП – стрессогенный фактор. Поведение крыс в ОП имеет сложную мотивационную основу, строится на конкурентном отношении реакции страха (пассивно-оборонительного поведения) и исследовательской активности и тесно связано с соотношением возбуждательного и тормозного процессов в коре [5].

Поведение облученных в дозе 1.0 Гр крыс (самцы) оценивали на 3-и и 8-е сут. после действия радиационного фактора в ОП в течение 5 мин., используя следующие поведенческие показатели: число пересеченных периферических и центральных квадратов (горизонтальная двигательная активность), стойки с заходом и без захода передних лапок на стенки арены (вертикальная двигательная ак-

тивность). Отдельно регистрировали неспецифическое поведение животных – число актов дефекации и уринации, частоту актов груминга (короткий и длительный). Рассчитывали общую двигательную активность и коэффициент асимметрии поведения, как отношение количества горизонтальных перемещений к общей двигательной активности (%).

Статистическая обработка полученных результатов проводилась при помощи непараметрического анализа с определением Т-критерия теста Манна-Уитни (пакет программ Statistica 6.0).

На 3-и сут. после действия стрессорных (ИИ, иммобилизация) факторов была выявлена активация экстракардиальной регуляции сердечного ритма, которая привела к увеличению ЧСС на 11.3 и 13.2% ( $p < 0.05$ ) соответственно (табл. 1).

Значение ИН регуляторных систем у крыс, подвергнутых иммобилизации, возрастало на 61.7%, ИВР – на 39.6% ( $p < 0.05$ ), что связывают с усилением симпатического контроля в регуляции функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Значение ПАПР после иммобилизации также возрастало на 32.6% по сравнению с уровнем контроля ( $p < 0.05$ ).

На 10-е сут. после воздействия облучения и последующей иммобилизации животных сохранялись существенные изменения на всех уровнях регуляции ритма сердца: ЧСС возрастала на 21.9%, ИН, который характеризует степень напряжения центральных регуляторных систем, увеличивался на 45.34%, ПАПР повысился на 46.4% ( $p < 0.05$ ) (табл. 1).

При исследовании биомеханической активности изолированного сердца экспериментальных животных отмечена тенденция к по-

Таблица 1

**Показатели экстракардиальной регуляции крыс  
при действии стресса и острого облучения в дозе 1.0 Гр**

Показатель	Контроль	3-и сутки		10-е сутки	
		Облучение	Стресс	Стресс	Облучение + стресс
ЧСС	423.3±18.8	471.1±5.9*	479.2±6.0*	437.3±17.0	516.0±21.2*
ИН	1341.6±75.0	1373.4±145.4	2168.0±207.8*	1521.0±136.7#	1949.0±194.8*
ВР	0.24±0.01	0.232±0.018	0.195±0.022	0.235±0.019	0.225±0.021
ИВР	387.0±25.4	348.4±34.5	540.4±63.1*	417.4±34.0	456.1±43.4
ПАПР	528.1±34.7	546.6±52.9	700.0±42.0*	592.8±11.0#	771.1±61.0*
ИЦ	5.95±1.17	3.69±0.80	5.2±1.0	4.69±1.43	5.43±2.36

*Примечание.* \* Различия достоверны по отношению к значению в контроле; # – значению в группе «стресс» при  $p \leq 0.05$ .

вышению объемной скорости коронарного потока (AoF) как после воздействия только стресса, так и после сочетания его с ИИ (табл. 2).

Облучение в дозе 1.0 Гр животных, подвергнутых действию стресса, привело к изменению инотропной функции сердца ( $+dP/dt_{\max}$ ;  $-dP/dt_{\max}$ ): показатели скорости сокращения и скорости расслабления миокарда превышали соответствующие значения как в контроле ( $p \leq 0.05$ ), так и при действии факторов в изолированном режиме (табл. 2). Наступающие изменения сократительной функции можно связать с нарушением  $Na^+$ - $Ca^{2+}$ -обмена кардиомиоцитов, поскольку известно, что как при действии ИИ, так и при воздействии стресса наступают изменения в структуре ионных каналов и проводимости мембран. Последние могут быть обусловлены перекисным окислением липидов, изменениями их физико-химических свойств, а также модификацией белковых молекул под влиянием облучения [2].

Установлено, что интегральные показатели функционирования ЦНС проявляют высокую чувствительность к действию ИИ, а степень нарушения функций ЦНС при этом может быть определена, в том числе и по поведенческим параметрам [6].

При действии ИИ в ЦНС создаются оптимальные условия для липопероксидации с последующим нарушением основных функций ее тканей: ионотранспортной, электростатической, осмотической и энергогенерирующей [4], что, в конечном итоге, может проявляться и в изменении поведения облученных животных.

При исследовании действия ИИ в дозе 1.0 Гр на поведенческую активность крыс-самцов в тесте ОП установлено, что если на 3-и сут. после облучения не наблюдалось значимых отличий по дан-

Таблица 2

**Показатели работы изолированного сердца крыс  
при действии внешнего облучения в дозе 1.0 Гр и стресса**

Группа	HR	LVPsys	LVPdia	LVPdp	$+dP/dt_{\max}$	$-dP/dt_{\max}$	APmean	AoF
Контроль	230.71	145.14	14.49	130.64	3838.36	-2457.92	78.07	9.6
m	10.62	8.22	1.45	8.66	221.11	143.48	2.47	0.4
Стресс	234.83	153.59	13.56	140.04	4634.03*	-2650.30	84.39	10.6
m	11.64	3.77	0.76	3.76	142.10	108.17	0.47	0.5
1 Гр	242.63	152.71	12.31	140.41	4383.63	-2709.23	82.21	9.5
m	16.74	4.08	2.16	4.32	181.73	96.54	2.19	0.5
1 Гр + Стресс	216.36	158.70	11.70	147.00	4984.86*	-2871.58*	83.81	10.6
m	10.23	9.54	0.70	9.83	331.00	169.83	0.46	0.5

*Примечание.* \* Здесь и в табл. 3 различия достоверны по отношению к значению в контроле при  $p \leq 0.05$ .

Таблица 3

Изменение суммарных показателей двигательной активности и коэффициента асимметрии поведения крыс в «Открытом поле» после однократного внешнего облучения в дозе 1.0 Гр (8-е сут. после облучения)

Группа	Суммарная горизонтальная активность	Суммарная вертикальная активность	Общая двигательная активность	Коэффициент асимметрии поведения
Контроль	60.6±5.3	5.6±0.7	70.2±5.2	86.1±2.0
1.0 Гр	28.2±5.9*	6.0±1.6	38.0±7.3*	73.4±5.1*

ным показателям, то на 8-е сут. общая двигательная активность облученных животных была угнетена на 54,1% (табл. 3).

Основной вклад в это снижение внесло уменьшение количества пересеченных периферических и центральных квадратов, что является показателем угнетения исследовательской активности животных, а также снижения актов груминга, что сигнализирует об увеличении уровня их тревожности.

Таким образом, воздействие ИИ изменяет ответную реакцию организма (ЦНС, вегетативная нервная система, биомеханическая активность изолированного сердца) на стрессогенный фактор (иммобилизация, помещение в ОП).

#### Литература

1. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестник аритмологии, 2001. № 24. С. 65-86.
2. Буланова К.Я., Лобанок Л.М., Конопля Е.Ф. Радиация и Чернобыль: кардиомиоциты и регуляция их функции. Минск: Белорус. наука, 2008. 279 с.
3. Буреш Я., Бурешова О., Хьюстон Д.П. Методики и основные эксперименты по изучению мозга и поведения. М.: Высшая школа, 1991. С. 119-122.
4. Давыдов Б.И., Ушаков И.Б., Федоров В.П. Радиационное поражение головного мозга. М.: Энергоатомиздат, 1991. 293 с.
5. Маркель А.Л. К оценке основных характеристик поведения крыс в тесте «открытого поля» // Журн. высшей нервной деятельности, 1981. Т. 31. № 2. С. 301-307.
6. Сенюк О.Ф. Особенности и возможность химической модификации поведенческих реакций в приподнятом крестообразном лабиринте хронически облученных мышей с различной генетически детерминированной радиочувствительностью // Радиационная биология. Радиоэкология, 2013. Т. 53. № 2. С. 170-182.

**PRIMARY SYSTEMS OF AN ORGANISM  
UNDER A STRESS AND IONIZING RADIATION**

**E.M. Kadukova, D.G. Stashkevich, M.A. Bakshayeva, F.I. Kuts, A.D. Naumov**  
Institute of the Radiobiology of NAS of Belarus, Gomel, Belarus,  
[helena.kad@mail.ru](mailto:helena.kad@mail.ru)

The effects of radiation exposure and stress (immobilization, Open Field test) on the regulation of the isolated heart and some other systems (Central and vegetative nervous system) were studied. Was shown that radiation factor alter the organism reaction on the effect of stress.

---

**ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОЗ РАДИАЦИИ И ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НА РАСТИТЕЛЬНОСТЬ В РАЙОНЕ КОЛЬСКОЙ АТОМНОЙ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

**А.Н. Кизеев, С.Ф. Ушамова**  
Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина  
Кольского НЦ РАН, Апатиты, Россия, [aleksei.kizeev@mail.ru](mailto:aleksei.kizeev@mail.ru),  
[svetonaftus@yandex.ru](mailto:svetonaftus@yandex.ru)

На территории Мурманской области много промышленных предприятий – горнодобывающих, металлургических, транспортных, есть и ядерные. Это Кольская АЭС (КАЭС), атомфлот, ядерно-технические установки, предприятия, работающие с радионуклидами, полигон утилизации и хранения радиоактивных отходов и другие объекты, которые входят в число потенциально опасных [2]. Ядерная энергетика (особенно после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и на Фукусиме в Японии в 2011 г.) требует рассмотрения в полном объеме вопросов безопасности таких предприятий для человека и биоты. Это создание технологически безупречного режима работы на АЭС, решение узловых проблем переработки радиационных отходов и отработанного ядерного топлива, обязательное экологическое обследование близлежащих территорий, фауны, флоры, здоровья человека.

В спектре постоянных проблем радиобиологии и радиоэкологии остаются извечные вопросы биологического действия малых доз ионизирующих излучений. До конца прошлого столетия доминировал антропоцентрический подход к защите окружающей среды от действия радиации, сформулированный в 1970-1980-х гг. Международным комитетом по радиационной защите, кратко гласящий, что «если радиационными стандартами защищен человек, то в этих условиях защищенной от облучения оказывается и окружающая среда (биота)». Вместе с тем, в области охраны окружающей среды



от воздействия радиации в противовес (или, точнее, в дополнение) к указанным выше антропоцентрическим воззрениям получили развитие экоцентрические принципы, в основе которых стоит необходимость прямого доказательства защищенности природных объектов [1].

Многолетний опыт экологических исследований, проведенных в районе КАЭС, свидетельствует об отсутствии заметных изменений радиационного фона в районе ее расположения. Однако до настоящего времени биологические эффекты малых доз проникающей радиации не могут считаться полностью изученными. В частности, пока отсутствуют исчерпывающие сведения о механизме их стимулирующего действия на живые объекты, при том, что именно для района КАЭС ранее были получены обнадеживающие данные о повышении устойчивости произрастающих здесь растений сосны обыкновенной к действию различных повреждающих факторов [3]. Вопросы ионизирующих излучений в центре внимания ученых ПАБСИ Кольского НЦ РАН.

С 2009 г. проводятся исследования почвенно-растительного покрова на 10 стационарных пробных площадках в пределах зоны наблюдения КАЭС, ограниченной окружностью 15 км, центр которой совпадает с геометрическим центром между венттрубами первой и второй очередей предприятия. Пять пробных площадок расположены на расстоянии 10 км от станции и пять контрольных – в 15 км от нее.

В качестве объектов исследования были выбраны почвенный покров и компоненты растительности – побеги черники (*Vaccinium myrtillus* L.), листья березы (*Betula pendula* Roth. × *Betula pubescens* Ehrh.), ягель (*Cladonia rangiferina* L.).

Радиометрическую съемку местности проводили с помощью пикового радиометра СРП-68-01. Растительные и почвенные образцы отбирали ежемесячно, с июня по сентябрь, в трех повторностях, в соответствии с общими требованиями к отбору проб [6].

Для измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД, мкР/ч), суммарной удельной  $\alpha$ - $\beta$ -активности в пробах применяли радиометрический метод [3-4] (сертифицированный радиологический комплекс «Прогресс-АБГ», радиометр УМФ-1500Д). Определение концентраций наиболее радиотоксичных нуклидов природного ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{7}\text{Be}$ ,  $^{40}\text{K}$ , и др., Бк/кг) и техногенного ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и др., Бк/кг) происхождения осуществляли гамма-спектрометрическим методом [3-4] (сертифицированный гамма-спектрометр «Прогресс»).

В растительных образцах также определяли концентрации химических элементов (Ni, Cu, Co, Mn и др.) и измеряли морфологические (площадь листовой пластинки), физиологические (содержание пигментов) и геоботанические (проективное покрытие) показатели по стандартным методикам [3, 4, 6].

Установлено, что естественный радиационный фон на пробных площадках, расположенных в зоне наблюдения КАЭС, варьирует от 5.5 до 7.2 мкР/ч, тогда как за ее пределами этот показатель на большинстве площадок ниже 7 мкР/ч, что не превышает МЭД для населения на открытой местности (0.2 мкЗв/ч). МЭД на поверхности сырой и воздушно-сухой массы растительных образцов составляет 0.15 мкЗв/ч. Данные величины соответствуют малым уровням ионизирующего излучения (область малых доз для живых объектов находится в пределах до 0.2-0.5 Зв) [5]. Удельная  $\alpha$ - $\beta$ -активность растительных объектов варьировала в зависимости от расположения пробных площадок, что было связано с различным накоплением радионуклидов. Рассматриваемые объекты содержали естественные радионуклиды рядов урана-238 ( $^{226}\text{Ra}$ ) и тория-232 ( $^{232}\text{Th}$ ),  $^7\text{Be}$ ,  $^{40}\text{K}$  и техногенные –  $^{137}\text{Cs}$ .

Основным источником поступления  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  в природные объекты в районе КАЭС была почва. Радионуклид космического происхождения  $^7\text{Be}$  поступал с воздушными массами, атмосферными осадками и аэрозолями. В большом количестве в растениях содержался радионуклид  $^{40}\text{K}$ , который является неотъемлемым элементом в биологических объектах. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  было связано, в основном, с естественным круговоротом продуктов деления, поступивших в атмосферу и почву от атомной энергетики, испытаний ядерного оружия, проводившихся ранее на полигонах планеты, и от аварии на Чернобыльской атомной электростанции [4].

При сравнении накопления радионуклидов в почве и ассимиляционных органах черники и березы на пробных и контрольных площадках были выявлены различия. Увеличение содержания  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в почве на большинстве контрольных площадок не сопровождалось накоплением данных радионуклидов в листьях, что могло свидетельствовать о способности растений к избирательной фильтрации или избирательному поглощению радионуклидов различного генезиса. При этом в растениях селективно накапливались Mn, Ni, Co, Cr и другие элементы.

При избирательном поглощении листьями этих растений радионуклидов и тяжелых металлов выявлены признаки ряда адаптивных механизмов, направленных на снижение абсорбции радионуклидов:

- активная фильтрация отдельных радионуклидов ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и др.), осуществляемая мембранами эпидермальных клеток корней и сосудисто-проводящей системой стеблей при высоком уровне энергообмена;

- активизация процессов роста и связанных с ним процессов метаболизма и энергообмена, и как результат – увеличение содержания пигментов (в хлоропластах и/или содержания самих хло-

ропластов, клеток палисадной паренхимы), размеров листьев и проективного покрытия. В результате удельная активность в пересчете на вес тканей снижается;

– ингибирование роста и соответствующих процессов обмена веществ и энергии, благодаря чему подавляется поглощение отдельных ( $^{40}\text{K}$ ) радионуклидов. Предполагается, что функционирование этих механизмов связано с избирательной фильтрацией/поглощением нерадиоактивных элементов (Mn), участвующих в синтезе хлорофиллов.

Таким образом, характер изменчивости рассматриваемых характеристик растений в зависимости от колебаний содержания радиоактивных и нерадиоактивных химических элементов в ассимиляционных органах и в окружающей среде, дает основания предполагать использование ими различных приспособительных механизмов.

Дальнейшее изучение взаимоотношений радионуклидов с нерадиоактивными (природными и техногенными) элементами в формировании адаптивных реакций растений позволит приблизиться к пониманию нелинейного характера зависимости «доза-эффект» применительно к действию проникающей радиации на биологические объекты, что может быть использовано при разработке новых эффективных методов радиологического мониторинга.

#### Литература

1. *Алексахин Р.М.* Радиоэкология: столетняя история этой области естествознания – уроки эволюции и современные задачи // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Матер. Междунар. конф. Сыктывкар, 2009. С. 7-9.
2. Доклад по охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов Мурманской области в 2006 году. Мурманск, 2007. 159 с.
3. *Кизеев А.Н.* Влияние промышленных загрязнений на состояние ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на Кольском полуострове: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2006. 26 с.
4. *Кизеев А.Н., Ушамова С.Ф., Жиров В.К., Ивкова Н.В.* Оценка свойств растений черники, произрастающей на территории с незначительно повышенным радиационным фоном // Экология человека, 2012. № 6. С. 37-42.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормы тивы СП 2.6.1.758-99. М., 1999. 116 с.
6. *Черных Н.А., Сидоренко С.Н.* Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. М.: Изд-во РУДН, 2003. 430 с.

**EFFECTS OF LOW LEVEL RADIOACTIVITY AND CHEMICAL ELEMENTS  
ON VEGETATION AROUND OF THE KOLA NUCLEAR POWER PLANT  
(MURMANSK REGION)****A.N. Kizeev, S.F. Ushamova**

Polar-Alpine Botanical Garden – Institute to bear the name of N.A. Avrorin  
of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Apatity, Russia

In this work the results of radio-ecological monitoring in area around of the Kola Nuclear Power Plant are submitted. Under insignificant increase of the X-radiation, at least of some types of adaptive mechanisms were revealed. We propose that functioning of these mechanisms was caused by selective filtration/absorption of radioactive and not radioactive elements.

**БИОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОТВЕТНЫХ РЕАКЦИЙ  
МЫШЕВИДНЫХ ГРЫЗУНОВ НА СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ  
ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В МАЛЫХ ДОЗАХ****А.Г. Кудяшева<sup>1</sup>, О.Г. Шевченко<sup>1</sup>, Н.Г. Загорская<sup>1</sup>, Л.Н. Шишкина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[kud@ib.komisc.ru](mailto:kud@ib.komisc.ru)

<sup>2</sup>Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,  
Москва, Россия

Изучение адаптивных возможностей организма при совместном действии повреждающих факторов разной природы вызывает необходимость оценить состояние мембран их органов. При стрессе, являющемся неспецифической реакцией ответа организма на повреждающие воздействия [7], наиболее ранние изменения выявляются в состоянии процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и энергетического обмена [2, 4], обуславливающих функционирование мембранной системы органов [3, 6]. Ранее было установлено, что в тканях мышевидных грызунов, длительно обитающих на загрязненных радионуклидами территориях, регуляция ПОЛ и энергетического обмена переходит на новый уровень функционирования по сравнению с обитающими на контрольных участках. Это следует из нарушения взаимосвязей между различными звеньями системы регуляции ПОЛ и дисбаланса энергетических процессов, выявленных как у полевок, отловленных на радиоактивно загрязненных территориях в Республике Коми, так и у разных видов мышевидных грызунов, отловленных в зоне ЧАЭС в первые восемь лет после аварии [3, 6, 8, 10]. Обнаружено также сохранение измененного антиоксидантного (АО) статуса в тканях потомков полевок-

экономок, размноженных в условиях вивария от родителей, длительное время обитающих в разных радиоэкологических условиях [9]. Результаты исследований позволили сделать вывод об изменении чувствительности животных под влиянием хронического низкоинтенсивного излучения к дополнительным воздействиям [3].

В данном сообщении обобщены результаты исследований действия стрессовых факторов (низкоинтенсивное  $\gamma$ -излучение в малых дозах, холод) на параметры системы регуляции ПОЛ (активность каталазы; содержание продуктов окисления, реагирующих с 2-тиобарбируровой кислотой; состав фосфолипидов) и энергетического обмена (активность ферментов цикла Кребса – сукцинат- и пируватдегидрогеназы и гликолиза – лактатдегидрогеназы) в функционально различных тканях мелких млекопитающих при дополнительных воздействиях физических и химических факторов в широком диапазоне доз. Оценка адаптационных возможностей организма проведена в четырех вариантах эксперимента:

1. действие холода (2.0-2.5 ч при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$ ) на половозрелых полевах-экономках, отловленных на контрольном и радиевом участках;

2. хроническое  $\gamma$ -облучение полевок-экономок первого-третьего поколений, размноженных в условиях вивария от родителей с контрольного и радиевого участков: средняя мощность дозы источников  $^{226}\text{Ra}$  645 мкР/ч, суммарная поглощенная доза при облучении в течение 3.5 и 6 мес. составляла 1.62 и 2.78 сГр соответственно;

3. сочетанное и раздельное действие хронического  $\gamma$ -излучения в дозе 1.6 сГр и нитрата свинца в диапазоне концентраций от 0.003 до 0.3 г/кг на половозрелых самцов мышей линии СВА;

4. совместное и раздельное действие хронического  $\gamma$ -излучения (30 сут., мощность экспозиционной дозы 2 мР/ч) и нитрата урана (30 сут., удельная активность 25 Бк/л) на половозрелых самцов мышей линии СВА.

Показано, что ответные реакции у полевок, обитающих в разных радиоэкологических условиях, на дополнительное воздействие холодового стресса зависят от исходного уровня процессов дегидрирования в различных тканях у сравниваемых групп животных. При этом функциональные возможности процессов анаэробного обмена в печени у полевок с радиевого участка по сравнению с таковыми у животных с контрольного участка, понижены, о чем свидетельствует низкий уровень активности всех трех исследованных ферментов [4].

$\gamma$ -облучение разной длительности (3.5 и 6 мес.) полевок-экономок первого-третьего поколений от родителей с контрольного и радиевого участков вызывало достоверное снижение адаптационных процессов в сердечной мышце полевок с радиевого участка, проявляющееся в угнетении процессов окисления сукцината и пи-

рувата при облучении полевок в суммарной дозе 2.78 сГр. Направленность и характер сдвигов энергетического обмена в этом варианте эксперимента также существенно зависели от исходного уровня процессов анаэробного окисления в тканях полевок и их потомства, не подвергнувшись этим воздействиям. Установлено, что полвки-экономки с радиевого участка и их потомство при дополнительном  $\gamma$ -облучении характеризуются более низкими резервными функциональными возможностями, что указывает на изменение чувствительности этих животных к действию дополнительных повреждающих факторов [4].

Сочетанное действие  $\gamma$ -излучения в малой дозе и нитрата свинца в разных концентрациях приводило к повышению интенсивности ПОЛ и активности каталазы в печени мышей линии СВА. Изменения количественного соотношения фракций фосфолипидов в тканях мышей при сочетанном действии данных факторов более выражены, чем при действии одного  $\gamma$ -излучения. Наиболее серьезные биохимические изменения по сравнению с контролем выявлены в печени мышей при совместном воздействии  $\gamma$ -излучения и нитрата свинца в дозах 0.01 и 0.03 г/кг [5].

Показатели системы регуляции ПОЛ в печени, селезенке и эритроцитах крови мышей линии СВА изучали при отдельном и совместном действии хронического  $\gamma$ -излучения в малой дозе и поступлении  $^{238}\text{U}$  в виде нитрата с питьевой водой спустя сутки после прекращения воздействия. Наиболее значительные изменения обнаружены в составе фосфолипидов селезенки и эритроцитов крови мышей, т.е. в тканях с низким АО статусом. Эффекты отдельного действия данных факторов были подобны эффектам их совместного действия на животных. Однако анализ корреляционных взаимосвязей между обобщенными показателями состава фосфолипидов во всех исследованных тканях показал существенное изменение масштаба взаимосвязей между окисляемостью липидов и жесткостью мембранной системы печени при совместном воздействии  $\gamma$ -излучения и нитрата урана. Это может быть обусловлено как неодинаковой чувствительностью показателей системы регуляции ПОЛ к данному воздействию, так и различием механизма действия внутреннего и внешнего облучения и/или природы излучателей на процессы биосинтеза и деградации фосфолипидов в тканях мышей.

Совокупность экспериментальных данных и анализ различных механизмов адаптивных эффектов стресс-реакции на уровне органов-мишеней позволяет констатировать, что результаты исследования соответствуют схеме механизма развития стресс-реакции, при которой к адаптивным эффектам относят активацию процессов ПОЛ и активности ферментов, а к повреждающим – увеличение содержания свободных жирных кислот и лизоформ фосфолипидов, приво-

дящее к повреждению клеточных мембран и функции клеток. Следовательно, адаптивные эффекты стресса могут трансформироваться в повреждающие, что обуславливает развитие патологий [1].

Анализ полученных данных свидетельствует о высокой чувствительности систем регуляции ПОЛ и энергетического обмена в тканях полевок-экономок и лабораторных мышей как к действию низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения в малых дозах, так и его совместного действия с дополнительными факторами разной природы, что ранее было обнаружено и при комплексном исследовании состояния популяций мышевидных грызунов, обитающих на загрязненных радионуклидами территориях [3, 6, 8, 10]. Выявлены изменения ответных реакций организма на дополнительное воздействие факторов физической и химической природы в малых дозах, масштаб которых во многих случаях обусловлен исходными значениями показателей в анализируемых тканях. Это позволяет предположить, что в тканях животных, обитающих в условиях техногенного радиоактивного загрязнения среды, формируется неспецифическая биохимическая адаптационная реакция, характеризующаяся иным исходным уровнем АО статуса и перестройками энергетического обмена, что обуславливает изменение их чувствительности к воздействию других повреждающих факторов и ответных реакций организма на эти воздействия. Совокупность представленных данных подтверждает участие систем регуляции ПОЛ и энергетического обмена в процессе адаптации организма [10] и позволяет использовать перечисленные показатели для оценки особенностей компенсаторно-приспособительных реакций при совместном действии факторов физической и химической природы в малых дозах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума УрО РАН по направлению «Молекулярно-клеточная биология» (проект № 12-П-4-1021) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине».

#### Литература

1. Барабой В.А., Сутковой Д.А. Окислительно-антиоксидантный гомеостаз в норме и патологии. Киев: Наукова думка, 1997. 420 с.
2. Биоантиоксиданты в лучевом поражении и злокачественном росте / Е.Б. Бурлакова, А.В. Алесенко, Е.М. Молочкина и др. М.: Наука, 1975. 211 с.
3. Биологические эффекты радиоактивного загрязнения в популяциях мышевидных грызунов / А.Г. Кудяшева, Л.Н. Шишкина, О.Г. Шевченко и др. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 214 с.
4. Кудяшева А.Г., Таскаев А.И. Адаптивные реакции процессов дегидрирования у полевки-экономки при дополнительных воздействиях физической природы // Радиационная биология. Радиоэкология, 2011. Т. 51. № 5. С. 549-558.

5. Кудяшева А.Г., Шевченко О.Г., Загорская Н.Г. Ранние эффекты раздельного и совместного действия нитрата свинца и облучения в малых дозах на морфо-физиологические и биохимические показатели мышей // Вестн. Поморского ун-та. Сер. Естественные и точные науки, 2007. № 1. С. 56-65.

6. 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.

7. Меерсон Ф.З. Адаптация, стресс, профилактика. М.: Наука, 1981. 278 с.

8. Шишкина Л.Н., Кудяшева А.Г., Загорская Н.Г., Таскаев А.И. Регуляция окислительных процессов в тканях мышевидных грызунов, отловленных в зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология, 2006. Т. 46. № 2. С. 216-232.

9. Шишкина Л.Н., Кудяшева А.Г., Загорская Н.Г., Шевченко О.Г. Показатели антиоксидантного статуса в тканях потомков полевок-экономок из районов с повышенной естественной радиоактивностью // Радиационная биология. Радиоэкология, 2005. Т. 45. № 4. С. 505-511.

10. Shishkina L.N., Kudyasheva A.G., Zagorskaya N.G. et al. Participation of the Lipid Peroxidation Processes in the Mechanism of Wild Rodent Adaptation to Radioactive Contamination of Chernobyl NPP Zone // The Lessons of Chernobyl: 25 Years Later. N.-Y.: Nova Science Publishers, 2012. P. 187-208.

#### BIOCHEMICAL ASPECTS OF THE MICE RODENT RESPONSE REACTIONS TO THE COMBINED ACTION OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS AT LOW DOSES

A.G. Kudyasheva<sup>1</sup>, O.G. Shevchenko<sup>1</sup>, N.G. Zagorskaya, L.N. Shishkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Biology of Komi SC of Ural Branch of Russian Academy  
of Sciences, Syktyvkar, [kud@ib.komisc.ru](mailto:kud@ib.komisc.ru)

<sup>2</sup>Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences,  
Moscow

The analysis of the lipid peroxidation processes and the energy exchange in the rodent tissues of the natural population and laboratory mice under the combined action of the physical and chemical factors at the low doses is performed. Data obtained are discussed as regards of the participation of these processes in the adaptation mechanism of rodents to the combined action of damaging factors.



**СХОДСТВО БИОХИМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ  
КЛЕТЧНЫХ АДАПТИВНЫХ РЕАКЦИЙ  
ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ НИЗКОИНТЕНСИВНОМ ОБЛУЧЕНИИ  
И ДЕЙСТВИИ ФИТОЭКДИСТЕРОИДНОГО ПРЕПАРАТА СЕРПИСТЕН**

**А.Г. Кудяшева<sup>1</sup>, Л.И. Андреева<sup>2</sup>, В.В. Володин<sup>1</sup>, С.О. Володина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[kud@ib.komisc.ru](mailto:kud@ib.komisc.ru)

<sup>2</sup> Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова,  
Санкт-Петербург, Россия

Предметом наших многолетних исследований являются фитоэкдистероиды – растительные аналоги гормонов линьки насекомых с выраженным физиологическим действием у млекопитающих. Эта работа продиктована необходимостью поиска новых природных средств адаптогенной природы, способствующих повышению функциональных резервов организма человека в неблагоприятных условиях природной и производственной среды, при высоких физических и психоэмоциональных нагрузках, при действии других стрессовых факторов, что является одной из актуальнейших проблем медицины здорового человека. Исследованиями по физиологии и биохимии стресса доказано образование в клетках первичных метаболитов, запускающих механизмы стрессовой реакции, а также возможность ее регуляции с помощью адаптогенов. В современном звучании адаптогены получили совершенно определенную научную основу и рассматриваются в настоящее время как новый класс метаболических регуляторов, позволяющих организму адаптироваться в изменяющихся условиях окружающей среды и избегать возникновения нарушений, обусловленных действием этих факторов [13]. Когда был выявлен анаболический эффект и отсутствие гормонального действия экдистероидов на млекопитающих, открылась перспектива использования этих соединений в медицине, после чего выявлены многочисленные фармакологические эффекты [11, 12]. В настоящее время международный рынок пищевых добавок для спорта, нуждающегося в безопасных и эффективных адаптогенных средствах, быстро развивается и уже насчитывает более 100 различных наименований продуктов, содержащих фитоэкдистероиды. Последнее обстоятельство указывает на необходимость проведения углубленных фармакологических исследований фитоэкдистероидов как нового класса природных адаптогенов с точки зрения установления молекулярных и клеточных механизмов их действия и внедрения их в практику восстановительной и спортивной медицины, гериатрии и валеологии. По нашему мнению, в будущем следует уделить внимание разработке рекомендаций по использованию экди-

стероидсодержащих препаратов и БАДов различными категориями именно здоровых людей, подверженных в силу особенностей трудовой деятельности или условий проживания действию стрессовых факторов разнообразной природы. Для северного региона, каким является Республика Коми, особо актуальна разработка препаратов и биодобавок для коррекции адаптивных реакций организма в неблагоприятных условиях Севера, главные из которых – низкие температуры, неоптимальный световой режим, условия гипоксии, на некоторых территориях – повышенный радиационный фон.

В настоящее время установлена роль растительных адаптогенов, выступающих в качестве «мягких» стрессоров, применение которых приводит к формированию состояния неспецифически повышенной сопротивляемости, характеризующейся ростом устойчивости организма по отношению к действию стрессорных факторов разной природы [16].

Цель работы состояла в сравнении неспецифических адаптивных реакций в клетках и тканях животных, проявляющихся при действии фитоэкдистероидов в малых дозах, хроническом облучении низкой интенсивности, гипертермии, холодового воздействия (на основе обобщения данных, полученных в экспериментах на лабораторных мышах и крысах) [3, 6, 8].

Известно, что при действии любого стрессового фактора в клетках организма начинает развиваться клеточный стресс, который вызывает целый комплекс неспецифических изменений метаболизма в результате активации нейроэндокринной системы и ее звена гипоталамус–гипофиз–кора надпочечников и усиления свободно-радикальных процессов, характеризующие признаки общего адаптационного синдрома. Установлено, что на клеточном уровне приобретение устойчивости к действию неблагоприятных факторов, выживаемость клетки напрямую связана с повышением содержания белков теплового шока (БТШ, белков стресса). Считают, что увеличение экспрессии БТШ в ответ на стресс – это универсальный неспецифический механизм защитной реакции на клеточном уровне, который благодаря своей не селективности по отношению к различным стресс-факторам, подобен общему адаптационному синдрому Г. Селье на уровне организма, характеризуемого неспецифической активацией нервной и эндокринной систем [1, 2, 7].

В опытах на мышах при хроническом действии низкоинтенсивного гамма-излучения курсовое введение Серпистена без облучения привело к изменениям фосфолипидного состава мембран, напоминающим таковое при длительном облучении, а именно: увеличено содержание общих фосфолипидов в эритроцитах при суммарных дозах 5 и 50 мг/кг в течение 10 дней и в печени (при дозе 50 мг/кг); также повышена доля лизоформ фосфолипидов в эритроцитах как

при хроническом облучении, так и при введении Серпистана в дозе 5 мг/кг. В печени увеличена доля лизофосфолипидов при введении Серпистана в обеих дозах; в эритроцитах при курсовом введении Серпистана в дозе 50 мг/кг снижена вязкость, увеличена жесткость, что в сочетании с уменьшением доли лизоформ фосфолипидов свидетельствует о подавлении процессов модификации свойств липидного бислоя мембран, которые обычно сопровождают адаптационные изменения. В печени обе дозы 5 и 50 мг/кг повысили долю лизоформ фосфолипидов, что является также свидетельством происходящих адаптационных процессов в гепатоцитах. Увеличение лизоформ фосфолипидов, по всей видимости, является следствием активации фосфолипазы  $A_2$ , что влечет за собой рост внутриклеточного содержания арахидоновой кислоты и последующих активных метаболитов арахидонового каскада [9]. Далее было отмечено возрастание содержания фосфатидной кислоты как при действии излучения, так и при курсовом введении Серпистана в эритроцитах (в дозе 50 мг/кг) и печени (в дозе 5 мг/кг), что косвенно свидетельствует об активации фосфолипаз С и D, происходящей через активацию мембранных рецепторов, связанных с Gq белком. Как результат действия фосфолипаз образуются диацилглицерол (ДАГ) и в случае субстрата фосфатидилинозита – в конечном итоге инозитолтрифосфат (ИТФ). ИТФ усиливает выброс кальция из внутриклеточных депо; вторичные посредники ДАГ, ИТФ и кальций активируют протеинкиназы, фосфорилирующие клеточные различные белки, можно полагать, в том числе обеспечивающие адаптивные клеточные реакции (активация PI3 киназы и протеинкиназы В (Akt), что в конечном итоге приводит к активации белкового синтеза и повышения выживаемости клетки [10]. Усиление адаптивного протеинсинтеза невозможно без участия конститутивного белка теплового шока Hsc70, что было отмечено в печени после курсового введения Серпистана в суммарной дозе 12 мг/кг (опыт с перегреванием), а также после курсового введения Серпистана в дозе 30 мг/кг в печени и гиппокампе (опыт с условиями Севера). В качестве рабочей гипотезы можно принять и еще один механизм действия эрдистероидов. Мембранотропные свойства Серпистана, образование лизофосфолипидов, изменение вязкости и текучести липидного бислоя мембран и свойств мембрансвязанных белков, по всей видимости, могут неспецифическим образом активировать ионотропные каналы и усиливать натриевые и кальциевые трансмембранные токи [4, 14]. Интенсификация отдельных паттернов поведения, выявленная у крыс на фоне введения Серпистана, по всей видимости, связана с активацией ионотропных каналов и, возможно, метаболитных рецепторов нервных клеток, усилением протекания Ca-зависимых процессов [15].

Увеличение или тенденция к увеличению содержания индуцибельного белка стресса Hsp70 в тканях крысы были отмечены после курсового введения Серпистена в суммарной дозе 12 мг/кг, что свидетельствует о «стрессоподобном» действии Серпистена на клеточном уровне [2]. Известно, что для активации экспрессии гена hsp70 необходима активация цитоплазматического фактора теплового шока (heat shock factor, HSF), его фосфорилирование и тримеризация, после чего он поступает в ядро и связывается с элементом теплового шока (HSE) в промоторе гена hsp70. Необходимыми условиями такой активации является увеличение в клетке содержания белков с изменениями структуры денатурационной направленности, в которой не последнее место занимает активация свободнорадикальных процессов. По всей видимости, экидистероидные препараты подобно действию гамма-излучения способны усиливать свободнорадикальные процессы. Так, в результате курсового введения мышам инокостерона в суммарной дозе 5 мг/кг отмечали тенденцию к увеличению содержания ТБК-реагирующих продуктов в печени и селезенке мышей, а в головном мозге это повышение было достоверным [6, 8]. Биохимический механизм действия Серпистена в малых концентрациях (дозах) в клетках и тканях лабораторных животных подобен адаптивным процессам, происходящим в организме при хроническом действии низкоинтенсивного гамма-излучения, действуя как мягкий стресс. Однако знак равенства между действием облучения в малых дозах и Серпистена ставить нельзя, так как при действии ионизирующего излучения даже в малых дозах может повреждаться геном, а при действии Серпистена этого не происходит. Серпистен, прежде всего, влияет на клеточные процессы регуляции, в том числе на ЦНС, плазматическую мембрану и, вероятно, в этом случае преобладает его эпигенетическое действие. При действии факторов физической природы, как, например, холода, гипертермии или облучения в малой дозе, большую роль играет сила стрессового воздействия, а также схема курсового введения препарата (доза, длительность применения).

Таким образом, установлено, что биохимический механизм действия Серпистена включает активацию процессов перекисного окисления липидов, а также индукцию биосинтеза белков теплового шока Hsc70, которые сопровождают на клеточном уровне процессы срочной и долговременной адаптации и способствуют повышению резистентности организма к стрессовым воздействиям. Согласно теории интегральной медицины В.М. Дильмана, обнаруженные эффекты Серпистена открывают перспективу использования фитоэкидстероидов в качестве эффективных адаптогенов и стресс-протекторных средств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума УрО РАН «Фундаментальные науки – медицине» «Научные основы создания новых адаптогенных и геропротекторных средств растительного происхождения» (№ 12-П-4-1023) в 2012-2014 гг.

### Литература

1. Андреева Л.И. Теоретическое и прикладное значение белков теплового шока 70 КДА; возможность практического применения и фармакологической коррекции // Научные обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии, 2002. Т. 1. № 2. С. 2-18.

2. Андреева Л.И., Бойкова А.А., Маргулис Б.А. Особенности внутриклеточного содержания и функциональная роль белков теплового шока семейства 70 кДа при стрессе и адаптации // Технологии живых систем, 2009. Т.6. № 3. С. 11-17.

3. Володин В.В., Пчеленко Л.Д., Володина С.О. и др. Фармакологическая оценка новой экистероидсодержащей субстанции Серпистен // Растительные ресурсы, 2006. Т. 42. Вып. 3. С. 113-130.

4. Вислобоков А.И., Володин В.В., Игнатов Ю.Д. Влияние экистероидной фракции из *Serratula coronata* на трансмембранные ионные потоки нейронов улитки // Экспериментальная и клиническая фармакология, 2006. Т. 69. № 6. С. 9-12.

5. Грибанов Г.А. Особенности структуры и биологическая роль лизофосфолипидов // Вопр. мед. химии, 1991. Т. 37. № 4. С. 2-10.

6. Кудяшева А.Г., Шевченко О.Г., Загорская Н.Г. и др. Исследование противолучевых свойств экистероидсодержащих препаратов при хроническом облучении в малых дозах // Теорет. и прикладная экология, 2012. № 1. С. 24-34.

7. Меерсон Ф.З., Малышев И.Ю., Замотринский А.В. Генерализованное накопление стресс-белков при адаптации организма к стрессорным воздействиям // Бюл. экспер. биологии и медицины, 1993. Т. 116. № 9. С. 231-233.

8. Шевченко О.Г., Кудяшева А.Г., Загорская Н.Г. и др. Противолучевые свойства экистероидсодержащих препаратов // Радиацион. биология. Радиоэкология, 2007. Т. 47. № 4. 501-508.

9. Сергеева М.Г., Варфоломеева А.Т. Каскад арахидоновой кислоты. М.: Народное образование, 2006. 256 с.

10. Gorelick-Feldman J., Conick W., Raskin I. Ecdysteroids elicit a rapid (2+) flux leading to Akt activation and increased protein synthesis in skeletal muscle cells // Steroids, 2010. Vol. 75. № 10. P. 632-637.

11. Lafont R. Recent Progress in Ecdysteroid Pharmacology // Теорет. и прикладная экология, 2012. № 1. С. 6-12.

12. Lafont R., Dinan L. Innovative and future applications for ecdysteroids / Ecdysones: Structures and Functions // Springer, 2009. P. 551-578.

13. Panossian A., Wikman G. Effects adaptogens on the Central Nervous System and the Molecular Mechanisms Associated with Their Stress-Protective Activity // Pharmaceuticals, 2010. Vol. 3. P. 188-224.

14. *Roelofsen B.* Membrane proteins. FEBS 11th meeting. Copenhagen, 1978. Vol. 45. P. 183.

15. *Schneider S., Wunsch S., Schwab A., Oberleithner H.* Rapid activation of calcium-sensitive  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  exchange induced by 20-hydroxyecdysone in salivary gland of *Drosophila melanogaster* // *Mol. Cell. Endocrinol.*, 1996. Vol. 116. № 1. P. 73-79.

16. *Asea A., Calderwood S.* Heat Shock Proteins and Whole Body Physiology // Springer, 2010. Vol. 5. P. 351-364.

#### SIMILARITY IN BIOCHEMICAL MECHANISMS OF CELL ADAPTIVE REACTIONS UNDER LOW-INTENSITY CHRONIC IRRADIATION AND EFFECTS OF PHYTOECDISTEROID DRUG SERPISTEN

A.G. Kudyasheva<sup>1</sup>, L.I. Andreeva<sup>2</sup>, V.V. Volodin<sup>1</sup>, S.O. Volodina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biology, Komi Science Centre, Syktyvkar, Russia,  
[kud@ib.komisc.ru](mailto:kud@ib.komisc.ru)

<sup>2</sup> Military Medical Academy of S.M. Kirov, St. Petersburg, Russia

Similarity in biochemical mechanisms of cell adaptive reactions under low-dose chronic g-irradiation and effects of phytoecdisteroid drug serpisten is discussed.

---

#### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ХИМИЧЕСКОГО И РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ ТЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТЕСТ-ОРГАНИЗМОВ

Т.А. Майстренко, Е.С. Белых, И.С. Боднарь

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

Появление новых видов загрязнителей окружающей среды и их комбинаций, а также существование в настоящее время высоких антропогенных нагрузок на многие экосистемы приводят к нарушению устойчивости экологического развития и обуславливают необходимость оценки влияния отдельных факторов и их сочетанного действия на биотические компоненты и экосистему в целом. Изучение изменений, происходящих на разных уровнях структурной организации и функционировании всей экосистемы при радиоактивном загрязнении среды обитания живых организмов, позволяет оценивать негативные последствия для биоты в условиях повышенного фона ионизирующих излучений, выявлять закономерности и прогнозировать безопасный уровень техногенного воздействия на компоненты биогеоценозов.

Цель нашей работы – оценка токсичности образцов воды из р. Теча (Челябинская область) для микроводорослей и гидрофитов. Для этого измерили гидрохимические показатели проб воды, определи-

ли степень токсического воздействия образцов из р. Течи на водные растения и сравнили наблюдаемые биологические реакции тест-организмов при комплексном воздействии компонентов проб воды, отобранных в створах реки на различном расстоянии от источника загрязнения.

Исследования проводили на территории Челябинской области в зоне влияния ПО «Маяк» – одного из крупнейших в мире центров по производству и переработке радиоактивных материалов. Технологическая деятельность предприятия на протяжении более полувека сопровождалась многочисленными ядерными инцидентами и авариями, что привело к масштабному радиоактивному загрязнению окружающей среды, в том числе речной системы Теча–Исеть–Тобол.

Отбор проб воды из Течи осуществляли между селами Муслимово и Бродокалмак в пяти точках на участке реки, характеризующемся сходными особенностями питания, а также строения долины и русла водоема на всем протяжении.

В качестве тест-организмов применяли широко используемые при биотестировании поллютантов различной природы [3] и чувствительные к ионизирующему излучению растения *Chlorella vulgaris* и *Lemna minor* [1, 6, 7]. Действие исследуемых проб воды на хлореллу оценивали по приросту биомассы водоросли, на ряску – по изменению морфологических показателей растений (размеру листьев и длине корней).

Проведенный физико-химический анализ содержания основных макроионов в химическом составе водных проб позволил при классификации отнести воды как исследуемой, так и контрольной рек к одному (гидрокарбонатному) классу и одной (кальциевой) группе. Однако содержание минеральных солей в пробах из Течи в два раза превышало данный показатель для Брусянки. Различия в солевом составе водоемов могли повлиять на миграционные процессы тяжелых металлов и радионуклидов в системе вода – донные отложения, поэтому в дополнение к природному мы использовали также отрицательный контроль (дистиллированную воду).

На основе стандартов ПДК для рыбохозяйственных водоемов оценили уровень загрязнения вод тяжелыми металлами. Концентрации элементов I и II классов опасности, за исключением Mo, не превышали установленные пределы, хотя в пробе 5 отмечено более высокое, чем в остальных точках, содержание Pb. Превышение ПДК<sub>рх</sub> Mo во всех пробах речной воды в 1.1-2.7 раза и ПДК<sub>рх</sub> Si в пробах 5 из Течи и контрольной из Брусянки, вероятнее всего, связано с региональными особенностями геохимического фона [2].

В результате производственной деятельности предприятия радиоактивному загрязнению подверглись не только водоемы, но и

наземные и прибрежные ландшафты, что привело к увеличению радиационного фона на исследуемых территориях до 0.44-0.67 мкЗв/ч. При этом мощность дозы излучения в воздухе в контрольной точке (К) не превышала 0.10 мкЗв/ч, что подтверждает отсутствие здесь локальных источников радиоактивного загрязнения. Основными дозообразующими радионуклидами на изученном нами участке реки являются долгоживущие  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и изотопы Pu [5]. Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах также были в 60-90 раз ниже соответствующего значения УВ [4], однако в три раза превосходили средний фоновый уровень по РФ и были в тысячи раз больше, чем эти показатели для контрольной точки и пробы 4, отобранной в стороне от постоянного водотока, что объясняется прочной фиксацией  $^{137}\text{Cs}$  пойменными грунтами и донными отложениями и его очень слабой способностью к химической миграции [5]. На сегодняшний день наибольшую опасность для пресноводной биоты представляет  $^{90}\text{Sr}$ , концентрации которого снижаются при удалении от источника радиоактивного загрязнения, но превышают значение соответствующего показателя для радиоактивно незагрязненной Брусянки в 218-375 раз. Различия в поведении одновременно поступивших в водную систему изученных искусственных радионуклидов обусловлены их разными геохимическими свойствами и способностью связываться с компонентами природных вод, в первую очередь – растворенным органическим веществом.

Биологическое действие природных пресных вод, содержащих повышенные концентрации некоторых тяжелых металлов и радионуклидов, исследовали методами биотестирования с использованием микроводорослей и гидрофитов, обладающих разной чувствительностью к химическим компонентам водных образцов. Изучение токсичности проб из р. Теча для *C. vulgaris* показало, что приток биомассы водоросли составляет для этих образцов 23-37% относительно отрицательного контроля, в то время как в пробе из р. Брусянки – 95%. При разбавлении всех проб речной воды в пробах 2 и 4 наблюдали увеличение прироста биомассы, что свидетельствует об уменьшении токсического воздействия. При дальнейшем разбавлении (в восемь раз) регистрировали снижение прироста хлореллы в пробах 1-5. Вероятно, это стало следствием падения концентраций природных питательных веществ. При таком сильном разбавлении достоверных различий в реакции *C. vulgaris* на действие проб из зоны радиоактивного загрязнения и за ее пределами не выявлено. Наибольшее токсическое воздействие, оцениваемое по уменьшению размеров листочков *Lemna minor*, оказали пробы 1-4 из Течи. Значение этого показателя для растений, выращенных в воде, отобранной в ближайшем к источнику загрязнения створе (1) реки, на 29% меньше, чем выращенных в дистиллированной воде



и контрольном образце. Достоверные ( $p < 0.01$ ) отличия в длинах корней отмечали только для ряски, культивируемой в воде пробы 1. Эти растения имели на 46% более короткие корни, чем из контрольных (К) образцов.

Таким образом, нами показано, что все пробы воды из Течи оказали токсическое воздействие на прирост микроводоросли, при этом токсичность образцов снижается при разбавлении растворов. В то же время оценка по морфологическим показателям выявила токсичность только части исследуемых проб для ряски малой: наибольшее уменьшение размеров листочков наблюдали у растений, выращенных в пробе 1, при этом проба 5 не оказала негативного влияния на *Lemna minor*, несмотря на сходные валовые концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в воде основного водотока р. Теча, на всем исследованном участке. Разная биологическая активность и токсичность содержащихся в природных водах макрокомпонентов, а также металлов и радионуклидов, определяются не столько содержанием, сколько физико-химическими формами и степенью взаимодействия с другими компонентами среды. Неодинаковая насыщенность речных вод на разных участках исследованного водоема органическими веществами и другими природными комплексообразователями может приводить к снижению биодоступности ионов токсикантов в разной степени для одноклеточных водорослей и высших водных растений.

Работа поддержана проектом № 12-И-4-2006 УрО РАН.

#### Литература

1. Берестина А.В., Родина А.Н., Рассказова М.М. Количественные закономерности морфологических изменений *Lemna minor* L. в условиях острого и хронического низкоинтенсивного гамма-облучения // Биология – наука XXI века: Тез. XVI Междунар. Пушчинской школы-конф. молодых ученых. Пушино, 2012. С. 300.
2. Геология СССР. Т. XII. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. I. Геологическое описание. М.: Недра, 1969. Кн. 2. 304 с.
3. Лисовицкая О.В., Терехова В.А. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения // Доклады по экологическому почвоведению, 2010. Вып. 13. № 1. С. 1-18.
4. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
5. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. Пресноводная радиоэкология. Екатеринбург: Академнаука, 2012. 544 с.
6. Шевченко В.А. Радиационная генетика одноклеточных водорослей (исследования на хлорелле). М.: Наука, 1979. 256 с.
7. Evseeva T., Geras'kin S., Maystrenko T. et al. Comparative estimation of  $^{232}\text{Th}$  and stable Ce (III) toxicity and detoxification pathways in freshwater alga *Chlorella vulgaris* // Chemosphere, 2010. Vol. 81. P. 1320-1327.

**ASSESSMENT OF CHEMICAL AND RADIOACTIVE CONTAMINATION RATE  
OF THE TECHA RIVER WITH PLANT TEST-ORGANISMS****T.A. Maystrenko, E.S. Belykh, I.S. Bodnar**

Institute of Biology of Komi SC of the Ural Branch of RAS, Syktyvkar, Russia

Toxicity of water sampled from the Techa river was estimated with *Lemna minor* and *Chlorella vulgaris*. Microalga was found to be more sensitive as compared with the high plant test system. Specific activities of radionuclides and several heavy metal concentrations in the river water were found to determine samples toxicity.

---

**ОЦЕНКА РИСКА СМЕРТИ ОТ РАКА ОРГАНОВ ПИЩЕВАРЕНИЯ  
У РАБОТНИКОВ, ПОДВЕРГАВШИХСЯ ХРОНИЧЕСКОМУ  
СОЧЕТАННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ****М.В. Осипов**Южно-Уральский институт биофизики, Озерск, Россия,  
[ferrum76@mail.ru](mailto:ferrum76@mail.ru)

На сегодняшний день одной из актуальных проблем радиационного нормирования является оценка риска развития злокачественных новообразований у работников предприятий, подвергающихся в течение жизни длительному воздействию профессионального облучения как от внешнего гамма, так и от внутреннего альфа излучения в результате ингаляции альфа-активных аэрозолей, содержащихся в воздухе производственных помещений. Воздействие ионизирующего излучения на организм может вызывать как детерминированные, так и стохастические эффекты. На настоящий момент эффекты, такие как развитие лейкозов при воздействии высоких доз ионизирующего излучения, уже достаточно хорошо описаны в литературе [1]. Развитие стохастических эффектов в результате воздействия относительно малых доз ионизирующего излучения за относительно длительный временной интервал, в частности, солидных злокачественных новообразований, требует больше времени для наблюдения, что возможно благодаря проведению когортного исследования.

В данном исследовании проанализирована онкологическая смертность в когорте работников основных производств ПО «Маяк», нанятых в период с 1948 по 1982 г. и подвергавшихся производственному контакту с ионизирующим излучением в широком диапазоне доз. Период наблюдения за когортой – с 1948 по 2008 г. Данные для анализа получены из медико-дозиметрического регистра, созданного в лаборатории эпидемиологии Института биофизики со-

вместно с медицинскими работниками ЦМСЧ № 71 г. Озерска [2]. Из 22373 работников предприятия, включенных в исследование, около 25% женщин. Для исследования использовалась накопленная в течение жизни органная доза излучения с лагом в пять лет, данные о дозе были получены из дозиметрической системы Дозы-2008 [3].

Доза внешнего гамма-излучения у персонала была измерена более чем в 95% случаев, средняя величина накопленной в течение жизни дозы составляет около 0.7 Зв в эквиваленте на всю поверхность тела. Около 30% работников имеют накопленную дозу менее 100 мЗв. Результаты биодозиметрии альфа-излучения имеются у трети исследуемой когорты, средняя величина накопленной дозы от плутония на печень составила около 0.25 Гр, причем 67% исследуемой когорты имеет накопленную дозу от альфа-излучения менее 100 мГр.

В структуре смертности от солидных злокачественных новообразований как у мужчин, так и у женщин преобладают опухоли органов пищеварения (более 35%), среди которых превалируют опухоли желудка. Структура смертности в исследуемой когорте от злокачественных новообразований органов пищеварительной системы по основным локализациям представлена в табл. 1.

Как видно из табл. 1, имеются некоторые различия в структуре онкологической смертности в зависимости от пола, но превалирующей локализацией как у мужчин, так и у женщин является желудок.

Оценка вклада ионизирующего излучения в смертность от рака органов пищеварения у персонала возможна путем сравнения групп с наличием и отсутствием исследуемого фактора. Одним из спосо-

Таблица 1

**Структура смертности от злокачественных новообразований  
органов пищеварения**

Локализация	Мужчины	%	Женщины	%	Всего
Пищевод	53	6.6	8	3.2	61
Тонкая кишка	2	0.3	2	0.8	4
Печень	61	7.7	33	13.3	94
Желчный пузырь	18	2.3	15	6.0	33
Поджелудочная железа	96	12.0	24	9.6	120
Толстая кишка	101	12.7	47	18.9	148
Прямая кишка	100	12.5	39	15.7	139
Брюшина	4	0.5	2	0.8	6
Неизвестно	5	0.6	0	0.0	5
Всего	797	100	249	100	1046

бов решения данной проблемы в когортном исследовании является использование внутреннего контроля.

Для анализа радиационного риска была смоделирована так называемая «фоновая» смертность в когорте, показатели смертности были стандартизованы по полу и возрасту, протабулированы в многомерную таблицу с помощью специализированного программного пакета Amfit Epicure [4]. В модели фоновой смертности также учтены такие важные нерадиационные факторы, как возраст когорты, курение и прием алкоголя в течение жизни. На основании модели фоновой смертности и фактического показателя смертности получены оценки радиационного риска для выбранной группы злокачественных новообразований.

В ходе анализа установлено, что в отношении органов пищеварения как группы имеется достоверный избыток относительного риска по сравнению с фоновым показателем для внешнего гамма- и внутреннего альфа-излучения. Избыточный относительный риск на единицу дозы внешнего излучения составил 0.16 (95% ДИ 0.06, 0.28). ИОР на единицу дозы внутреннего излучения – 0.44 (95% ДИ 0.21, 0.75).

Количество фактических, рассчитанных в модели, «фоновых» и «избыточных» случаев смерти от рака органов пищеварения в исследуемой когорте, а также коэффициент ИОР на единицу дозы соответствующего типа излучения с ДИ 95% представлено в табл. 2.

Поскольку известно, что плутоний, поступающий в организм ингаляционным путем, избирательно депонируется в органах и тканях [5], то для сравнения выполнен анализ, в котором из исследуемой группы исключены все случаи рака печени. Установлено, что для всех органов пищеварения, за исключением печени, воздействие внешнего гамма-излучения достоверно влияет на избыток смертности от рака, тогда как достоверного влияния дозы внутреннего альфа-излучения, накопленной органами пищеварения, не выявлено. Коэффициент ИОР для дозы внешнего излучения составил 0.14 (95% ДИ 0.04, 0.26).

Таблица 2

**Фактическое, фоновое и избыточное число случаев и коэффициент ИОР, рассчитанные в модели**

Фактических случаев	Моделированных случаев	Фон	Избыток			ИОР/Зв от внешнего излучения	ИОР/Гр от внутреннего излучения
			от внешнего излучения	от внутреннего излучения	общий		
1046.0	1046.0	921.8	96.0	28.2	124.2	0.16 (0.06, 0.28)	0.44 (0.21, 0.75)

При сравнении результатов анализа, полученных с использованием линейной, линейно-квадратичной и квадратичной моделей зависимости ИОР от дозы, установлено, что наиболее устойчивые показатели (с наименьшими дисперсией и шириной 95% ДИ) характерны для линейной модели.

Таким образом, проведенный анализ линейной зависимости избыточного относительного риска смерти от рака органов пищеварения дает основания заключить, что избыточный относительный риск от внутреннего альфа-излучения для органов пищеварения связан в основном с возникновением рака печени, как органа основного депонирования плутония-239. Для остальных органов пищеварения воздействие внутреннего альфа-излучения не играет такой существенной роли и не приводит к достоверному увеличению риска, в то время как воздействие внешнего гаммаизлучения является значимым фактором в возникновении злокачественных новообразований для всех органов желудочно-кишечного тракта. Простая экстраполяция оценочного значения ИОР/Гр в область малых доз имеет известные ограничения в связи с высокой неопределенностью непараметрических оценок коэффициента риска в области доз менее 0.3 Гр.

#### Литература

1. Кошурникова Н.А., Окатенко П.В., Шильникова Н.С., Престон Д. Риск лейкемии при профессиональном внешнем хроническом гамма-облучении // Вопросы радиационной безопасности, 1996. № 1. С. 50-53.
2. Кошурникова Н.А., Шильникова Н.С., Окатенко П.В. и др. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности, 1998. Ч. 1. № 2. С. 46-55.
3. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G. et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of Internal Dose from Measurement Results of Plutonium Activity in Urine, 2013. Vol. 104. Issue 4. P. 366-378.
4. Preston D. Epicure User's Guide. USA, 1993. 330 p.
5. Сокольников М.Э. Оценка канцерогенного риска в органах основного депонирования плутония-239 при ингаляционном поступлении промышленных соединений радионуклида (эпидемиологическое исследование): Дис. ... докт. мед. наук. М., 2005. С. 57-58.

#### ASSESSMENT OF THE DEATH RISK FROM DIGESTIVE APPARATUS CANCER IN WORKERS EXPOSED WITH COMBINED CHRONIC IRRADIATION

M.V. Osipov

South-Urals Institute of Biophysics, Ozersk, Russia, [ferrum76@mail.ru](mailto:ferrum76@mail.ru)

The radiation risk analyses of digestive tract cancer mortality in a cohort study of "Mayak" personnel exposed to chronic professional gamma and alpha emitted radiation has performed. The risk of digestive tract cancer mortality

was significantly increased due to external and internal radiation. After excluding of liver cancer deaths from the analyses, the excess relative risk (ERR) per 1 Gy induced by internal radiation became insignificant. Risk assessment in a low dose area by extrapolation of linear model has its known limitations because of wide confidence intervals.

---

## **РАДИАЦИОННЫЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ В ФОРМИРОВАНИИ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ ЗОНЫ ГАРАНТИРОВАННОГО ДОБРОВОЛЬНОГО ОТСЕЛЕНИЯ**

**В.А. Прилипко, Ю.Ю. Озерова, А.А. Петриченко, К.К. Шевченко**  
Национальный научный центр радиационной медицины НАМНУ,  
Киев, Украина, basepril@i.ua

Аварии на АЭС – одни из наиболее опасных видов экологических катастроф. Учитывая тенденцию роста удельного веса ядерной энергетики, изучение медико-биологических и социальных последствий крупномасштабной радиационной аварии на ЧАЭС является и будет оставаться актуальной проблемой. Оптимизация социальной политики ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы на государственном уровне основывается на социально-гигиенических мониторинговых исследованиях условий жизнедеятельности пострадавшего населения [1-4]. Детальный анализ полученных данных в динамике позволяет разработать и предложить коррекционно-опережающие управленческие меры, направленные на сохранение здоровья населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях.

Цель данного исследования – изучение влияния факторов условий жизнедеятельности населения зоны гарантированного добровольного отселения на формирование здоровья в отдаленный период аварии.

Объектом социально-гигиенических мониторинговых исследований в динамике 2000-2010 гг. стали условия проживания населения Овручского (зона гарантированного добровольного отселения) и Андрушевского (условно чистая территория УЧТ) районов Житомирской области. При проведении работ были использованы социологические, социально-гигиенические, психодиагностические, математические и статистические методы. Все исследования проводились с периодичностью два-три года в летний период среди сельского трудоспособного населения с применением одинаковых методик. Дозы облучения населения Овручского района (в терминах средней эффективной дозы), накопленные в 1986-1995 гг., составляют от 6.4 до 85 мЗв/год, в 1996-2008 гг. – от 1.8 до 30 мЗв/год. При

проведении социологического опроса выборочные совокупности рассчитывались в динамике исследований 1999-2010 гг., исходя из общей численности населения в каждом отдельном случае. Допустимая ошибка выборки составила 0.035-0.060. На всех этапах мониторинга применялся программный пакет математической статистики.

Большинство населения зоны гарантированного добровольного отселения (ЗГДО) считает экологическую ситуацию по месту жительства неблагоприятной (59.7% опрошенных), что обусловлено радиоактивным и химическим загрязнением почвы (65.0%), продуктов питания (62.3), питьевой воды (61.7). В группе респондентов, считающих экологическую ситуацию крайне неблагоприятной, наибольший процент тех, кто считает радиационную ситуацию опасной для здоровья (68.2%). При этом 18.2% населения испытывает тревогу, потому что не владеет информацией по проблеме в полной мере, а в целом испытывает тревогу 13.6%.

Убеждение населения в опасности радиационного фактора базируется на традиционной обеспокоенности, а не на информированности по этому вопросу. По данным мониторинговых исследований Овручской санитарно-эпидемиологической станции (СЭС), в населенных пунктах, где проводился опрос населения, наибольшую опасность внутреннего облучения составляют следующие группы продуктов питания: свежие лесные ягоды, свежие грибы, черника сушеная, сушеные грибы, мясо диких животных. В пробах воды хозяйственного назначения содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  находится в пределах ДГН (ДУ-2006).

Качество питьевой воды в Овручском районе ухудшается. Количество источников централизованного водоснабжения в динамике 2000-2010 гг. уменьшилось до 78.6%, децентрализованного – до 51.7% за счет уменьшения количества артезианских колодцев. Это объясняется постепенным закрытием источников водоснабжения из-за невозможности поддержания их коммунальными службами в надлежащем состоянии по экономическим причинам.

Экологическая обеспокоенность населения также вызвана изменениями, происходящими в окружающей среде, в частности: изменение климата и, как следствие, – в животном и растительном мире. Снижение плодородия почвы; обмеление водоемов и их заболочивание, химическое загрязнение почвы и воды ядохимикатами, исчезновение отдельных видов птиц, рыб, животных и растений – это факторы, которые вызывают обеспокоенность населения относительно будущего.

Среди социальных факторов, влияющих на формирование здоровья, важно учитывать качество оказания медицинской помощи населению, проживающему в ЗГДО. По данным официальной от-

четности Минздрава Украины, за последние десять лет система предоставления медико-профилактической помощи сохраняет свою структуру. На фоне некоторого улучшения финансового обеспечения существуют кадровые проблемы – недостаток врачей и младшего персонала. Индекс удовлетворенности работой медицинских учреждений, по данным социологических опросов, стремительно снизился за последнее десятилетие. Наибольшие жалобы у населения вызывает недостаточное обеспечение необходимыми лекарствами и диагностическим оборудованием, в частности, кабинетов в поликлиниках. По оценкам экспертов, реализация Общегосударственной программы преодоления последствий Чернобыльской катастрофы за 2006-2010 гг., в частности, медицинская составляющая, была оценена только в 38 баллов из 100 возможных. Основные замечания относятся к материально-техническому обеспечению, приобретению лечебно-диагностического оборудования (18 баллов) и лекарственных средств (36 из 100 возможных).

Состояние здоровья населения по самооценкам и результатам психодиагностического тестирования улучшается. Психическое состояние здоровья населения ЗГДО, исходя из средних показателей GHQ 28 (шкала соматизации, тревоги, социальной дисфункции и депрессии), имеет тенденцию к улучшению в динамике 1999-2010 гг., а в 2008-2010 гг. достоверно не отличается от психического состояния здоровья населения УЧТ. Но индексы физического здоровья, рассчитанные по результатам самооценок населения, на территории ЗГДО достоверно ниже, чем на УЧТ.

Анализ первичной заболеваемости (на 100 тыс. населения) в Овручском и Андрушевском районах Житомирской области позволил выделить из 13 классов семь основных, которые, по данным структурного анализа, составляли 98-99% всей первичной заболеваемости. Наибольший удельный вес в структуре заболеваемости имели болезни органов дыхания, пищеварения, опорно-двигательного аппарата (ОДА), болезни нервной и сердечно-сосудистой систем (ССС), расстройства психики и поведения, злокачественные новообразования.

Динамические изменения в структуре первичной заболеваемости в 2008 г. относительно 2001 г. свидетельствуют об увеличении их доли в структуре соответственно на 16 (Овручский р-н) и 6% (Андрушевский р-н). Относительный риск общей кумулятивной заболеваемости (без болезней органов дыхания) составил 1.713 (см. таблицу), что свидетельствует о высоком риске заболеваемости по основным классам и указывает на важность регулирующей роли и функционального состояния ЦНС, а в дальнейшем – развитии психоневрологических и соматических заболеваний.



## Относительный риск общей кумулятивной заболеваемости

Заболевания	Относительный кумулятивный риск (за 2001-2008 гг.)	95%-ный доверительный интервал (ДИ) относительного кумулятивного риска	
		Нижняя граница	Верхняя граница
Нервной системы	4.0549	3.7897877*	4.33857533
Опорно-двигательного аппарата	2.2703	2.1790522*	2.36536149
Сердечно-сосудистые	1.595	1.514*	1.680
Органов пищеварения	1.2830	1.514*	1.268
Расстройства психики и поведения	1.1846	1.106*	1.268
Злокачественные новообразования	0.9080	0.8296926	0.99372765
Общая кумулятивная заболеваемость (без болезней органов дыхания)	1.713	1.687	1.740

*Примечание.* \* Доверительный интервал, значимый при  $p < 0.05$ .

Проблема формирования и поддержания здоровья носит выраженный комплексный характер. Социально-гигиенические исследования свидетельствуют, что параллельно с радиационным фактором не менее важным является социально-психологический фактор условий жизнедеятельности в формировании здоровья населения ЗГДО. Проблема сохранения здоровья должна решаться комплексно, а именно с решением широкого круга экологических, социальных, экономических и научных вопросов, определяющих воздействие разных факторов на формирование здоровья населения. Эти вопросы могут решаться только совместными скоординированными усилиями государственных институтов, общественных организаций и отдельных индивидуумов.

Предлагается повысить эффективность использования существующих возможностей сети лечебных учреждений, практических разработок Центров социально-психологической реабилитации для распространения существующего опыта и информации по проблеме последствий аварии на ЧАЭС и об экономической целесообразности и необходимости образа жизни, направленного на сохранение здоровья.

## Литература

1. Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього. К.: КІМ, 2011. С. 192-201.
2. Дорощенко В.Н., Колмогорцев Л.К., Федоров В.Ф. Основные направления работы учреждений здравоохранения в Брянской области по минимизации медицинских последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС //

Экологическая антропология. Минск: Белорусский комитет «Дзеці Чарнобыля», 2007. С. 91-93.

3. *Прилипко В.А., Озерова Ю.Ю.* Соціальна поведінка, орієнтації та здоров'я населення на радіоактивно забруднених територіях // Демографія та соціальна економіка, 2011. № 2 (16). С. 19-30.

4. *Саєнко Ю.* Соціальне усвідомлення Чорнобиля // Чорнобиль і соціум. К., 2006. Вип. 12. С. 113-132.

### **RADIATION, ENVIRONMENTAL AND SOCIAL FACTORS IN THE FORMATION OF PUBLIC HEALTH OF THE GUARANTEED VOLUNTARY RESETTLEMENT ZONE**

**V.A. Prilipko, Iu.Iu. Ozerova, A.A. Petrychenko, K.K. Shevchenko**  
National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy  
of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, basepril@i.ua

The analysis and evaluation of these monitoring studies in the dynamics of the years 1999-2010 on the impact of radiation, environmental and social factors on the health of the population of the guaranteed voluntary resettlement zone. Set at a high level of public concern about the impact of the studied factors on the state of their health. The relative risk of overall cumulative incidence, without disease of the respiratory system, was 1.713, indicating a high risk of morbidity main classes and indicates the importance of the regulatory role and function of the central nervous system in the future development of neuropsychiatric and somatic diseases.

### **ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ МЫШЕЙ ПРИ РАЗДЕЛЬНОМ И СОЧЕТАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В МАЛЫХ ДОЗАХ ФИТОЭКДИСТЕРОИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И СТРЕССОВЫХ ФАКТОРОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ**

**А.В. Пыстина<sup>1</sup>, А.Г. Кудяшева<sup>2</sup>, Володина С.О.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар, Россия,  
[nastik\\_pystik@mail.ru](mailto:nastik_pystik@mail.ru)

<sup>2</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

Исследование биологически активных веществ растительного происхождения перспективно в плане применения их в качестве пищевых добавок, способных повышать общую неспецифическую реакцию организма, стимулируя защитные реакции организма при действии стрессовых факторов разной природы. Издавна настойки, отвары из листьев и корней растений употребляли как средства, устраняющие усталость и повышающие работоспособность. Исследования показали, что использование адаптогенов приводит к повышению неспецифической резистентности организма при действии

неблагоприятных факторов среды, вызывая состояние неспецифически повышенной сопротивляемости [3]. Проведенный массовый скрининг растений европейского северо-востока России в конце 1990-х гг. в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН показал, что наиболее перспективным сырьем для выделения адаптогенов из класса фитоэктистероидов является серпуха венценосная (*Serratula coronata* L.) [9]. Результаты второго международного совещания по фитоэктистероидам в Сыктывкаре свидетельствуют о значительных успехах изучения фармакологических свойств исследуемых соединений, демонстрирующих противолучевое, гематопротекторное, стресс-протекторное, нейротропное, противодиабетическое и т.д. действия эктистероидсодержащей субстанции Серпистен [1]. Однако, несмотря на многочисленность проведенных исследований, изучение эктистероидного препарата, полученного из наземных частей серпухи венценосной, требует дальнейшего продолжения из-за недостаточности сведений в отношении проявления его биологической активности, адаптогенных и системных механизмов его действия. Одним из главных стимулирующих систем при комплексном действии адаптогенов на организм является центральная нервная система (ЦНС). Механизмы действия фитоэктистероидного препарата, полученного из серпухи венценосной (*Serratula coronate* L.), на функции центральной нервной системы до конца еще не выяснены. Наиболее информативные показатели состояния ЦНС – поведенческие реакции организма животных.

Задача исследований – изучение влияния отдельного и сочетанного действия фитоэктистероидной субстанции Серпистен, БАД серпуха венценосная и стрессовых факторов разной природы на поведенческие реакции мышей.

При изучении поведенческих реакций мышей были проведены четыре серии экспериментов, в которых использовали 231 половозрелую лабораторную мышь, из них 52 особи были инбредной линии СВА/Лас. В первом эксперименте изучали влияние разных доз (0.5, 5 и 50 мг/кг) Серпистена на организм беспородных мышей. Опытным группам мышей питьевую воду заменяли раствором Серпистена. Расчет доз проводили с учетом массы животных и объема потребляемой ими жидкости. Во втором эксперименте изучали раздельное и сочетанное действие Серпистена в дозах 5 и 15 мг/кг и стрессовых факторов физической природы (гипокинезия и холод в течение 2 ч при температуре  $-4...-6$  °С) у беспородных мышей. В третьем эксперименте изучали поведенческие тесты у мышей СВА/Лас в условиях раздельного и сочетанного действия Серпистена в дозе 15 мг/кг и стресса ( $\gamma$ -облучение + Серпистен или Серпистен +  $\gamma$ -облучение). Облучение животных осуществляли источниками  $\gamma$ -излучения, содержащими  $^{226}\text{Ra}$ , находящимися на расстоянии 2.5 м от клеток с мышами. Средняя мощность дозы составляла 40 мР/ч.

Мощность дозы измеряли радиометром поверенным ДКГ-02У. Суммарная поглощенная доза составляла  $7.5 \pm 1.8$  сГр и ее определяли с помощью индивидуальных дозиметров (DTU-1) при помощи установки ДВГ-02ТМ. В четвертом эксперименте были использованы белые беспородные мыши (опыт № 1 – трехмесячные самцы, № 2 – четырех-пятимесячные самки, № 3 – восьмимесячные старые самки). Мыши употребляли в качестве пищевой добавки кашу в течение 14 сут., в которую добавляли измельченную сухую траву – серпуху венценосную (БАД). Добавка серпухи венценосной к каше составляла 0.5% в зависимости от массы животных. Поведенческие реакции мышей проводили до и после воздействия Серпистена, биологически активной добавки серпухи венценосной и стрессовых воздействий разной природы. Поведенческие реакции оценивали по двум тестам: «Открытое поле» [5], Т-образный лабиринт [8]. В тесте «Открытое поле» у мышей определяли количество болюсов дефекаций, пересеченных квадратов, стоек, заглядываний в норки, актов груминга. Для изучения сложных форм поведения животных, позволяющих изучать как вопросы, связанные непосредственно со способностью животных к обучению, так и вопросы пространственной ориентации, памяти использован метод лабиринта. Полученные данные подвергнуты стандартной статистической обработке. Достоверность различий оценивали по t-критерию Стьюдента [4].

Результаты показали, что эффект Серпистена в значительной мере зависел от дозы препарата и вида животных. Результаты первого эксперимента в тесте «Открытое поле» в дозе 50 мг/кг показали достоверное увеличение горизонтальной и вертикальной и двигательной активности, а также достоверное снижение эмоциональности мышей. Наши результаты подтверждаются исследованиями Л.И. Андреевой, которые показали, что действие Серпистена в дозе 12 мг/кг на поведенческие реакции крыс Вистар приводит к активизации горизонтальной двигательной активности животных и заметному увеличению исследовательской активности крыс [2]. В третьем эксперименте у исследуемого вида мышей СВА/1ас курсовое введение Серпистена в дозе 15 мг/кг выявлены противоположные по своей направленности поведенческие реакции в отличие от реакции поведения белых беспородных мышей, свидетельствующие о видовых различиях исследуемых животных, что подтверждается также данными других исследователей [6].

При раздельном действии Серпистена в дозах 0.5 и 5.0 мг/кг исследование ориентировочно-исследовательской активности показало уменьшение времени пребывания мышей в лабиринте ( $p > 0.05$  и 0.1 соответственно), что указывает на повышение тонуса и активности центральной нервной системы, стимулирование ориентировочно-исследовательской реакции и памяти, выражающиеся в ак-

тивизации поиска, быстром запоминании маршрута и ускорении нахождения выхода из лабиринта мышами. У белых беспородных мышей (эксперимент № 1) после воздействия Серпистена среднее время нахождения выхода из лабиринта (0.5 и 15.0 мг/кг) меньше, чем у линейных мышей СВА. По скорости решения поисковой задачи исходно мыши СВА уступают белым беспородным мышам, что доказывает зависимость поведенческих реакций от вида животных и дозы исследуемого соединения. Это свидетельствует о том, что психотропное действие Серпистена наиболее выражено у белых беспородных мышей и слабо проявлялось у мышей СВА, что ранее было показано в работах Л.Д. Пчеленко с соавт. [6, 7]. Полученные результаты обнаруживают способность белых беспородных мышей к обучению, развитию памяти и пространственной ориентации.

Использование БАД в малых дозах в виде пищевой добавки (0.5% от массы животных) в течение 14 сут. показало, что принятие с пищей серпухи венценосной оказывает положительное влияние на поведенческие реакции мышей. Установлено, что изучение поведенческих реакций и других показателей следует проводить на половозрелых самцах, так как самки оказались более лабильными по исследуемым параметрам. Обнаруженные эффекты действия субстанции Серпистен на поведенческие реакции мышей были наиболее выражены, чем при использовании в качестве пищевой добавки БАД серпуха венценосная. Показаны эффекты поведенческих реакций в зависимости от дозы, длительности применения субстанции и пола животных.

Результаты эксперимента по раздельному и сочетанному действию стресса (иммобилизация + холод) и Серпистена в дозах 5 и 15 мг/кг на поведенческие реакции мышей показали, что в тесте «Открытое поле» при сочетанном действии стресса и Серпистена в дозе 5 мг/кг существенно увеличилась горизонтальная двигательная активность ( $p > 0.05$ ). В группе мышей, принимавшей Серпистен в дозе 5 мг/кг + стресс, установлено, что количество заглядываний в норки снизилось в пять раз ( $p > 0.001$ ) по сравнению с контрольной группой мышей, которые также подвергались стрессовому воздействию. Акты груминга и болюсы дефекаций после сочетанного курсового принятия Серпистена в разных дозах (5 и 15 мг/кг) и воздействия стресса во всех группах практически исчезли, что указывает на более спокойное поведение животных, снижение их эмоциональности и тревожности. Следовательно, обнаруженные изменения поведенческой активности у мышей усиливаются после стресса на фоне введения Серпистена. Аналогичные изменения поведенческих реакций были установлены у крыс в экспериментах при тепловом стрессе на фоне введения Серпистена в дозе 12 мг/кг и в условиях, имитирующих факторы севера при дозе 30 мг/кг.

Результаты Т-образного лабиринта показали статистически значимые изменения во времени выхода из него после действия стресса (гипокинезия и холод) и Серпистена только в группе животных, принимавших Серпистен в дозе 5 мг/кг (время сократилось в 1.5 раза). Следовательно, на фоне действия стресса и потребления Серпистена мышами в дозе 5 мг/кг отмечали более выраженные эффекты в исследовательской способности подопытных животных.

В третьем эксперименте действие одного гамма-излучения в низкой дозе (7.5 сГр) по сравнению с контролем не выявило различий поведенческих реакций мышей СВА в тесте «Открытое поле». При сочетанном (терапевтическом и профилактическом) кратковременном действии гамма-облучения в малых дозах (7.5 сГр) и Серпистена (7 сут.) на организм лабораторных мышей обнаружены наиболее значимые изменения в поведении животных по таким показателям, как горизонтальная, вертикальная и исследовательская активность. Выявленные изменения поведенческой активности у мышей усиливаются на фоне введения Серпистена как до, так и после облучения животных. Серпистен, введенный мышам в совокупности со стрессом (до или после облучения), перекрывает влияние гамма-облучения в малой дозе, даже несмотря на кратковременное действие Серпистена в малой концентрации. Кратковременное облучение мышей СВА в дозе 7.5 сГр привело к достоверному снижению времени выхода из лабиринта животных ( $p < 0.1$ ). При сочетанном (терапевтическом и профилактическом) действии Серпистена отмечали лишь тенденцию к повышению времени выхода мышей из лабиринта по сравнению с группой облученных животных.

В целом, по результатам проведенных экспериментов установлено, что действие Серпистена на поведенческие реакции животных зависит от дозы препарата, силы стрессового воздействия и эффекта сочетанного действия Серпистена и стресса. Использование Серпистена в малых дозах на фоне действия стресса уменьшает силу стрессовых факторов физической природы и способствует адаптации организма к дополнительным воздействиям.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Программы Президиума РАН (проект № 12-П-4-1023).

### Литература

1. Ашихмина Т.Я. Второе международное совещание по фитостероидам (4-7 июля 2010 г., Сыктывкар, Россия) // Теоретическая и прикладная экология, 2012. № 1. С. 4-5.
2. Воздействие нового экистероидсодержащего препарата Серпистен на поведенческую активность и формирование клеточной адаптации у крыс при тепловом стрессе / Л.И. Андреева, А.А. Бойкова, В.В. Володин и др. // Теоретическая и прикладная экология, 2012. № 1. С. 36-42.

3. Лазарев Н.В., Люблина Е.И., Розин М.А. Состояние неспецифически повышенной сопротивляемости // Пат. физиол. и эксперим. терапия, 1959. Т. 3. Вып. 4. С. 16-21.

4. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 293 с.

5. Пошивалов В.П. Этологический атлас для фармакологических исследований на лабораторных грызунах. М., 1978. 43 с. (Деп. в ВИНТИИ, № 3164-78).

6. Пчеленко Л.Д. Адаптогенный эффект экидистероидов серпухи венценосной // Радиоэкологические и биологические последствия низкоинтенсивных воздействий. Сыктывкар, 2003. С. 293-301. (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 172).

7. Пчеленко Л.Д., Метелкина Л.Г., Володина С.О. Адаптогенный эффект экидистероидсодержащей фракции *Serratula coronata* L. // Химия раст. сырья, 2002. № 1. С. 69-80.

8. Уждавину Э.Р. Групповые отношения животных. Л.: Наука, 1980. 145 с.

9. Фитоэкидистероиды / Под ред. В.В. Володина. СПб.: Наука, 2003. 293 с.

**MICES' REACTION ON SEPARATE AND COMBINED INFLUENCE  
OF SMALL DOSES FITOEKDISTEROIDS COMPOUNDS,  
AND STRESS FACTORS PHYSICAL NATURE**

**A.V. Pystina <sup>1</sup>, A.G. Kudyasheva <sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Syktyvkarsky State University

<sup>2</sup> Institute of Biology, Komi Science Centre, Syktyvkar, Russia,  
[nastik\\_pystik@mail.ru](mailto:nastik_pystik@mail.ru)

Behavioral reactions of mice in tests of «Open field», «T-shaped maze,» at separate and combined action of Serpisten, biologically active additive of *Serratula coronata* and factors of different nature in small doses ( $\gamma$ -irradiation, hypokinesia and cold) are studied. It was found that the use Serpisten in small doses on the background of stress factors reduces the force of impact and contributes the organism adaptation of to the additional loads.

**РИСКИ РАЗВИТИЯ АТРОФИЧЕСКОГО ГАСТРИТА  
У РАБОТНИКОВ ПО «МАЯК»:  
РАДИАЦИОННЫЕ И НЕРАДИАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ**

**Е.И. Рабинович, В.Ф. Обеснюк**

Южно-Уральский институт биофизики, Озерск, Россия,  
[v-f-o@newmail.ru](mailto:v-f-o@newmail.ru)

Желудочный канцерогенез характеризуется каскадом изменений от хронического гастрита до формирования атрофии слизистой оболочки желудка (СОЖ). Известно, что атрофический гастрит, как

правило, – результат длительной персистенции инфекции *Helicobacter pylori* (*H. pylori*). При этом атрофия СОЖ представляет собой наиболее важный независимый фактор риска аденокарциномы желудка и, следовательно, является пренеопластическим состоянием, особенно при развитии кишечной метаплазии и дисплазии. Известна мультифакторная природа заболеваний желудка. Как правило, факторы, способные повлиять на показатель заболеваемости популяции, известны и контролируются в процессе исследования, однако их относительная роль должна быть установлена. Корректному выявлению статистической роли таких факторов обычно мешают их коррелированная взаимная изменчивость, стохастичность, значительная внутривнутрипопуляционная биологическая вариабельность переменных состояния здоровья. Но самое главное – большой объем таблиц с результатами наблюдения каждого человека по всем его контролируемым индивидуальным показателям. Тогда актуальными могут стать методы «data mining», т.е. специальные математические методы извлечения знаний из данных. Ранее было показано двукратное увеличение частоты хронического гастрита у работников ПО «Маяк», подвергшихся сверхнормативному радиационному воздействию [2]. Сведения о распространенности атрофического гастрита у профессиональных работников радиационно-опасных предприятий в условиях штатного режима и облучения в малых дозах (менее 10 сГр) отсутствуют.

Цель настоящего исследования – установление коррелятивных связей между распространенностью предраковых заболеваний желудка и факторами радиационной и нерадиационной природы у ограниченной выборки лиц контингента ПО «Маяк» и населения. Многофакторному анализу были подвергнуты результаты селективного скрининга состояния желудка.

Общая численность выборки составила 684 чел. и включала представителей некоторых основных и вспомогательных подразделений ПО «МАЯК», а также группу жителей г. Озерска, не имевших контактов с производственным процессом на градообразующем предприятии. В выборку включали лиц не моложе 40 лет без ограничения по полу, этнической принадлежности, давших письменное согласие на участие в обследовании. Диапазон техногенных доз внешнего гамма-облучения колебался от 0 до 46 сГр, а содержание плутония – до 41 нКи для основной части выборки.

Скрининг заболеваний желудка был проведен с использованием неинвазивного высокотехнологичного метода, включающего определение в сыворотке крови биомаркеров морфофункционального состояния СОЖ: пепсиногена 1 (ПГ 1), гастрин-17 (Г-17), антител к *H. pylori*. Такой подход к оценке состояния СОЖ зарекомендовал себя как надежный метод «серологической биопсии», позволяющий



выделить лиц с различными фенотипами гастрита (неатрофический и атрофический) и лиц без повреждения СОЖ [1]. Каждый представитель выборки по результатам скрининга был отнесен к одной из групп в соответствии с фенотипом гастрита: неатрофического гастрита (НГ) и атрофического гастрита (АГ), а также нормы (Норма).

Для математической обработки диагноз кодировался категориально-количественным показателем. В качестве переменных состояния фиксировались шесть количественных (возраст, накопленная доза гамма-облучения, содержание плутония в организме и три уже названных) и 12 категориальных показателей. Это пол, органические и неорганические соединения на рабочем месте, пыль, жалобы обследуемого, наличие заболеваний желудка до скрининга, наследственной предрасположенности к язвенной болезни или раку желудка у одного из родителей с учетом их пола, прием препаратов, повреждающих СОЖ (нестероидные противовоспалительные средства и антиагреганты), курение, употребление алкоголя.

Все табличные данные были представлены в виде индивидуальных векторов состояния в некотором многомерном пространстве. При этом до некоторой степени оказалось можно смешивать как категориальные, так и непрерывные переменные состояния, если категориальные переменные в описании преобладают, а модуль разности между их величинами можно математически трактовать в качестве «расстояния». Допустимо в качестве компонент-вектора использовать также зависимые переменные вместе с независимыми предикторами. Это позволило отследить корреляционные связи между ними. В дальнейшем исследовались разнообразные проекции облака полученной многомерной выборки на пространства меньшей размерности с целью выделения кластеров либо оценки характера изменчивости внутри обнаруженного кластера. Наличие кластеров позволяет идентифицировать детерминированные группы. Анализ протяженности проекции кластера позволяет найти тонкие стохастические или зашумленные детерминированные связи. В первую очередь должны исследоваться проекции на главные направления изменчивости наблюдений либо на заранее известные ведущие информативные направления. В последнем случае подход к анализу данных известен как метод главных направлений [4]. В данной работе он дополнялся однофакторными байесовскими оценками отношения частот в выделяемых группах сравнения с анализом статистической значимости различий по таблицам сопряженности [3, 5].

Распространенность в выборке целевого индикатора данного исследования – атрофического гастрита – была достоверно выше у персонала радиационно-опасного предприятия и составила 14.8%

(95% ДИ 11.8...18.5%); 7.7% (95% ДИ 4.41... 13.4%); 4.8% (95% ДИ 2.1...10.8%) для работников основных подразделений ПО «Маяк», вспомогательных подразделений ПО «Маяк» и городских организаций соответственно. Несмотря на то, что встречаемость атрофических гастритов среди персонала ПО «Маяк» достоверно выше, чем среди работников городских организаций, в выборке указанного объема статистически значимыми оказались преимущественно нерадиационные тренды. Наблюдалась неоднородность выборки как по независимым переменным состояниям (предикторам), так и по показателям состояния здоровья, непосредственно связанным с постановкой диагноза. Например, по предикторам можно указать, по крайней мере, два крупных кластера обследованных, отличающихся по производственному показателю, характеризующему наличие или отсутствие вредных неорганических материалов на рабочем месте наряду с источниками ионизирующей радиации.

Ряд статистически значимых (в пределах выборки) межгрупповых и внутригрупповых различий зафиксирован в таблице. Не все они указывают на возможную связь частоты гастритов с ионизирующей радиацией. При изучении сравнительно однородной подвыборки мужчин, работников основных производств ПО «Маяк», в возрасте от 58 до 62 лет, являвшихся носителями бактерии *H. pylori*, обнаружен радиационный тренд. Отношение доли атрофических гастритов тела желудка, ассоциированных с *H. pylori*, в группе лиц, облученных в дозе свыше 15 сГр (пять из 10), к аналогичной доле в

**Статистически достоверные различия,  
зафиксированные между группами риска**

Группы	Выборочное отношение рисков между группами (медиана и 90% ДИ)	Ошибка* I рода	Ошибка* II рода
Атрофический гастрит			
Ассоциированный с <i>H. pylori</i> ПО «МАЯК»/«город»	2.78 (1.48 ... 6.05)	5.6	6.5
Ассоциированный с <i>H. pylori</i> основные/вспомогательные	1.84 (1.05 ... 3.13)	11.9	12.9
Основные подразделения; фактор «наследственность»	2.27 (1.29 ... 3.56)	17.2	15.5
Основные заводы; фактор «неорганические соединения»	1.58 (1.04 ... 2.33)	20.9	19.8
Неатрофический и атрофический (основные заводы); фактор «гастрит до скрининга»	1.68 (1.08 ... 2.50)	19.3	18.2

*Примечание.* \* При условии касания доверительных интервалов для обеих гипотез в одной точке.

группе с дозами менее 15 сГр (пять из 44) составило 3.93 (по медиане; 90% ДИ: 1.75...9.11). Достигнутое значение  $p$ -value – 0.45%.

В области малых доз облучения (менее 10 сГр) влияние нерадиационных факторов на относительные показатели распространенности атрофического гастрита, вызванного *H. pylori*, значительно превышает влияние радиационных настолько, что выявление роли радиационного фактора скрининговыми методами было сильно затруднено. Этому мешают недостаточный объем выборки, естественная биологическая вариабельность изучаемого эффекта и большой разброс нерадиационных внешних факторов. Применение методов «data mining» позволило выполнить необходимое группирование наблюдений с учетом ведущих факторов риска при подготовке к многофакторному исследованию. Таблицы сопряженности в комбинации с методами группирования остаются убедительным инструментом поиска наличия или отсутствия статистической связи при однофакторном исследовании. Это позволило обнаружить значимое увеличение доли лиц с атрофическим гастритом тела желудка, ассоциированным с *H. pylori*, среди лиц, подвергшихся профессиональному облучению в дозе свыше 15 сГр.

#### Литература

1. Ваананен Х., Ваухконен М., Хэлске Т. и др. Неэндоскопическая диагностика атрофического гастрита на основании анализа крови: корреляция между результатами гистологического исследования желудка и уровнями гастрин-17 и пепсиногена 1 в сыворотке // Клини. персп. гастроэнтер. гепатол., 2003. № 4. С. 26-32.
2. Кабашева Н.Я. Клинико-морфологическая характеристика заболеваний желудка у больных хронической лучевой болезнью в отдаленном периоде и у работников радиохимического производства: Дис. ... канд. мед. наук. М., 1984.
3. Обеснюк В.Ф., Хромов-Борисов Н.Н. Интервальные оценки показателей сравнительного медико-биологического исследования // Актуальные проблемы современной науки: Сборник научных трудов с материалами X Международной телеконференции. Томск, 2013. Т. 2. Вып. 1. С. 154-156.
4. Jolliffe I.T. Principal Component Analysis. N.-Y.: Springer, 2002. 487 p.
5. Upton G.J.G. The Analysis of Cross-tabulated Data. N.-Y.: John Wiley & Sons, 1978. 160 p.

#### ATROPHIC GASTRITIS INCIDENCE RISKS IN PA «MAYAK»: RADIATION AND NON-RADIATION FACTORS

E.I. Rabinovich, V.F. Obesnyuk

South-Urals Institute of Biophysics, Ozersk, Russia, [v-f-o@newmail.ru](mailto:v-f-o@newmail.ru)

The role of radiation in stomach gastritis morbidity can be detected statistically significant by screening methods in a small dose range for almost

homogeneous group only. Non-radiation factors and the presence of the bacterium *H. pylori* predominate. A significant association with exposure to ionizing radiation is detected for a fraction of atrophic gastritis among all of gastritis.

---

## ПАРАДОКС «СЛОЖЕНИЯ РИСКОВ» ПРИ ОЦЕНКЕ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ГЕНОВ

**А.В. Рубанович**

Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва, Россия

При обработке данных ассоциативных генетических исследований часто используют так называемые «балльные» оценки генетического риска (gene risk score). Фактически в большинстве случаев в качестве таковых используют суммарное число «рисковых» аллелей для сайтов, обнаруживших сопряженность с признаком (заболеванием). Мы представляем ряд аналитических результатов, которые демонстрируют опасности, связанные с этим подходом.

Общеизвестно, что средний выборочный квадрат случайной корреляции двух несвязанных признаков имеет порядок  $1/n$ , где  $n$  – объем выборки. Этот результат несложно обобщить на следующую ситуацию. Пусть две выборки (больные и здоровые) одинакового объема  $n$  генотипированы по  $m$  полиморфным сайтам (генам, локусам и т.п.), которые никак не связаны с заболеванием. Для каждого сайта назовем «рисковым» аллелем тот, который в данном раскладе чаще встречается у больных. Далее для каждой особи посчитаем сумму «рисковых» аллелей и корреляцию этой суммы с заболеванием. Оказывается, что независимо от частоты минорных аллелей и размеров выборок эта корреляция будет столь угодно близка к 1, если число сайтов существенно больше объема выборки ( $m \gg n$ ):

$$r^2 = \frac{m}{m + \pi n}.$$

По нашему мнению, с описанным явлением сталкиваются многие исследователи, которые пытаются решить проблему «missing heritability» рассмотрением совместного действия большого числа локусов со слабыми эффектами.

## ОБ ОЦЕНКЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ РИСКА ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНЕ СТРОЯЩЕЙСЯ АЭС

**И.В. Салтанова, В.В. Скурат**

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –  
Сосны НАН Беларуси, Минск, Беларусь, [isaltanova@mail.ru](mailto:isaltanova@mail.ru)

Оценка взаимосвязи в системе «загрязнение окружающей среды–здоровье человека» является одной из ключевых задач экологии. Сложность этой задачи определяется многофакторностью путей влияния внешних воздействий окружающей среды на организм и многофакторностью ответных реакций в реальных экологических условиях.

К обстоятельствам, затрудняющим оценку взаимосвязей и интерпретацию последствий неблагоприятного воздействия загрязнений окружающей среды на организм, относятся: проявление неаддитивных эффектов при одновременном действии нескольких вредных загрязнителей (загрязнителей различной природы); возможность парадоксальных эффектов малых доз; особенности ответных реакций организма, которые могут зависеть от возраста, пола, исходного состояния здоровья, повышенной чувствительности к действию отдельных экологических факторов, повышенной избирательной резистентности организма, генетической предрасположенности; погрешности медицинской статистики; несовершенство систем и методов экологического мониторинга и др.

Дополнительно затрудняет оценку взаимосвязей «окружающая среда–здоровье человека» использование для этих целей понятия ПДК (предельной допустимой концентрации). Часто возникают ситуации, когда невозможно установить точный состав загрязняющих веществ и предсказать при этом возникновение новых соединений с неизвестными свойствами. Для многих вредных веществ, загрязняющих окружающую среду, вообще не установлены ПДК.

Указанные обстоятельства побуждают обратиться к современной концепции оценки риска для здоровья, которая находит все более широкое применение в исследованиях взаимосвязи «окружающая среда–здоровье». Здесь под риском необходимо понимать количественное выражение негативных последствий конкретной, опасной для человека деятельности, которое оценивается численным параметром, определяемым с учетом вероятности действительного наступления этих негативных последствий, т.е., проще говоря, вероятность возникновения неблагоприятных последствий для здоровья человека при воздействии на него внешних неблагоприятных факторов окружающей среды.

Важным моментом в данной концепции является то, что постоянное присутствие вредных веществ в окружающей среде даже в малых концентрациях (в том числе ниже ПДК), как и только потенциально опасных, всегда создает некоторую степень реального риска для здоровья человека.

Методология оценки риска предусматривает в ряде случаев дифференцированный подход в отношении опасности канцерогенных и неканцерогенных веществ окружающей среды и базируется на современных научных представлениях о механизмах действия канцерогенов. При этом берется в расчет, что оценка риска канцерогенных соединений не может основываться на величинах пороговых доз и концентраций, поскольку известно, что даже небольшое число молекул химического вещества способно вызвать в отдельной клетке неконтролируемую клеточную пролиферацию и развитие в отдаленном периоде злокачественного новообразования.

Применение такого подхода позволяет определять потенциально опасные факторы окружающей среды и величину экологического риска для здоровья человека и их взаимосвязь, а также прогнозировать нарушения здоровья населения вследствие загрязнения окружающей среды.

В представленной работе используются методологические подходы, разработанные на основе собственных результатов исследований и международных рекомендаций, к обработке и анализу данных мониторинга состояния окружающей среды для оценки риска неблагоприятных экологических последствий, в том числе и в районе расположения строящейся АЭС.

Исследованы факторы загрязнения окружающей среды радиационной и нерадиационной природы в районе строящейся АЭС, которые могут оказать негативное воздействие на здоровье человека.

Произведен анализ результатов прогнозных оценок по возможному загрязнению окружающей среды от радиоактивных газоаэрозольных выбросов при нормальной эксплуатации АЭС ВВЭР-1200 (2 энергоблока), полученных при выполнении работ по изучению гидрометеорологии и аэрологии, радиологии, экологии, условий землепользования, условий технического водоснабжения из природного источника при размещении АЭС на Островецкой площадке.

Выявлено, что максимальное поверхностное загрязнение почв радионуклидами в первый год эксплуатации АЭС не превысит  $0.144 \text{ Бк/м}^2$  ( $3.89 \cdot 10^{-6} \text{ Ки/км}^2$ ). В конце 60-летней эксплуатации АЭС максимальное загрязнение почвы возрастет до  $1.67 \text{ Бк/м}^2$  ( $4.5 \cdot 10^{-5} \text{ Ки/км}^2$ ).

Анализ данных по эффективным годовым дозам внешнего и внутреннего облучения населения от газоаэрозольных выбросов с АЭС

ВВЭР-1200 в пятне максимального загрязнения в районе строящейся АЭС показал, что для критической группы населения доля внешнего облучения от дозы первого года эксплуатации составляет 27%, ингаляции – 0.02 и потребления «загрязненных» продуктов питания – 73%. Среди рассмотренных радионуклидов наибольший вклад в эффективную дозу по рассматриваемым путям воздействия вносят: внешнее облучение – Kr-88, Xe-133, Xe-135, Rb-88, Cs-134, Cs-137; облучение от поступления в организм радионуклидов с вдыхаемым воздухом – Cs-134, Cs-137; облучение от поступления в организм радионуклидов с «загрязненными» продуктами питания – Cs-134, Cs-137, I-131, Co-60, Mo-99.

Результаты эксперимента по измерению объемной активности радиоактивных аэрозолей в пробах атмосферного воздуха в районе строительства АЭС, свидетельствуют о том, что концентрации радиоактивных аэрозолей в воздухе практически соответствуют естественному радиационному фону.

Выполнен расчет поля максимальных приземных концентраций вредных веществ, выбрасываемых точечными стационарными источниками предприятий г.п. Островец при наиболее неблагоприятных погодных-климатических условиях. Установлено наличие превышений ПДК в районе строящейся АЭС по нескольким веществам.

Произведено сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными. Результаты натурного эксперимента по определению содержания и выявлению количественного состава химических поллютантов в пробах атмосферного воздуха, отобранных в районе расположения АЭС, показали, что содержание тяжелых металлов в атмосферном воздухе на исследуемой территории значительно ниже предельно-допустимых концентраций: так, концентрации свинца ниже ПДК в 115-750 раз, кадмия – в 2 тыс. раз. Содержание пыли в воздухе ниже расчетных значений для исследуемого региона в 1.5 раза, диоксида азота – в шесть, оксида углерода – в 2.5-4.0 раза.

Тем не менее, сравнительный анализ расчетных и полученных экспериментальных данных по содержанию химических загрязнителей в атмосферном воздухе в зоне строительства АЭС показал, что на сегодняшний день для здоровья человека определенную опасность представляют химические выбросы промышленных предприятий. Радиационная обстановка на исследуемой территории в настоящее время не представляет опасности для здоровья населения.

В работе также приводится алгоритм оценки загрязнения окружающей среды для целей научно-практических исследований по оценке взаимодействия организма человека с окружающей средой в различных условиях труда и быта. Алгоритм реализован в виде компьютерного кода, позволяющего рассчитывать интегральный показатель загрязнения и получать информацию о состоянии безопасности объекта.

**ASSESSMENT OF MAJOR PUBLIC HEALTH RISKS FROM POLLUTION  
IN THE NPP UNDER CONSTRUCTION****I.V. Saltanova, V.V. Skurat**United Institute of Energy and Nuclear Researches NAS of Belarus,  
Minsk, Belarus, [isaltanova@mail.ru](mailto:isaltanova@mail.ru)

Several risk for human health from chemical emissions of industrial enterprises was shown based on comparative analysis of calculated and experimental data on chemical pollutant levels in air from the atomic power station building. Modern radiation situation on the territory studied constitutes no risk for human health.

**ДИНАМИКА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ВОДОЕМОВ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ ВУРСА****А.И. Смагин<sup>1,2</sup>, О.М. Сидоркина<sup>3</sup>, М.А. Тихонова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия,  
[Smagin54@mail.ru](mailto:Smagin54@mail.ru)

<sup>2</sup> Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озерск, Россия

<sup>3</sup> Уральский научно-исследовательский ветеринарный институт  
Россельхозакадемии, Екатеринбург, Россия

В конце сентября 1957 г. на Южном Урале произошла одна из наиболее крупных радиационных аварий в нашей стране. В результате взрыва емкости-хранилища радиоактивных отходов на территории промышленной площадки химического комбината «Маяк» в атмосферу было инжесктировано около  $20 \times 10^6$  Ки высокоактивных радионуклидов. Около 90% выброшенной в атмосферу смеси радиоактивных изотопов выпало в зоне промышленной площадки предприятия, а 10% вынесено в виде Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа), протянувшегося узкой полосой на сотни километров. На 90% инжесктированная в атмосферу смесь состояла из короткоживущих радионуклидов:  $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr} - 66\%$ ,  $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb} - 24.9\%$ ,  $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh} - 3.7$ . Из долгоживущих радионуклидов смесь изотопов содержала около  $5.4\%$   $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ . Первоначально считалось, что доля долгоживущего  $^{137}\text{Cs}$  в выпавшей смеси составляла 0.036%, но затем было установлено, что  $^{137}\text{Cs}$  составлял около 0.4% от суммы выпавших радионуклидов. Присутствовавшие в составе смеси долгоживущие  $^{90}\text{Sr}$  и отчасти  $^{137}\text{Cs}$ , наиболее биологически опасные радионуклиды, обусловили длительный характер радиоактивного загрязнения территории (см. рисунок) [1-3]. В результате аварии радиоактивному загрязнению подверглись обширные тер-



ритории Челябинской, Свердловской и Тюменской областей. Максимальные уровни радиоактивного загрязнения наблюдались на севере Челябинской области в головной части радиоактивного следа. На пострадавшей от загрязнения территории располагались многочисленные озера. Среди подвергшихся радиоактивному загрязнению водных объектов максимальные уровни загрязнения получили озера Бердениш и Урускуль, расположенные неподалеку от эпицентра аварии на оси ВУРСа. Средние значения плотности загряз-

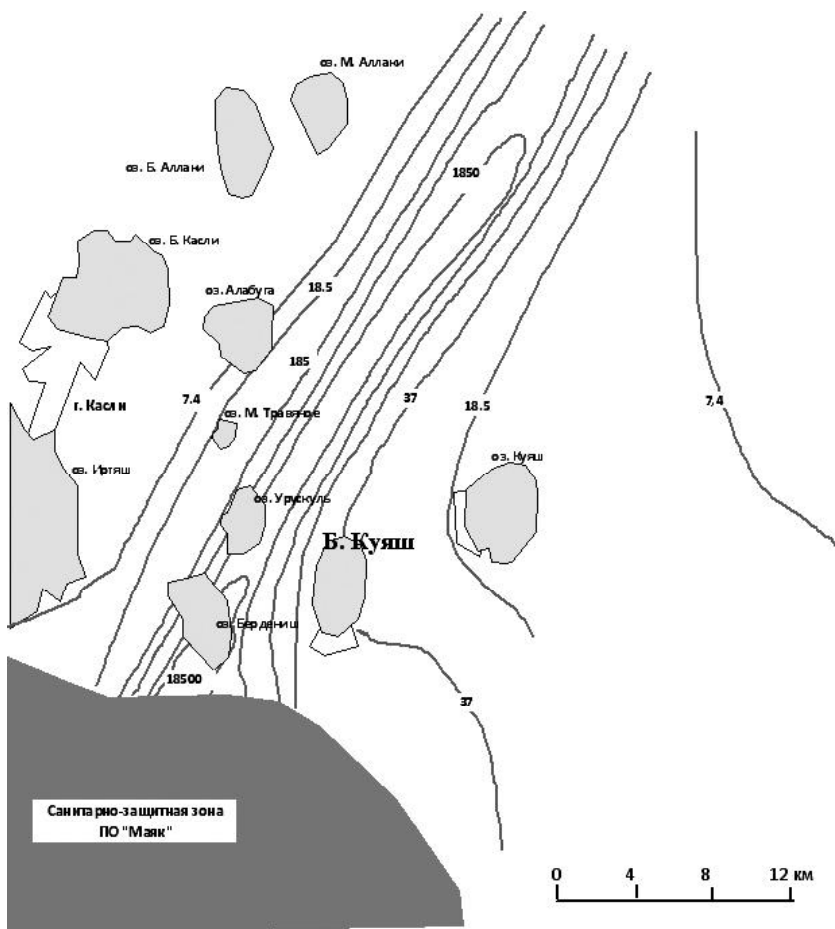


Схема головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа. Изолинии соответствуют поверхностному загрязнению почвы  $^{90}\text{Sr}$  кБк/м<sup>2</sup> (1 кБк/м<sup>2</sup> =  $2.7 \cdot 10^{-2}$  Ки/км<sup>2</sup>).

нения территории водосбора водоемов по  $^{90}\text{Sr}$  составляли 26 тыс. и 33 тыс. кБк/м<sup>2</sup> соответственно.

В первые часы после аварии концентрации радионуклидов в воде озер определялись количеством радиоактивных веществ, поступивших на поверхность водоемов. Затем из состава выпавшей смеси под действием гравитации на дно водоема осели крупные нерастворимые частицы, что привело к существенному снижению удельной активности воды. Дальнейшее снижение концентрации радионуклидов в воде водоемов было вызвано оседанием более мелких частиц и химическим взаимодействием ионных форм с водой и илами. Эти процессы привели к тому, что удельная активность воды в озерах Бердениш и Урускуль снизилась за две недели в 5-10 раз. Уровни удельной  $\beta$ -активности воды на 10 октября 1957 г. составляли в оз. Бердениш  $5.3 \cdot 10^4$  Бк/л (1.4 мкКи/л), оз. Урускуль –  $1.0 \cdot 10^5$  (2.8) и превышали фоновые значения в 14 тыс. и 28 тыс. раз соответственно. Исследования 1958 г. показали, что в озерной воде происходило дальнейшее снижение концентрации радионуклидов. За период меньше одного года (с осени 1957 г. к лету 1958 г.) активность воды в оз. Бердениш снизилась в 37 раз, оз. Урускуль – в 28 [1]. За исследованный временной интервал (с 1958 по 2010 г.) удельная активность воды по  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в оз. Бердениш снизилась более чем в 1200 раз, оз. Иртяш – на порядок величины.

В результате проведенных сотрудниками ОНИС многолетних исследований установлено, что основным компонентом, в котором концентрируется до 90% и более радионуклидов, являются донные отложения. Именно этот компонент гидроценоза определяет механизм и скорость перераспределения радионуклидов. Скорость самоочищения воды в водоемах ВУРСа составляет 5-7 лет и намного превышает скорость физического распада. Самоочищение воды происходит не только за счет физического распада, но и перераспределения радионуклидов в системе вода–донные отложения [2, 3].

Многолетние исследования динамики поведения радионуклидов в геосистемах водоемов ВУРСа позволили сотрудникам ОНИС выделить четыре основных периода.

Первый – в течение первых суток после аварии происходит выпадение радиоактивных аэрозолей на акваторию водоема. Радиоактивность воды скачкообразно увеличивается в  $10^5$  раз.

Второй – в результате интенсивной сорбции радионуклидов илами и биотой происходит быстрый спад удельной активности воды. В водоемы продолжают поступать радиоактивные вещества за счет ветрового переноса радиоактивных частиц с берегов. Продолжительность периода составляла несколько месяцев до установления динамического равновесия.

Третий продолжался около трех-пяти лет и характеризовался дальнейшим уменьшением удельной активности воды за счет распада короткоживущих радионуклидов во всех компонентах водоемов. В этот период наблюдается интенсивный смыв радионуклидов с территории водосборных бассейнов в озера и прочное закрепление радионуклидов в почве, донных отложениях, накопление радионуклидов организмами биоты с последующим депонированием в донных отложениях.

Четвертый период продолжается по настоящее время и характеризуется тем, что из всей смеси радионуклидов в водоемах остались, в основном, долгоживущие  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Поступление радионуклидов с поверхностным стоком существенно снижается. Достигнуто динамическое равновесие между компонентами водоемов. Спад активности в этот период достаточно медленный, продолжаете проникновение радионуклидов вглубь донных отложений.

#### Литература

1. Изучение радиоэкологических, радиационно-гигиенических и социально-хозяйственных последствий массивного радиационного загрязнения больших площадей (1958-1984 гг.). Отчет по теме «МИРАЖ» // Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности». Озерск, 2005. Т. III. 132 с.
2. Смагин А.И. Экология промышленных водоемов предприятия ядерного топливного цикла на Южном Урале. Озерск: Редакционно-издательский центр ВРБ, 2007. 190 с.
3. Смагин А.И. Экология водоемов в зоне техногенной радионуклидной геохимической аномалии на южном Урале. Челябинск, 2013. 205 с.

#### EVOLUTION OF THE RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE WATER BODIES FROM THE EASTERN URAL RADIOACTIVE TRACE AREA NEAR TO THE MAYAK PRODUCTION ASSOCIATION

A.I. Smagin, O.M. Sidorkina, M.A. Tikhonova

<sup>1</sup> National research South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> South Ural biophysical institute of the Federal Medical-Biological Agency, Ozersk, Russia

<sup>3</sup> Ural research veterinary institute of Russian Agricultural academy, Yekaterinburg, Russia

The report presents results of long-term studies of radionuclides migration in lakes from the Eastern Ural Radioactive Trace area.

## ПАССИВНЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАПЫЛЕННОСТИ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

М.П. Тентюков, И.И. Шуктомова

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[tentukov@ib.komisc.ru](mailto:tentukov@ib.komisc.ru)

В настоящее время радиоэкологическая обстановка динамично меняется: отмечается повсеместный рост естественного фона ионизирующих излучений, появляются новые и расширяются существующие зоны с повышенным содержанием радионуклидов, возрастает их содержание в пищевых цепочках [1]. В этих условиях необходим поиск критериев распознавания: что является результатом воздействия атмосферного переноса радиоактивных веществ, а что – следствием влияния сезонных колебаний природного радиационного фона. Поскольку последний тесно связан с атмосферной радиоактивностью, то изучение носителей ее распределения в приземном слое воздуха весьма актуально. Поэтому объектом исследования в данной работе стал  $^{40}\text{K}$ . Выбор обусловлен тем, что радиоизотоп широко рассеян в почве и прочно удерживается глинами. Последние являются основным компонентом пылевого загрязнения атмосферы, которое за последние 100 лет увеличилось в два раза [16]. Известно, что с земной поверхности ежегодно в атмосферу поступает более 1.6 млрд. т [4, 17], из которых 75 оседает на сушу, а 25% – в океан. С учетом сказанного можно допустить, что запыление воздуха способствует расширению спектра размеров частиц, участвующих в переносе радиоактивности в атмосфере<sup>1</sup>. Предполагается, что определенную роль в этом процессе играет сухое осаждение аэрозольных частиц диаметром 0.1-10.0 мкм. Они составляют более 70% объема концентрации всех взвешенных в атмосфере частиц и примерно половину суммарной поверхности аэрозолей [5]. Их доля в общем объеме выпадающих осадков для умеренных широт равна 10-20%, и при сухом осаждении они содержат загрязняющих веществ на 25% больше, чем дождевые осадки [6].

Существует активный способ сбора аэрозолей, включающий осаждение на многослойные фильтры путем прокачки потока воздуха (аспирацией) сквозь фильтры с использованием специальных вентиляционных установок (аспираторов). Между тем, количественные характеристики, полученные активными способами сбора, нельзя рассматривать как приходные части баланса вещества в экосистеме. Они характеризуют потенциальные запасы аэрозольного

<sup>1</sup> Принято считать, что носителями радиоактивности в атмосфере являются аэрозольные частицы в интервале радиусов от 0.015 до 0.5 мкм [7].

вещества в приземном воздухе, которые не всегда и не полностью поступают на подстилающую поверхность [3]. В последнее время большой интерес проявляется к методу пассивного пробоотбора, основанного на молекулярной диффузии загрязнителя из анализируемого объекта к сорбенту, который представляет собой определенным образом подготовленную подложку с селективным химическим реагентом [8].

Простота изготовления и эксплуатации пассивных пробоотборников, а также большое разнообразие реагентов, используемых для детектирования вредных веществ, быстро расширило сферу практического их применения не только в промышленной гигиене [11], но и экологических исследованиях [13]. Пассивный пробоотбор достаточно эффективен для оценки загрязнения воздуха органическими веществами, а также является очень привлекательным для исследования состояния атмосферного воздуха, когда надо получить осредненную за относительно длительный период времени (от недель до месяцев) количественную оценку атмосферного загрязнения. Вместе с тем отмечается, что перед длительным экспонированием пассивные пробоотборники необходимо проверить на устойчивость к воздействию климатических и погодных факторов [18], поскольку выяснилось, что процесс сорбции аэрозолей зависит от метеорологических параметров внешней среды [14, 19], а также химического взаимодействия между реагентом подложки и отбираемым загрязнителем [9]. Это усложняет расчет конечных показателей, поскольку требуется тщательная калибровка пассивного пробоотборника [15, 12], включая тестовые испытания в лаборатории и полевых условиях [10, 2], что сдерживает применение пассивных пробоотборников для целей мониторинга окружающей среды.

В данной работе предлагается способ сбора аэрозолей в приземном слое воздуха с помощью пассивного турбулентно-диффузионного пробоотборника. На рисунке представлена схема устройства – импульвератора, обеспечивающего сухое осаждение аэрозолей из пограничного слоя на химически инертный субстрат. Он включает корпус, выполненный из материала, обладающего высокой теплоемкостью и химически инертного к атмосферным компонентам. Его верхняя часть закрыта глухой крышкой (1), снабженной выступом-козырьком (2), под которым сделан ряд отверстий (3). К открытой нижней части импульвератора крепится нейлоновая сетка (5). Внутри устройства устанавливается ложемент (4), на который помещается сорбент из химически инертного порошкового материала. Устройство содержит приспособление (на рисунке не показано) для фиксации при экспонировании. Технический результат, достигаемый с помощью данного пассивного пробоотборника аэрозолей, заключается в следующем. Из-за различий в теплоемкости материа-

лов депонирующего субстрата и устройства при воздействии солнечной радиации во внутреннем объеме устройства возникает температурный градиент, сопровождающийся формированием конвективных и турбулентных потоков воздуха и, как следствие, появлением пограничного слоя над субстратом. В результате турбулентной диффузии из пограничного слоя на поверхность химически инертного субстрата под действием разности концентраций происходит осаждение аэрозолей. Экспонирование импультвераторов, в которых в качестве сорбционного субстрата использовался тонкодисперсный химически инертный порошок  $MgO$ , производилось на двух специально оборудованных аэрозольных площадках. Первая была обустроена в пределах Сыктывкарского (участок «РБК»), а вторая – Ухтинского промышленных узлов (район пос. Водный, участок «10 завод»). Выбор промузлов обусловлен отсутствием в них объектов, связанных с алюминиевым производством, а также тем, что для первого частота повторяемости ветров со стороны источника регионального запыления (глиноземный карьер «Чиньяворык») составляет 7-10, а для второго – 20-25%<sup>1</sup>. По отношению к выбранным участкам источник запыления воздуха находится на расстоянии 400 и 260 км соответственно.

Измерение удельной активности  $^{40}K$  производили на сцинтилляционном гамма-бета спектрометрическом комплексе с программным обеспечением «Прогресс» (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН) в геометриях «Маринелли-250». Время измерения проб – 3600 сек. Результаты показали, что удельная активность  $^{40}K$ , «набранная» за год для Сыктывкарского промузла оказалась почти в три раза ниже, чем для Ухтинского за два месяца (см. таблицу). Следовательно, с началом работы рудника за счет регионального переноса возросло содержание глиноземной пыли в приземной атмосфере

над Ухтинским промузлом, что усиливает риск дополнительного радиационного облучения населения за счет увеличения ингаляционной дозы  $^{40}K$ , прирост которой находится в прямой зависимости от степени загрязнения приземного воздуха глиноземной пылью.

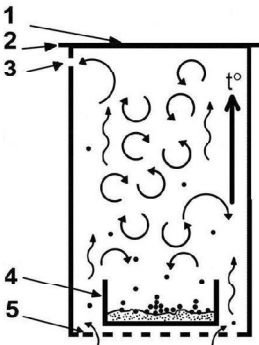


Схема импультвератора с химически инертным субстратом из порошкового ( $MgO$ ) материала (пояснения в тексте).

<sup>1</sup> Расчет выполнен по данным [www.gismeteo.ru](http://www.gismeteo.ru).

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что предложенный способ дает возможность по-новому организовать контроль за радиологической обстановкой в зоне техногенеза и на фоновых территориях. Простота конструкции устройства пассивного пробоотборника аэрозолей и низкие затраты на его изготовле-

ние позволяют использовать его для одновременного сбора сухих аэрозолей в различных ландшафтных условиях и на большой площади, что, в отличие от существующих способов, повышает качество и технологичность исследований атмосферного цикла миграции радионуклидов, например, в удаленных и труднодоступных районах. Кроме того, на основании полученных результатов может быть определен спектр радиоэкологических задач, решаемых с помощью описанного способа, а именно: а) организация наблюдений за динамикой изменчивости концентраций радионуклидов при сухом осаждении аэрозолей в наземные экосистемы в пределах территорий, прилегающих к предприятиям атомной промышленности; б) изучение влияния природно-климатических условий на особенности формирования радиационных аномалий в приземной атмосфере и почвенно-растительном покрове.

#### Изменение удельной активности $^{40}\text{K}$ (Бк/кг) при запыленности атмосферы

Период экспонирования	Сорбент	Удельная активность
Сыктывкарский промышленный район		
05.2009-04.2010	MgO	58±17
03.2011-04.2012	MgO	<40
Ухтинский промышленный район		
06.2011-07.2011	MgO	<40
07.2011-09.2011	MgO	181±36

#### Литература

1. *Алексахин Р.М.* Радиоэкология: столетняя история этой области естествознания – уроки эволюции и современные задачи // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Матер. Междунар. конф. Сыктывкар, 2009. С. 7-9.
2. *Евгеньев М.И., Евгеньева И.И., Белов П.Е.* Пассивный химический дозиметр для определения длительной экспозиции в воздушной среде, содержащей анилин и его производные // Журнал аналитической химии, 2006. Т. 61. № 8. С. 847-853.
3. *Елпатьевский П.В.* Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука, 1993. 253 с.
4. *Лисицын А.П.* Аридная седиментация в мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика, 2011. Т. 52. № 10. С. 1398-1439.
5. *Смирнов В.В.* Аэрозольный климат Подмосковья // Метеорология и гидрология, 2003. № 9. С. 37-49.
6. *Хорват Л.* Кислотный дождь / Пер. с венг., под ред. Ю.Н. Михайловского. М.: Стройиздат, 1990. 80 с.

7. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы / Пер. с англ., под ред. Ю.А. Израэля. М.: Мир, 1965. 424 с.

8. Юшкецова Н.А., Поддубный В.А. Метод пассивного отбора проб для мониторинга химического загрязнения атмосферного воздуха. Ч. 1. Теоретические основы (обзор) // Экологические системы и приборы, 2007. № 2. С. 3-10.

9. Delcourt J., Sandino J.-P. Performance assessment of a passive sampler in industrial atmospheres // International Archives of Occupational and Environmental Health, 2000. Vol. 74. № 1. P. 49-54.

10. Franz T.P., Eisenreich S.J., Swanson V.B. Evaluation of precipitation samplers for assessing atmospheric fluxes of trace organic contaminants // Chemosphere, 1991. Vol. 23. № 3. P. 343-361, doi:10.1016/0045-6535(91)90189-K.

11. Giese U., Hebesch R., Pannwitz K.-H., Tschickardt M. Passive sampling // Analyses of Hazardous Substances in Air, 2002. Vol. 6. P. 3-25, doi: 10.1002/3527600418. amsampassive0006.

12. Hazratia S., Harrad S. Calibration of polyurethane foam (PUF) disk passive air samplers for quantitative measurement of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated biphenyl ethers (PBDEs): Factors influencing sampling rates // Chemosphere, 2007. Vol. 67. № 3. P. 448-445, doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.09.091.

13. Kot-Wasik A., Zabiegala B., Urbanowicz M. et al. Advances in passive sampling in environmental studies // Analytica Chimica Acta, 2007. Vol. 602. № 2. P. 141-163, doi:10.1016/j.acta.2007.09.013.

14. Kreissl B., Hoschele K., Staiger H., Schultz E. Meteorological influence on particle dry deposition // J. Aerosol Science, 1991. Vol. 22. № 1. P. 573-576, doi:10. 1061/S0021-8502(05)80166-1.

15. Krupa S.V., Legge A.H. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective // Environmental Pollution, 2000. Vol. 107. № 1. P. 31-45.

16. Mahowald N. M., Kloster S., Engelstaedter S. et al. Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry // Atmos. Chem. Phys., 2010. № 10. P. 10875-10893, doi:10.5194/acp-10-10875-2010.

17. Shao Y., Wyrwoll K.-Y., Chappell A. et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science // Aeolian Research, 2011. Vol. 2. № 4. P. 181-204.

18. Wagner J., Leith D. Field tests of a passive aerosol samples // J. Aerosol Science, 2001. Vol. 32. № 1. P. 33-48.

19. Yucel T., Odabasid M., Vardarc N. et al. Dry deposition fluxes and velocities of polychlorinated biphenyls (PCBs) associated with particles // Atmospheric Environment, 2004. Vol. 38. № 16. P. 2447-2456, doi:10. 1016/j.atmosenv.2004.02.006.



**PASSIVE RADIATION MONITORING OF THE DUSTY SURFACE ATMOSPHERE****M.P. Tentyukov, I.I. Shuktomova**Institute of Biology, Komi Science Centre, Ural Division RAS,  
Syktyvkar, Russia, [tentyukov@ib.komisc.ru](mailto:tentyukov@ib.komisc.ru)

A new technique for studying the atmospheric radioactivity in the dusty surface atmosphere by measuring the specific activity of natural radionuclide  $^{40}\text{K}$  in stock of aerosols has been proposed. Collection of aerosols is carried out using passive sampling device with chemically inert powdered magnesium oxides that acts as a sorption substrate. The results of experimental verification of the new technique effectiveness have been presented.

**ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ХРОНИЧЕСКОГО  
РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА ЛОКАЛЬНЫЕ ЦЕНОПОПУЛЯЦИИ *PHRAGMITES AUSTRALIS*  
В ВОДОЕМАХ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ****Н.Л. Шевцова, Д.И. Гудков**Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, Украина,  
[shevtsovanl@rambler.ru](mailto:shevtsovanl@rambler.ru)

Одной из важнейших проблем в современной радиозэкологии является оценка биологических эффектов хронического действия малых доз ионизирующего излучения (ИИ). Пресноводные экосистемы Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) в этом отношении остаются практически неисследованными. Основные результаты получены для животных – рыб и моллюсков, в то время как растительные организмы остаются малоизученными. Одним из наиболее распространенных высших воздушно-водных растений литорали является тростник обыкновенный *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud – крупный корневищный злак, повсеместно встречающийся как в пресных, так и солоноватых водоемах. Это растение неприхотливо к условиям произрастания, а его заросли играют роль своеобразного биофильтра, аккумулируя азот, фосфор, пестициды, тяжелые металлы и радионуклиды [4]. Биологические характеристики тростника изучены достаточно полно, что связано с его активным использованием в народном хозяйстве. С нашей точки зрения, это растение является одним из наиболее перспективных объектов для проведения радиозэкологических исследований *in situ* среди высших водных растений.

Цель работы заключалась в анализе цитогенетических эффектов хронического радиационного облучения тростника обыкновенного, произрастающего в водоемах ЧЗО.

Исследования проводили в 2006-2010 гг. на водоемах ЧЗО: оз. Азбучин, водоеме-охладителе (ВО) ЧАЭС, Яновском затоне и реках Припять (г. Чернобыль) и Уж (с. Черевач), а также в озерах одамбированной части левобережной поймы р. Припять – Глубокое и Далекое. Для сравнения отбирали пробы в Киевском (села Страхолестье и Лютеж) и Каневском водохранилищах (г. Киев), а также в озерах Голосеевское и Вербное (г. Киев) с фоновыми уровнями радионуклидного загрязнения.

Объектом исследований служили клетки корневой меристемы тростника обыкновенного. Цитогенетический анализ проводили анафазным экспресс-методом, модифицированным для высших водных растений [6] под микроскопом Zeiss Primo Star при увеличении  $10\times 100$ . В каждом препарате анализировали все ана-телофазные клетки (715-9260 ана-телофаз в 6-30 препаратах на вариант) и учитывали частоту клеток с цитогенетическими нарушениями в виде aberrантных анафаз (ЧАА). Анализ основных типов нарушений проводили с выделением одиночных и парных фрагментов, мостов, а также множественных нарушений. Отставание хромосом не регистрировали. Добавочные полюса деления встречались очень редко – до одного-трех на каждый вариант за весь период исследований, поэтому в спектре цитогенетических нарушений их не учитывали. Статистический анализ показателей хромосомных нарушений выполняли стандартными методами.

Для анализа цитогенетических последствий хронического радиационного воздействия на тростник обыкновенный из водоемов с разным уровнем радионуклидного загрязнения был проведен расчет дозовой нагрузки на растение. Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения рассчитывали с учетом внешнего облучения от фоновых источников и внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов. Для расчетов использовали усредненные данные удельной активности растения целиком, удельной активности донных отложений и водных масс. Уровень внешнего фона измеряли с помощью радиометров ДКС-01, СРП-6803. Погрешность оценки дозовых нагрузок не превышала 25-30%.

Повреждение молекул ДНК при действии ИИ относят к стохастическим эффектам. Однако при подсчете таких событий на одну, среднюю по размерам клетку (например, лимфоцит человека) на 1 тыс. клеток при облучении в дозе 0.01 Гр приходится около 400 двунитевых и около 2 тыс. одноститевых разрывов ДНК [3]. При хроническом облучении в малых дозах кроме того, что этот поток молекулярных повреждений постоянно поддерживается, наблюдается и ослабление интенсивности процессов репарации ДНК – снижение синтеза альфа- и бета-полимераз, затрудняется доступ ферментов репарации к повреждениям из-за недостаточной релакса-

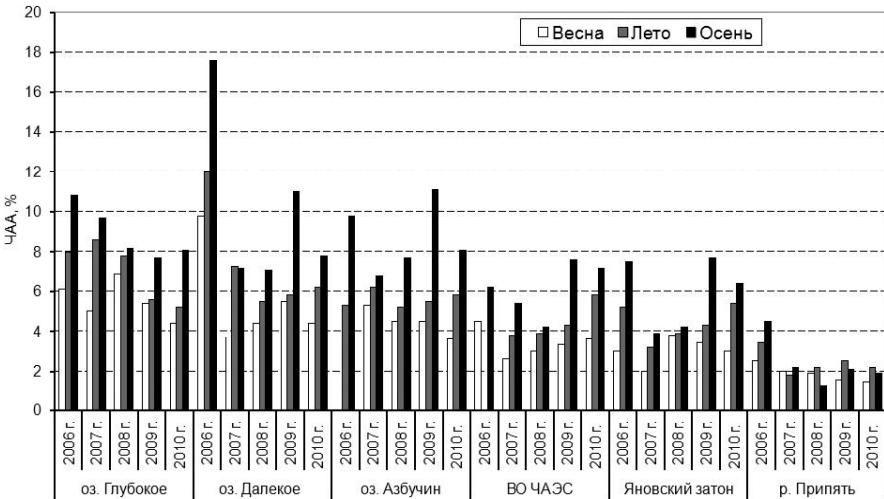
ции гетерохроматина, не активируется блокада перехода от клеточной стадии G2 к стадии M, что приводит к отключению репарации двунитевых разрывов и т.д. [1-3]. С точки зрения острого облучения и радиочувствительности, доза ИИ, которую получает вегетирующее растение в течение года в водоемах ЧЗО, относится к диапазону малых доз. Однако, учитывая уже доказанную разницу в эффективности острого и хронического облучения, можно предположить, что многолетнее действие ИИ в водоемах ЧЗО приведет к повышению генетической нестабильности в популяциях тростника обыкновенного, что может найти отражение как в спектре хромосомных aberrаций, так и в их количестве.

Расчетные дозовые нагрузки на тростник обыкновенный в водоемах ЧЗО в 2006-2010 гг. находились в диапазоне средних значений – 0.14-12.0 сГр/год. Мощность поглощенной дозы для растений Киевского, Каневского водохранилищ, а также контрольных озер не превышала 0.02-0.06 сГр/год.

Данные цитогенетических исследований апикальных клеток корневых меристем тростника обыкновенного (см. рисунок) свидетельствуют о повышенном уровне хромосомных нарушений у растений из замкнутых и слабопроточных водоемов ЧЗО (озера Глубокое, Далекое, Азбучин, ВО ЧАЭС и Яновский затон) по сравнению с проточными водоемами ЧЗО (реки Припять и Уж), и водными объектами с фоновыми уровнями радионуклидного загрязнения. Самые высокие значения ЧАА отмечены у растений, облучающихся в диапазоне мощности дозы 4-6 (оз. Далекое) и 5-22 мкГр/ч (оз. Глубокое).

На протяжении вегетационного периода с мая по октябрь отмечали почти двукратное увеличение ЧАА у растений из озер Глубокое, Далекое, Азбучин и ВО ЧАЭС, где средние дозовые нагрузки на растение составляют 0.7-12.0 сГр/год (см. рисунок).

Предполагается несколько причин этого явления: во-первых, так называемое «старение» клеточной ткани, т.е. накопление сублетальных повреждений ДНК хромосом [3]; во-вторых – особенности вегетационного цикла тростника – в июне-июле происходит рост и активное ветвление корневищ тростника, а также заложение почек возобновления, которые формируют генеративные побеги следующего года [4]. В этот период интенсивность метаболических процессов в тростнике повышается, а в корнях тростника наблюдается максимальная за весь год концентрация  $^{137}\text{Cs}$  [7]. Это позволяет утверждать, что вследствие интенсификации обмена веществ и накопления радионуклидов в тканях увеличивается внутренняя доза, что находит отражение в повышении выхода хромосомных aberrаций к концу вегетационного сезона. В спектре хромосомных aberrаций в клетках растений из замкнутых водоемов ЧЗО обращает на



Вегетационные изменения ЧАА в клетках корневой меристемы тростника из водоемов Чернобыльской зоны отчуждения, %.

себя внимание высокий процент клеток с множественными абберациями по сравнению с проточными водоемами ЧЗО и водоемами с фоновым уровнем радионуклидного загрязнения. В целом, в фоновых водоемах и реках Припять и Уж в апикальных клетках корневых меристем множественные абберации практически не встречаются, а спектр хромосомных аббераций представлен клетками с одиночными фрагментами и в меньшей степени с одиночными мостами. В спектре хромосомных аббераций в клетках растений из водоемов левобережной поймы р. Припять, где мощность дозы максимална и находится в диапазоне 5-12 сГ/год, преобладают абберации хромосомного типа – парные фрагменты и мосты, а также множественные абберации. Например, в озерах Глубокое и Далекое за период исследований доля хромосомных аббераций составляла 60-70%, из них на долю множественных аббераций приходилось 50-75%, что сопоставимо со случаями острого облучения растений в дозах выше ЛД50 [1-3, 5]. В последние годы регистрируется повышение доли множественных аббераций также и в клетках растений из слабопроточных и проточных водоемов ЧЗО. В спектре аббераций в клетках корневых меристем тростника обыкновенного из Яновского затона, водоема-охладителя ЧАЭС и р. Припять доля множественных аббераций в 2010 г. достигла 40-45, 20-25 и 10-15% соответственно.

Как правило, преобладание нарушений хромосомного типа над хроматидным связывают с действием ИИ [3]. Обращает на себя вни-

мание почти полное отсутствие в спектре нарушений таких митотических аномалий, как трехполюсные и К-митозы, которые в большей степени характерны для действия химических мутагенов. Минимальная частота нарушений митотического аппарата клетки позволяет предположить малое содержание в водоемах анеугенов – веществ, воздействующих на аппарат деления клетки и повышенное содержание кластогенов – веществ, непосредственно действующих на хромосомы. Основные дозообразующие радионуклиды чернобыльского происхождения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  относятся именно к классу кластогенов.

Выявлена достоверная корреляция частоты цитогенетических нарушений в клетках корневых меристем вегетирующих растений тростника обыкновенного с внутренней дозой облучения с коэффициентом корреляции  $R = 0.9437$  при уровне значимости  $p < 0.01$ . Установлена степенная зависимость между уровнем аберрантных клеток в корневых меристемах и мощностью поглощенной дозы хронического облучения ИИ от инкорпорированных радионуклидов.

#### Литература

1. Бурлакова Е.Б., Голощанов А.Н., Горбунов Н.В. и др. Особенности биологического действия малых доз облучения // Радиационная биология. Радиоэкология, 1996. Т. 36. № 4. С. 610-631.
2. Газиев А.И. Репарация критических повреждений ДНК, вызываемых малыми дозами радиации, является низкоэффективной // Тез. докл. VI съезда по радиационным исследованиям. М.: РУДН, 2010. С. 5.
3. Гродзинський Д.М. Радіобіологічні ефекти хронічного опромінення рослин в зоні впливу Чорнобильської катастрофи. К.: Наукова думка, 2008. 335 с.
4. Дьяченко Т.Н. Биологические и экологические особенности тростника южного в аспектах оптимального использования его ресурсов // Гидробиол. журн., 2011. Т. 47. № 4. С. 23-34.
5. Шевцова Н.Л., Гудков Д.И. Цитогенетические нарушения у тростника обыкновенного в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения // Гидробиол. журн., 2012. № 6. Т. 48. С. 99-113.
6. Шевцова Н.Л., Гудков Д.И., Сазонов В.И. Спосіб виготовлення цитогенетичних давлених препаратів з коренів вищих водяних рослин Патент 103090 С2 UA // Бюл. 17. 10.09.2013.
7. Широка З.О. Накопичення радіонуклідів вищими водяними рослинами Дніпровських водоймищ; Автореф. дис. ... канд. біол. наук. Київ, 1995. 25 с.

**CYTOGENETIC RADIATION EFFECTS OF CHRONIC EXPOSURE  
TO LOCAL CENOPOPULATIONS PHRAGMITES AUSTRALIS  
IN RESERVOIRS OF THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE****N.L. Shevtsova, D.I. Gudkov**Institute of Hydrobiology of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine,  
[shevtsovanl@rambler.ru](mailto:shevtsovanl@rambler.ru)

Cytogenetic damages in root meristem cells of the common reed from water-bodies of the Chernobyl exclusion zone with different level of radionuclide contamination were studied. The chromosomal aberration rate and their spectrum were analyzed. It is determined, that chromosomal aberration rate of plants from water-bodies within the Chernobyl exclusion zone increases the spontaneous mutagenesis level for hydrobionts in 2-6 times and corresponds to the power mode function from the absorbed dose rate.

**ВЛИЯНИЕ ИОНОВ УРАНИЛА НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭРИТРОЦИТОВ  
К ДЕЙСТВИЮ ФАКТОРОВ,  
ИНДУЦИРУЮЩИХ ОСТРЫЙ ОКИСЛИТЕЛЬНЫЙ СТРЕСС****О.Г. Шевченко**Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия,  
[shevchenko@ib.komisc.ru](mailto:shevchenko@ib.komisc.ru)

Уран – естественный радиоактивный элемент, широко распространенный в биосфере и применяющийся в военных и промышленных целях, что обуславливает высокие риски для человеческой популяции вследствие его хронического поступления в организм с пищей, водой и воздухом. Вместе с тем существует немного работ, в которых рассматриваются клеточные и молекулярные механизмы токсичности урана, что обуславливает необходимость более детальных исследований в этом направлении. Для изучения различных аспектов действия металлов на живые организмы часто используются системы *in vitro*, в частности, культуры клеток животных и человека. В качестве классической клеточной модельной мембранной системы для изучения механизмов токсичности, индуцируемой тяжелыми металлами, нередко выбираются эритроциты. Исследования такого рода позволяют исключить эффекты, обусловленные повреждением ядерного аппарата клетки и индукцией систем репарации ДНК. Кроме того, эритроциты крайне чувствительны к окислительным повреждениям вследствие высокого содержания полиненасыщенных жирных кислот в липидах мембран и наличия гемоглобина, являющегося потенциальным промотором окислительных процессов. Между тем отдельные экспериментальные

данные свидетельствуют об усилении образования активных форм кислорода в культурах клеток животных и человека в присутствии соединений урана. Таким образом, можно предполагать способность урана даже в низких концентрациях не только изменять антиоксидантный статус клеток, но и модифицировать их реакцию на действие иных повреждающих факторов.

Цель настоящей работы – исследование влияния иона уранила в наномолярных концентрациях на чувствительность эритроцитов к действию факторов, способных провоцировать острый окислительный стресс.

Объектом экспериментов служила суспензия эритроцитов крови лабораторных мышей в физиологическом растворе. В качестве источника ионов уранила использовали раствор  $UO_2Cl_2$ . Инкубацию исследуемых образцов проводили в термостатируемом шейкере BiosanES-20 (Латвия) при  $37^\circ C$  и медленном перемешивании. Острый окислительный стресс индуцировали внесением в инкубационную среду раствора  $H_2O_2$  (0.9 мМ) либо 2,2-азобис-(амидинопропан)-дигидрохлорида (AAPH, 5 мМ, Sigma-Aldrich, Germany). Степень гемолиза определяли по содержанию гемоглобина в супернатанте на спектрофотометре Thermo Spectromic Genesys 20 (США) [7, 8]. Содержание вторичных продуктов ПОЛ, реагирующих с 2-тиобарбитуровой кислотой (Merck, Germany), в инкубационной смеси определяли спектрофотометрически [1]. Содержание различных форм гемоглобина (oxyHb, metHb и ferrylHb) рассчитывали с учетом соответствующих коэффициентов экстинкции [2]. Статистическую обработку данных и построение диаграмм осуществляли с помощью пакета программ Microsoft Office Excel2007 и Statistica 6.0. Статистическую значимость различий оценивали по непараметрическому критерию Манна-Уитни.

Установлено, что присутствие ионов уранила в наномолярных концентрациях ведет к снижению уровня спонтанной гибели эритроцитов крови в течение первых часов инкубации, что может быть обусловлено стабилизирующим эффектом уранила вследствие его высокой афинности к липидным бислоями, способности к комплексообразованию с мембранными фосфолипидами.

Исследование влияния ионов уранила в концентрациях 10-1000 нМ на чувствительность эритроцитов к воздействию острого окислительного стресса, индуцируемого различными источниками образования свободных радикалов, привело к довольно неожиданным результатам. Так, предварительное внесение в инкубационную среду уранил хлорида существенным образом уменьшало повреждающее действие  $H_2O_2$ , что проявлялось в снижении уровня окислительного гемолиза в течение всего периода инкубации, ингибировании ПОЛ и окисления оксигемоглобина. Использование иного ис-

точника образования свободных радикалов – ААРН – при той же схеме эксперимента привело к обратным результатам. Предварительное внесение уранила вызвало увеличение чувствительности клеток к воздействию индуктора образования пероксильных радикалов, что привело к снижению выживаемости эритроцитов преимущественно на начальных этапах инкубации, резкому возрастанию накопления продуктов окисления оксигемоглобина и незначительному росту концентрации продуктов ПОЛ.

Стабилизация мембраны вследствие внесения в инкубационную среду уранил хлорида в низких концентрациях может являться одной из причин наблюдаемого нами существенного уменьшения чувствительности эритроцитов к воздействию  $H_2O_2$ . Однако возможны и другие механизмы этого явления. Поскольку химические свойства урана аналогичны свойствам других переходных металлов, ион уранила способен катализировать химические реакции с образованием АФК, подобные реакции Фентона [4, 5]. В системе, содержащей уранил-ион и пероксид водорода, происходит восстановление  $UO_2^{+2}$  до  $UO_2^{+}$  с генерацией гидроксильных радикалов [3, 6]. Таким образом, второй причиной наблюдаемого нами снижения степени  $H_2O_2$ -индуцированного гемолиза и интенсивности окислительной деградации липидов и гемоглобина может быть уменьшение количества молекул  $H_2O_2$ , проникающих в клетку, вследствие протекания в среде инкубации в присутствии иона уранила реакции Фентона.

Несколько иной механизм индукции окислительного гемолиза характерен для ААРН. При термическом разложении ААРН в водной фазе при физиологических температурах образуются пероксильные радикалы, воздействующие на эритроцит с внешней стороны мембраны. Если первичной мишенью действия  $H_2O_2$  в эритроцитах является находящийся внутри клетки гемоглобин, то в случае ААРН в первую очередь имеет место свободнорадикальное повреждение плазматической мембраны. По-видимому, именно изменение физико-химических свойств эритроцитарной мембраны вследствие взаимодействия с ионами уранила приводит к ее большей чувствительности к атаке пероксильными радикалами, образующимися при термическом разложении ААРН.

Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что даже кратковременное пребывание клеток в среде, содержащей ионы уранила в наномолярных концентрациях, приводит к изменению физико-химических свойств мембран эритроцитов, что способно не только повлиять на выживаемость клеток, но и существенным образом модифицировать их реакцию на действие повреждающих факторов, в частности, индукторов окислительного стресса. Характер модификации зависит от источника образования радикалов и обусловлен как особенностями его механизмов воздействия



на клетку, так и способностью уранила катализировать химические реакции с образованием АФК. Детальные механизмы воздействия низких концентраций соединений урана на клетки требуют дальнейшего изучения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президиума УрО РАН «Молекулярно-клеточная биология» № 12-П-4-1021 «Молекулярно-клеточные механизмы ответных реакций организмов на хроническое воздействие факторов физической и химической природы низкой интенсивности».

#### Литература

1. *Asakawa T., Matsushita S.* Coloring conditions of tiobarbituric acid test for detecting lipid hydroperoxides // *Lipids*, 1980. 15. P. 137-140.
2. *Berg J.M., Kamp J.A.F., Lubin B.* et al. Kinetics and site specificity of hydroperoxide-induced oxidative damage in red blood cells // *Free Rad. Biol. and Med.*, 1992. Vol. 12 (6). P. 487-498.
3. *Hamilton M.M., Ejnik J.W., Carmichael A.J.* Uranium reactions with hydrogen peroxide studied by EPR spin trapping with DMPO // *Chem. Soc. Perkin Trans.*, 1997. P. 2491-2494.
4. *Huang X., Zhuang Z., Frenkel K.* et al. The role of nickel and nickel-mediated reactive oxygen species in the mechanism of nickel carcinogenesis // *Environ. Health Perspect.*, 1994. Vol. 102 (Suppl. 3). P. 281-284.
5. *Miller A.C., Stewart M., Brooks K.* et al. Depleted uranium-catalyzed oxidative DNA damage: absence of significant alpha particle decay // *J. Inorganic Biochemistry*, 2002. Vol. 91. P. 246-252.
6. *Nakajima A., Ueda Y.* Effects of hydroxyl radicals generated from the depleted uranium-hydrogen peroxide systems // *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007. Vol. 272 (2). P. 251-255.
7. *Takebayashi J., Chen J., Tai A.A.* Method for evaluation of antioxidant activity based on inhibition of free radical-induced erythrocyte hemolysis // *Advanced Protocols in Oxidative Stress II. Methods in Molecular Biology*, 2010. Vol. 594. P. 287-296.
8. *Wang C., Qin X., Huang B.* et al. Hemolysis of human erythrocytes induced by melamine-cyanurate complex // *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2010. Vol. 402. P. 773-777.

#### THE URANYL IONS INFLUENCE ON ERYTHROCYTE SENSITIVITY TO FACTORS INDUCING ACUTE OXIDATIVE STRESSES

O.G. Shevchenko

Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia, [shevchenko@ib.komisc.ru](mailto:shevchenko@ib.komisc.ru)

The nanomolar concentrations of  $UO_2Cl_2$  influence on erythrocyte sensitivity (*in vitro*) to factors inducing acute oxidative stress was investigated. It was showed that even a short-run exposure of uranyl ions resulted in changes in membrane physico-chemical properties. It can not only affect cells survival but significantly modify their reaction on damaging factors effect, particularly

on oxidative stress inductors action. The character of modification depends on radical source and resulted from mechanisms of the uranyl ions effect on cell and the ion ability to catalyze ROS-forming processes. The detailed investigation of mechanisms of the uranium in low concentration influence on cells is required.

---

**РОЛЬ ГЕНОВ РЕПАРАЦИИ ДНК  
В РЕГУЛЯЦИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНИ  
*DROSOPHILA MELANOGASTER*  
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМОВ ОСВЕЩЕНИЯ**

**О.А. Шосталь, А.А. Москалев**

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, [olash@list.ru](mailto:olash@list.ru)

Известно, что белки семейства *GADD45* и транскрипционный фактор *p53* играют ключевую роль в репарации ДНК и в ответе на различные виды стресса. Кроме того, данная группа генов играет важную роль в регуляции клеточного цикла, метаболизма, апоптоза, поддержании стабильности генома, клеточном старении и выживании [1-4]. Однако роль данных генов в регуляции продолжительности жизни при изменении режимов освещения ранее не изучалась. Таким образом, цель наших исследований заключалась в изучении роли генов *dGADD45* и *p53* в регуляции продолжительности жизни *Drosophila melanogaster* при изменении режимов освещения.

В работе исследовали линию дикого типа *Canton-S* в качестве контрольной линии; линию *dGADD45* – гомозигота по дефекту гена *dGADD45* (генотип:  $y^* w^*$ ;  $P\{GawB\}Gadd45NP0351$ ) и линию  $p53^{5A1-4}$  – гомозигота по дефекту гена *p53* (генотип:  $y^1 w^{1118}$ ;  $p53^{5A1-4}$ ).

Культивирование родительских линий проводили в термостате при температуре 25 °С и стандартном 12-часовом режиме освещения, в пробирках на 100 мл, содержащих 25 мл дрожжевой питательной среды. После появления имаго в течение суток производили отбор необходимого количества особей (50 особей на пробирку), предварительно наркотизировав их эфиром. Самцы и самки содержались раздельно. Особи исследуемых линий были разделены на три группы. Первая группа содержалась в условиях стандартного 12-часового освещения при интенсивности 120-130 лк, вторая – в условиях постоянного освещения (24 ч, 120-130 лк), третья – в условиях световой депривации (24 ч темноты, 0 лк). Подсчет числа умерших мух проводили ежедневно. Выживших мух еженедельно перемещали на свежую среду.

Измерение суточной активности у дрозофил с разными генотипами проводили при помощи аппаратно-программного комплекса для мониторинга активности биообъектов Trikinetics (США). Измерения осуществляли отдельно у самцов и самок при 12, 24 и 0 ч режимах освещения на 14-, 35- и 50-е дни жизни. На каждую точку брали три пробирки по 10 особей. Данные суммировались за каждый час.

У особей линий с мутациями в исследуемых генах репарации ДНК мы наблюдали более выраженные различия в продолжительности жизни при содержании в темноте и на свету по сравнению с линией дикого типа (см. таблицу). Медианная продолжительность жизни особей линии *dGADD45* достоверно снизилась на 22% у самцов при стандартном и круглосуточном режимах освещения; у самок она снизилась на 19% при стандартном режиме освещения и на 30 – при круглосуточном. Максимальная продолжительность жизни при 12-часовом режиме освещения достоверно снизилась на 14% у самцов и на 10% – у самок, при 24-часовом режиме освещения – на 17% у самцов и на 10% – у самок (см. таблицу).

У линии *p53<sup>5A-1-4</sup>* медианная продолжительность жизни при стандартном режиме освещения снизилась на 20% у самцов и на 7% – у самок, при круглосуточном – на 24% у самцов и на 37% – у самок. Максимальная продолжительность жизни при стандартном режиме освещения снизилась на 29% у самцов и на 5% – у самок, при круглосуточном – на 41% у самцов и на 42% – у самок (см. таблицу). Таким образом, особи с нарушением в генах репарации ДНК оказались более чувствительными к изменению длины светового дня и имели более выраженную разницу между продолжительностью жизни в темноте и на свету по сравнению с линией дикого типа *Canton-S*.

Измерение суточной активности самцов и самок лабораторных линий дрозофилы при разных режимах освещения (24, 12, 0 ч) в возрасте 14, 35 и 50 дней жизни показало, что суточная активность зависит от генотипа, пола и возраста мух. Самцы более активны, чем самки. С возрастом наблюдается снижение суточной активности самцов и самок исследуемых линий. Изменение режима освещения (световая депривация или удлинение светового дня до 24 ч) приводит к десинхронизации суточной активности как самцов, так и самок исследуемых линий. При этом наиболее заметное нарушение ритмов активности наблюдается при круглосуточном режиме освещения. Таким образом, полученные результаты указывают на опасность избыточного освещения и подтверждают важную роль исследуемых генов в регуляции продолжительности жизни в ответ на изменение длины светового дня.

**Параметры продолжительности жизни  
особей лабораторных линий дрозофилы  
при различных режимах освещения**

Линия	Пол	Освещение, ч	M	СПЖ	90%	min	max	MRDT	N
<i>Canton-S</i>	♂♂	24	52	51.0±0.6	66	3	70	7.4	528
		12	52	48.5±0.4	59	9	74	7.1	711
		0	52	51.6±0.7	66	8	80	7.9	412
	♀♀	24	56	52.4±0.6	66*	3	78	6.9	494
		12	59	56.5±0.6	73*	4	81	7.8	527
		0	58	56.6±0.7	77	5	84	9.4	494
<i>dGADD45</i>	♂♂	24	39*	39.6±0.6	54*	4	62	7.4	424
		12	39*	38.8±0.6	56*	4	67	9.2	425
		0	50	47.2±0.7	65	8	76	9.5	444
	♀♀	24	37*	39.5±0.6	60*	4	66	9.7	404
		12	43*	42.6±0.6	60*	4	74	8.4	453
		0	53	49.2±0.7	67	4	79	9.5	384
<i>p53<sup>5A-1-4</sup></i>	♂♂	24	38*	33.6±0.4	43*	5	44	4.2	436
		12	40*	41.4±0.5	52*	5	73	7.3	428
		0	50	49.7±0.8	73	9	82	10.4	396
	♀♀	24	41*	41.1±0.2	45*	7	51	2.4	470
		12	59*	58.3±0.6	73*	5	79	7	413
		0	65	61.8±0.8	77	22	82	7	274

*Примечание.* Различия с 0 ч освещением статистически значимы: \*  $p < 0.001$ . M – медианная продолжительность жизни; СПЖ – средняя продолжительность жизни; 90% – время жизни 90% популяции; min и max – минимальная и максимальная продолжительность жизни в выборке; MRDT – время удвоения интенсивности смертности; N – количество особей в выборке. При сравнении медианной продолжительности жизни применяли критерий Гехана-Бреслоу-Вилкоксона, при анализе времени жизни 90% популяции – критерий Ванг-Аллисона.

Исследования поддержаны грантом Президиума УрО РАН для молодых ученых и аспирантов № 13-4-НП-182 и грантами РФФИ № 12-04-31922-мол\_а и № 12-04-32261-мол\_а.

### Литература

1. Liebermann D.A., Hoffman B. Gadd45 in stress signaling // J. Mol. Signal., 2008. Vol. 12. P. 3-15.
2. Nakamura Y. Isolation of p53-target genes and their functional analysis // Cancer Sci., 2004. Vol. 95. P. 7-11.
3. Harris S.L., Levine A.J. The p53 pathway: positive and negative feedback loops // Oncogene, 2005. Vol. 24. P. 2899-2908.
4. Vazquez A., Bond E.E., Levine A.J., Bond G.L. The genetics of the p53 pathway, apoptosis and cancer therapy // Nat. Rev. Drug Discov., 2008. Vol. 7. № 12. P. 979-987.

**ROLE OF DNA REPAIR GENES IN REGULATION OF *DROSOPHILA MELANOGASTER*  
LIFE SPAN WHEN CHANGING LIGHTING CONDITIONS**

**O.A Shostal, A.A. Moskalev**

Institute of Biology of the Komi Scientific Centre of the Ural Division of RAS,  
Syktyvkar, Russia, [olash@list.ru](mailto:olash@list.ru)

The purpose of this work is to investigate the role of DNA repair genes (dGADD45, p53) in the regulation of lifespan on *Drosophila* in response to light regime alteration. It is demonstrated, that mutant strains have more significant difference between median and maximum lifespan at light and darkness conditions with comparing to wild type. The increase of the photoperiod (from 12 to 24 hours) leads to a significant reduction of lifespan of individuals with mutations in the investigated genes. The given result indicating that the risk of excessive illumination. It was shown the role of DNA repair genes in regulating lifespan of the *Drosophila melanogaster* fruit fly in response to change of photoperiod.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамова А.В.	157	Данилов А.А.	64
Алещенко А.В.	77, 95	Джафарлы А.К.	48
Андреева Л.И.	305	Джафаров Э.С.	48
Андрийчук Т.Р.	11	Джус П.П.	53
Антонова Е.В.	14, 243	Дзюбенко Е.В.	123
Антонова Н.Н.	19	Дмитриева А.В.	286
Антощина М.М.	77, 95	Добровольская Е.В.	64
Анчишкина Н.А.	68	Евсеева Т.И.	207
Архангельская Е.Ю.	68	Ермакова О.В.	31, 72, 247, 249
Асатрян А.З.	140	Жаворонков Л.П.	74
Бакунов Н.А.	119	Жапбасов Р.	229
Бакшаева М.А.	291	Загорская Н.Г.	300
Барыбин Л.Н.	100	Зайнуллин В.Г.	111, 203
Башлыкова Л.А.	199, 249	Зайцев В.В.	19
Белишева Н.К.	84, 281	Зарубин О.Л.	129, 131
Белых Е.С.	31, 203, 310	Зарубина Н.Е.	129, 131
Беляев В.В.	36	Земская Н.В.	64
Бирюков В.А.	77	Зыков С.В.	274
Боднарь И.С.	310	Исамов Н.Н.	182
Болсуновский А.Я.	57	Каглян А.Е.	123, 135
Большаинов Д.Ю.	119	Кадукова Е.М.	100, 291
Будзанивская И.Г.	266	Кадырова Н.Ж.	229
Бурдо О.О.	22	Казинская И.Е.	157
Бурлакова Е.Б.	27	Калачян Л.М.	140
Бушманов А.Ю.	68	Канева А.В.	31, 203
Вахрушева О.М.	203, 207	Каримуллина Э.М.	14, 243
Велегжанинов И.	О.31	Кизеев А.Н.	296
Вишневский Д.А.	22	Кленус В.Г.	135
Волкова Е.Н.	36	Климович М.А.	270
Волкова П.Ю.	40	Коваль А.Н.	46
Володин В.В.	305	Козлов М.В.	270
Володина С.О.	305, 322	Колганова О.И.	74
Воробьева Н.Ю.	68	Колесникова А.А.	233
Гайдар А.В.	187	Конакова Т.Н.	233
Ганжа Д.Д.	210	Копейкин В.А.	142
Гансбургский А.Н.	72	Кораблева Т.В.	72
Гераськин С.А.	40, 45, 173	Коржавин А.В.	148, 193
Годжаева Г.А.	48	Костенко С.А.	53
Гончаров С.В.	100	Котенко К.В.	68
Горяченкова Т.А.	157	Кудрин А.А.	233
Григоркина Е.Б.	214, 274	Кудрявцева А.В.	64
Грицук А.И.	46	Кудряшова О.В.	77, 95
Груздев Б.И.	203	Кудяшева А.Г.	300, 305, 322
Гудков Д.И.	123, 135, 345	Курыленко Ю.Ф.	53
Гудков И.Н.	218	Куц Ф.И.	291
Гулаков А.В.	224	Лаврентьева Г.В.	152, 191
Гулиева Л.М.	48	Лавринович Е.А.	157
Гундарова О.П.	258	Лазоренко Г.Е.	161
Гурьев Д.В.	68	Липская А.И.	22

Ломакин И.А.	105	Ракша Н.Г.	11
Луговая С.Л.	11	Раскоша О.В.	247, 249
Майстренко Т.А.	203, 310	Раčkова Н.Г.	175, 178
Макаров А.С.	119	Родионова Н.К.	123
Малюк И.А.	187	Рубанович А.В.	332
Мандрык С.Я.	11	Рябченко Н.И.	95
Маслов Н.В.	258	Савин А.О.	100
Медведева М.Ю.	57	Саженок А.Д.	187
Мейер А.В.	62	Салтанова И.В.	333
Мельник Н.А.	84	Санжарова Н.И.	182
Минаева Н.Г.	77	Сваричевская Е.В.	187
Мирзеабасов О.А.	191	Свергун В.Т.	46
Момот О.А.	191	Серебряный А.М.	77, 95
Мординова Е.А.	191	Сидоркина О.М.	336
Москалев А.А.	64, 79, 89, 109, 354	Скурат В.В.	333
Муллаярова Р.Р.	191	Смагин А.И.	286, 336
Назаров А.Б.	123, 135, 210	Сметанина Н.М.	68
Наумов А.Д.	291	Старобор Н.Н.	247, 249
Никонова М.Ф.	95	Сташкевич Д.Г.	291
Новиков А.П.	157	Сушко С.Н.	53, 100
Обеснюк В.Ф.	327	Сынзыныс Б.И.	191
Озеров И.В.	68	Талыкова Л.В.	281
Озерова Ю.Ю.	318	Таскаева А.А.	233
Оленев Г.В.	214	Тентюков М.П.	340
Омельянец Н.И.	262	Тестов Б.В.	105
Орехова Н.А.	239	Тихонова М.А.	336
Орлов О.Л.	286	Толочко Т.А.	62
Осипов А.Н.	68	Трапезников А.В.	148, 193, 203
Осипов М.В.	314	Трапезникова В.Н.	148, 193
Остапченко Л.И.	11	Тришин В.В.	187
Павленко И.О.	131, 187	Удалова А.А.	253
Павлов А.В.	72	Ушамова С.Ф.	296
Панов А.В.	182	Федоров В.П.	258
Панфилова В.В.	74	Федорова Е.В.	53
Пархоменко А.А.	36	Хоменко И.М.	262
Пастухов А.В.	164	Шадрин Д.М.	31
Пелевина И.И.	77, 95	Шапошников М.В.	64, 79, 109
Пельгунова Л.А.	169	Шафорост А.С.	100
Пенькевич В.А.	224	Шевцова Н.Л.	123, 345
Перегудова Д.О.	64, 79, 109	Шевченко А.В.	266
Петрашова Д.А.	84	Шевченко К.К.	318
Петриченко А.А.	318	Шевченко О.Г.	300, 350
Платаев А.П.	148, 193	Шилова Л.А.	64, 89
Плюснина Е.Н.	64, 79, 89, 109	Шишкина Л.Н.	270, 300
Позолотина В.Н.	14, 243	Шосталь О.А.	31, 354
Полищук В.П.	266	Шубина О.А.	182
Полякова Н.И.	169	Шуктомова И.И.	164, 178, 340
Поморцева Н.А.	135	Юшкова Е.А.	111
Поморцева Н.Л.	123	Ялковская Л.Э.	274
Попова Е.И.	148	Ярилин А.А.	95
Прилипко В.А.	318	Devyatlovskaya A.N.	238
Пришляк С.П.	36	Guseynov O.A.	238
Пустовалова М.В.	68	Kamnev A.A.	238
Пылина Я.И.	31	Kudryasheva N.S.	238
Пыстина А.В.	31, 322	Rozhko T.V.	238
Пяткова С.В.	173	Selivanova M.A.	238
Рабинович Е.И.	327	Tugarova A.V.	238
Ракитин С.Б.	214		

*Научное издание*

БИОРАД-2014

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ МАЛЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ  
И РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ СРЕДЫ

Материалы докладов Международной конференции

*Рекомендовано к изданию ученым советом Института биологии Коми НЦ УрО РАН*

Редакторы О.А. Гросу, Л.А. Федорова  
Оригинал-макет Е.А. Волкова

Лицензия № 0047 от 10.01.99.

Компьютерный набор. Подписано в печать 6.02.2014. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22.5. Уч.-изд. л. 22.5. Тираж 200. Заказ № 7.

---

Редакционно-издательский отдел Коми НЦ УрО РАН.  
167982, ГСП, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 48.