

УДК 574:57.042: (470.13-09)
DOI 10.19110/1994-5655-2020-3-28-40

**А.Г.КУДЯШЕВА*, О.В.ЕРМАКОВА*,
Т.И.ЕВСЕЕВА*,****

ИСТОРИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ КОМИ

**Институт биологии
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар*

***Акционерное общество «СевКавТИСИЗ»,
г. Краснодар*

kud@ib.komisc.ru

**A.G.KUDYASHEVA*, O.V. ERMAKOVA*,
T.I. EVSEEVA*,****

HISTORY OF RADIOECOLOGICAL RESEARCH IN THE KOMI REPUBLIC

**Institute of Biology, Federal Research Centre
Komi Science Centre, Ural Branch, RAS,
Syktuykar*

***SevKavTISIZ,
Krasnodar*

Аннотация

Представлены материалы об истории становления и развития радиоэкологических исследований в Институте биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Обоснован значимый вклад научных работ отдела радиоэкологии, его организаторов и идейных руководителей – В.И. Маслова, А.И. Таскаева – в формирование представлений о значении повышенного радиационного фона для микроэволюционных процессов, протекающих в природных популяциях растений и животных.

Ключевые слова:

Республика Коми, радиоэкология, радиобиология, малые дозы, повышенный естественный фон радиации, техногенное загрязнение, популяции растений, животных, миграция радионуклидов

Abstract

Materials on the history of formation of the Department of Radioecology of the Institute of Biology, Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch, RAS, in the Komi Republic and the results of researches on studying the effect of increased background of natural radioactivity in plant and animal populations and the migration of radionuclides in components of natural environment are presented. The main stages of the Department development are outlined and the results of research over 60 years (1959 – 2020) are summarized. The role of the founders of the Department V.I. Maslov and A.I. Taskaev in the development of radioecological research is shown. The prerequisites for the emergence of an independent direction of radioecology in the Komi Republic, where there were unique areas with naturally and technologically increased content of heavy natural radionuclides in the environment, are considered. The results of many years of radioecological monitoring revealed patterns of biological effects of low doses of ionizing radiation and related environmental factors on natural populations of plants and animals under conditions of increased levels of natural radioactivity (Ukhta region of the Komi Republic) and in the 30-km zone of the Chernobyl accident. The results of the research are considered at the population, organismal, organ, tissue and cellular-molecular levels. The increased level of natural radioactivity in the environment leads to negative changes both at the level of individual organisms and plant and animal communities. The conducted research made it possible to demonstrate that the processes occurring at the organismal and population levels in response to chronic exposure to heavy natural radionuclides do not have high specificity and are subject to general biological regularities of the reaction of living systems to adverse environmental conditions. This provides great opportunities to develop a common strategy for protecting the biosphere from these impacts. On the other hand, the half-life of many heavy natural radionuclides causes a longer duration in time of adaptive changes formed in species inhabiting territories with an increased background of natural radioactivity, compared with other situations of anthropogenic / technogenic impact on the environment.

Keywords:

the Komi Republic, radioecology, radiobiology, low doses, increased background of natural radiation, technogenic pollution, plant and animal populations, migration of radionuclides

Становление радиобиологии как самостоятельной науки во многом было связано с необходимостью решения задач, которые поставило перед человечеством развитие атомной индустрии, сопровождающееся испытаниями ядерных устройств и радиационными инцидентами. Для изучения последствий глобального увеличения радиационного фона биосферы в 1950-е гг. созданы атомные центры и научные учреждения, ориентированные на развитие нового научного направления – радиобиологии.

В Республике Коми имелись все необходимые условия и предпосылки для проведения радиационных исследований, включая наличие уникальных природных биогеоценозов с повышенным фоном естественной радиоактивности и территорий, подверженных загрязнению радиоактивными выпадениями после испытаний ядерных устройств.

Инициатором организации в Коми филиале АН СССР научного направления по радиозологии стал известный генетик П.Ф. Рокицкий, работавший с 1949 по 1957 г. заведующим отделом зоологии и животноводства в Сыктывкаре. На заседании Ученого совета при Президиуме Коми филиала 7 марта 1957 г. он выступил с докладом об итогах московского совещания Отделения биологических наук, на котором академик В.А. Энгельгард обосновал настоятельную необходимость развертывания сети научных исследований для оценки последствий для живой природы воздействия повышенных доз ионизирующих излучений. Предложение П.Ф. Рокицкого было одобрено и с особым энтузиазмом воспринято П.П. Вавиловым – председателем Президиума Коми филиала АН СССР. Он видел в новом научном направлении перспективу «прорыва», выхода на новые рубежи Коми филиала АН СССР, испытывавшего в то время существенные кадровые и финансовые трудности.

В качестве полигонов для изучения поведения радионуклидов в окружающей среде и их биологического действия были выбраны различающиеся по геохимическим и климатическим условиям территории Коми АССР с повышенным уровнем естественной радиоактивности. Разработку программы радиозологической экспедиции поручили сотруднику отдела зоологии Коми филиала АН СССР В.И. Маслову. К проведению исследований привлекли научные кадры трех отделов Коми филиала – биологии животных, биологии растений и почвоведения. Экспедиция под руководством В.И. Маслова, покинувшая начало радиозологическим исследованиям в Коми АССР, выехала в район Ухты 10 июля 1957 г. Благодаря плодотворной работе радиобиологической группы 21 сентября 1959 г. на ее основе была создана лаборатория радиобиологии в составе 12 чел. во главе с В.И. Масловым (фото 1). С этих пор при активной консультативной поддержке д.б.н. И.Н. Верховской начались углубленные исследования природных биогеоценозов в районах повышенной естественной радиоактивности [1].

Первый этап становления и развития радиозологии в Коми АССР (1957–1982 гг.) смело можно назвать эпохой В.И. Маслова. Его глубокая приверженность традициям российского естествознания – комплексный подход к изучению природных феноме-



Фото 1. Всеволод Иванович Маслов (1917–1994)

Photo 1. V.I. Maslov (1917–1994)

нов – предопределил успех и всемирное признание выполненных в те годы исследований. С 1957 по 1970 гг. в пределах обширного региона была проведена инвентаризация территорий с повышенным уровнем естественной радиации – в пос. Водный Ухтинского района, на Южном, Северном и Полярном Урале, Среднем Тимане. Эти участки надолго стали основными стационарами для изучения влияния повышенного фона естественной радиации на природные биогеоценозы [1].

Актуальность и востребованность результатов первых научных работ радиозологов Коми филиала АН СССР сделала целесообразным создание отдела радиобиологии, который был основан 16 января 1965 г. В его состав вошли специалисты в области радиохимии и физики, экологии водных и наземных организмов, почвоведения, медицины и математики. На новой научно-исследовательской основе под руководством И.Н. Верховской при активном участии сотрудников отдела радиобиологии В.И. Маслова и В.С. Никифорова созданы методологическая база и тематические модели для комплексного радиозологического мониторинга экосистем с повышенным фоном естественной радиации. С целью определения ультрамалых количеств радиоактивных элементов в природных объектах модифицированы существующие методы радиохимического анализа, что позволило впервые получить содержательное представление об удельной активности родоначальников радиоактивных семейств – ^{238}U , ^{232}Th – и продуктов их распада в почвах, водных объектах, организме животных и растений из природных популяций [2].

На основе проведенных исследований были определены виды-биоиндикаторы для изучения биологических эффектов, обусловленных присутствием в среде обитания повышенных концентраций тяжелых естественных радионуклидов (ТЕРН). Обнаружено нарушение терморегуляции организма, высокая за-

раженность эктопаразитами, снижение упитанности, стрессоустойчивости и, как следствие, численности популяций животных, тесно контактирующих с содержащимися в почвенном покрове радионуклидами уранового и ториевого рядов [3].

Выявленные значимые негативные изменения в популяциях животных, обитающих в условиях относительно низких доз радиации, требовали доказательств связи этих эффектов с радиационным воздействием.

Под руководством П.П. Вавилова сотрудником отдела радиобиологии О.Н. Поповой был впервые проведен уникальный эксперимент по оценке разделного и совместного действия внешнего облучения и инкорпорированных радионуклидов на экспериментальные популяции растений, помещенных в природные условия. Установлена более высокая биологическая эффективность совместного действия инкорпорированных ТЕРН и внешнего излучения по сравнению с влиянием одного только γ -фона. Обнаружены различия в спектре цитогенетических нарушений, индуцируемых в разных условиях облучения растений [4,5].

Гистоморфологические исследования по оценке влияния повышенного фона естественной радиации на репродуктивную систему мелких млекопитающих показали высокую радиочувствительность сперматогенного эпителия. Изменения, происходящие в гонадах, как было установлено, представляли собой сложный комплекс деструктивных и компенсаторно-репаративных процессов, влияющих в целом на состояние популяции [6].

Первые исследования последствий хронического действия ионизирующего излучения (ИИ) в низких дозах на организм человека были проведены с 1959 по 1961 гг. медицинской группой радиобиологической экспедиции под руководством врача Е.И. Харечко и сотрудника лаборатории радиобиологии, заслуженного врача Коми АССР Я.И. Каминского при участии специалистов Минздрава СССР. Обследована радиационная обстановка территории пос. Водный, а также физическое состояние и полный спектр соматических изменений вегетативной нервной системы, опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения, системы крови у детского населения, коренных жителей и персонала радиевого производства, что позволило выработать мероприятия по радиационной защите и реабилитации здоровья населения [7]. Дальнейшие исследования, проведенные в 1960-е гг. П.А. Бородкиным, Н.С. Катаевой, В.А. Беляковым, выявили различия в структуре и частоте встречаемости заболеваний среди населения, проживающего на территории с повышенным фоном радиации в пос. Водный, по сравнению с жителями селений с нормальным радиационным фоном [1].

Достоверно установленные неблагоприятные последствия радиационного воздействия на организм человека и природные популяции растений и животных поставили задачу оценки миграционной способности ТЕРН по трофическим цепям. В ходе многолетних исследований Д.М. Рубцовым выявлены зональные черты распределения ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th в профиле горных, лесных и тундровых почв и изучено взаимодействие тонкодисперсных фракций, содержащих радиоэлементы, с минералами группы цео-

литов и органическими коллоидными системами почв [1]. Установлены закономерности миграции ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах северной тайги. Проведена оценка влияния различных доз и видов удобрений на подвижность радионуклидов в пойменной дерново-луговой почве и поступление их в сельскохозяйственные растения. Проведенные исследования легли в основу прогноза долговременной миграции радионуклидов в почвах таежной зоны [8]. В результате были определены коэффициенты биологического поглощения ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th разными видами растений и обнаружен акропетальный тип распределения этих элементов в культурных и дикорастущих видах [9].

Негативные изменения, выявленные в популяциях растений и животных с участков с высоким содержанием природных радионуклидов, поставили задачу разработки мероприятий по снижению уровня радиоактивности этих территорий. В начале 1960-х гг. была проведена дезактивация радиоактивных отходов насыпным методом [10]. Примененный метод показал свою эффективность лишь в течение первых трех лет. Растительность, обживающая дезактивационную песчано-гравийную смесь, способствовала, с одной стороны, формированию условий для жизнедеятельности животных организмов, с другой – обусловила вовлечение в биологический круговорот тяжелых естественных радионуклидов, явившихся причиной токсических и мутагенных эффектов, обнаруживавшихся на протяжении всех лет исследования природных популяций с дезактивированных территорий.

Вклад радиоэкологов Республики Коми в развитие методологических и методических основ нарождающегося научного направления – радиоэкологии – был настолько ощутим, что г.Сыктывкар в 1967 г. стал местом проведения первого радиоэкологического форума страны – Всесоюзного радиоэкологического симпозиума по методам радиоэкологических исследований. Здесь коллективом отдела радиобиологии были подведены итоги комплексных исследований закономерностей миграции естественных радионуклидов в различных компонентах природных биогеоценозов, а также биологических эффектов, вызываемых у растений и животных ионизирующей радиацией [2].

В.И. Маслов координировал все исследования, которые проводили в отделе, но особое внимание он уделял изучению биологического действия малых доз ионизирующих излучений на организм и популяции млекопитающих. Организация и проведение долговременного радиоэкологического мониторинга строились на основе комплексной программы, учитывающей взаимодействие всех основных биотических и абиотических компонентов природных биогеоценозов с повышенным уровнем естественной радиации. Разработанный комплексный метод радиоэкологических исследований предусматривает изучение биологического действия ионизирующих излучений на разных уровнях организации от молекулярного и клеточного до популяционного, что позволяет выяснить механизмы радиочувствительности и адаптации организма и популяций к действию малых доз радиации. В.И. Масловым был введен термин «радиоэкологический фактор», включающий в себя

совокупное действие повышенного фона радиации с геохимическими, климатическими и другими природными и техногенными условиями [11]. На основе многолетних исследований им была создана классификация млекопитающих и птиц северной тайги, которая предусматривала деление животных на три радиоэкологические группы: тесного, умеренного и слабого контакта с радиоактивными веществами. В основу классификации были положены степень накопления урана, радия и тория в организме животных и экологические особенности обитания вида [3]. Анализ полученных результатов позволил углубить теоретические представления о биологическом круговороте природных радионуклидов и оценке роли мышевидных грызунов в этом процессе [12].

Материал о творчестве В.И. Маслова и сотрудников руководимого им отдела радиоэкологии будет не полным, если не упомянуть о трудностях, которые выпали на последние годы его работы. Это не были привычные заботы об организации и проведении научных исследований, о добывании материальных средств, поиске свежих сил и неординарных умов. Снижение интереса к радиоэкологическим исследованиям стало куда большим испытанием. Но даже на фоне многократных попыток «сворачивания» радиоэкологического направления сотрудники отдела не переставали верить в перспективность выбранной ими тематики – установление закономерностей биологического действия низких доз ионизирующих излучений на разных уровнях организации живой природы.

В настоящее время, когда проблема «малых доз» стала ведущим направлением в мировой радиобиологии, мало кто знает о том, что именно в отделе радиоэкологии Коми филиала АН СССР были получены первые данные о повышенной биологической эффективности малых доз ионизирующих излучений. Эти невостребованные в то время работы осуществлялись благодаря незаурядной научной интуиции, настойчивости и высокому чувству гражданского долга В.И. Маслова [13].

Проведенные сотрудниками отдела радиоэкологии комплексные исследования наземных экосистем с повышенным фоном естественной радиации получили высокую оценку на выездной сессии Научного совета по проблемам радиобиологии АН СССР, на Бюро Отделения биохимии и биофизики физиологически активных соединений. Материалы исследований прозвучали на международных симпозиумах в Швеции (1967) и Франции (1969).

Дальнейшее развитие ядерной индустрии поставило перед учеными новые задачи, связанные с совершенствованием методов дозиметрии, оценкой скорости включения радиоактивных изотопов в биологический круговорот, путей их миграции в геосфере и биосфере, изучением биологических эффектов на экосистемном уровне и использованием энергии ядра в мирных целях.

Имея уникальный опыт проведения долгосрочного радиоэкологического мониторинга в условиях природных биогеоценозов, отдел радиоэкологии Института биологии Коми филиала АН СССР в тесном сотрудничестве с крупнейшими радиоэкологическими центрами страны активно включился в решение проблем радиоактивного загрязнения биосферного

масштаба.

В 1973 г. на Всесоюзном симпозиуме по теоретическим и практическим проблемам действия малых доз ионизирующих излучений в г.Сыктывкаре был поднят вопрос о создании на базе радиоэкологического стационара Республики Коми Всесоюзного центра радиоэкологических исследований. В соответствии с этими рекомендациями здесь начали работу несколько лабораторий ИЭМЭЖ РАН, руководимых Д.А. Криволуцким, М.Ф. Поповой, Б.М. Граевской. Представитель кафедры геохимии МГУ – Н.А. Титаева – участвовала в проведении совместных научно-исследовательских работ на четырех стационарах в разных природных зонах Коми республики. Сотрудники Института общей генетики АН СССР, возглавляемые д.б.н. В.А. Шевченко, проводили работы на горно-таежном радиоэкологическом стационаре. В развитии нового научного направления оказали неоценимую консультативную помощь академик ВАСХНИЛ П.П. Вавилов, профессор П.Ф. Рокицкий, профессор И.Н. Верховская, чл.-корр. АН СССР А.М. Кузин, академик ВАСХНИЛ В.М. Клечковский. Куратором и консультантом этих масштабных исследований многие годы был д.б.н., академик Р.М. Алексин.

27 октября 1978 г. в связи с расширением направлений исследований отдел радиобиологии был переименован в отдел радиоэкологии. В этот период А.И. Таскаевым и Р.М. Алексиным разработан и апробирован на примере участков с повышенным фоном естественной радиации в пос. Водном картографо-статистический метод изучения латерального распределения радионуклидов в почвенно-растительном покрове [14]. Был предложен метод изучения по изотопным отношениям путей перераспределения радионуклидов в окружающей среде, позволивший выявить преобладающее направление миграции радионуклидов в генетических горизонтах различных типов почв в условиях гумидной зоны, определить основные формы нахождения радионуклидов в почвах, оценить различия миграционной способности отдельных радионуклидов, в том числе изотопов одного и того же элемента, в системе почва–растения и использовать этот показатель в качестве индикаторов интенсивности и направленности миграционных процессов как непосредственно в почвах, так и в системе почва – растение [15,16].

В 1970–1980-х гг. закладываются основы для понимания молекулярных и клеточных механизмов действия ионизирующих излучений. Проводимое сотрудниками группы гистоморфологии К.И. Масловой, Л.Д. Материй и О.В. Ермаковой изучение состояния органов и тканей репродуктивной, иммунной эндокринной систем и системы крови позволило выявить закономерности развития деструктивных и компенсаторных процессов, а также пути формирования необратимых патологий у мышевидных грызунов. Установлено, что патоморфологические изменения формируются на фоне активно протекающих компенсаторно-восстановительных процессов, направленных на приспособление организма к условиям повышенной радиоактивности. С другой стороны, активизация компенсаторных реакций, создавая напряженное состояние, усугубляет патологические процессы. Степень выраженности биологических

эффектов существенно зависит от генезиса радиоактивного загрязнения, уровня γ -фона, популяционных параметров (пола, возраста, фазы популяционного цикла, миграционной активности животных), а также от других факторов нерадиационной природы [17, 18]. В этот же период исследований выявлены нарушения белкового обмена у полевки-экономки и в качестве чувствительного теста на облучение предложено использовать определение активности сывороточных эстераз [19]. Дальнейшие многолетние биохимические исследования показали, что длительное обитание полевки-экономки в условиях повышенного уровня естественной радиации приводит к дисбалансу процессов энергетического обмена. Установлено, что обнаруженные сдвиги активности дегидрогеназ у полевок, обитающих в биоценозах с повышенным уровнем естественной радиации, во многом зависят от исходного функционального уровня метаболизма и обусловлены взаимодействием факторов радиационной и нерадиационной природы [20, 21].

В 1980-е гг. Т.М.Семяшкиной под руководством Д.А. Криволуцкого проведена оценка опасности радиоактивного загрязнения почвенного покрова с использованием биоиндикационного подхода. Показано уменьшение численности и изменение видового состава почвенной мезофауны, обитающей в условиях хронического воздействия радионуклидов уранового и ториевого рядов [22].

В 1984 г. заведующим отделом радиоэкологии становится А.И. Таскаев (фото 2). К тому времени вышла в свет его первая монография в соавторстве с Н.А. Титаевой «Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны». Этот фундаментальный научный труд привнес в радиоэкологию новые знания о распределении и закономерностях миграции изотопов урана и тория. А.И. Таскаев с уверенностью принял эстафету от В.И. Маслова, продолжил развивать его идеи и способствовал становлению и развитию в отделе новых научных направлений, включая радиационную генетику, гистоморфологию, биохимию, экологическую токсикологию, молекулярно-клеточную биологию, геронтологию, которые до настоящего времени составляют основу научных исследований отдела радиоэкологии.

В период с 1959 по 1986 гг. сотрудниками отдела радиоэкологии по итогам проведенных исследований было опубликовано три монографии [17, 23, 24] и 233 статьи, защищены 15 диссертаций на соискание ученой степени кандидата биологических наук.

С 1986 г. начинается новый период в развитии радиобиологии и радиоэкологии. Авария на Чернобыльской АЭС отсеяла скептические взгляды на необходимость развития этой тематики. Как писал известный радиоэколог, д.б.н., профессор кафедры радиоэкологии МГУ Ф.А. Тихомиров: «Чернобыльская авария показала нам, как мало мы знаем о действии ионизирующих излучений на живую природу. Многие известные нам приемы ликвидации последствий загрязнения экосистем радионуклидами оказались неэффективными в условиях чернобыльской катастрофы. Поэтому никогда не переставайте изучать предмет, даже если вам показалось, что вы знаете о нем все. При пристальном рассмотрении будут открываться все новые его свойства» [25]. Оценка послед-

ствий аварии на Чернобыльской АЭС позволила выявить ранее неизвестные феномены и раскрыть новые механизмы действия ионизирующей радиации на биологические системы, получить обширный материал о закономерностях миграции в природных и аграрных экосистемах радионуклидов искусственного происхо-



Фото 2. Анатолий Иванович Таскаев (1944–2010)

Photo 2. A.I. Taskaev (1944–2010)

ждения, особенностях формирования дозовых нагрузок на биоту.

Сотрудники отдела выполнили широкомасштабные исследования в зоне отчуждения на ЧАЭС, используя предшествующий опыт работ на полигонах с повышенным содержанием ТЕРН в Республике Коми. Радиоэкологический мониторинг в зоне аварии включал в себя комплексное изучение отдельных элементов природных экосистем (почва, лес, травянистый покров, мышевидные грызуны, почвенная фауна, дроздофила). Были изучены последствия воздействия радиоактивных выбросов на лесные экосистемы, дан прогноз общего состояния лесов и представлены рекомендации по экологической рекультивации в 30-километровой зоне [26]. Обследование природных популяций растений подтвердило сложившееся представление о травянистой флоре как о достаточно устойчивой к действию ионизирующих излучений. Для чувствительных видов отмечены изменения в генетической структуре популяций, возрастание общей резистентности в условиях длительного хронического облучения ценоза [27]. В мониторинге мышевидных грызунов были использованы экологические, гистоморфологические, биохимические, биофизические и цитогенетические методы исследования. Выявлен сложный комплекс многообразных морфофункциональных сдвигов, характеризующих периоды развития лучевой патологии у разных поколений [28]. У животных из зоны аварии обнаружен сложный комплекс биохимических и

биофизических изменений, обусловленных соотношением процессов поражения и компенсаторно-восстановительных реакций. Сохранение измененного клеточного метаболизма в органах мышевидных грызунов в течение длительного времени способствует разрыву взаимосвязи между биохимическими и биофизическими показателями и переходу клеточных систем регуляции в новое стандартное состояние [29]. В первые годы после аварии цитогенетический анализ выявил высокий уровень нарушений у мышевидных грызунов [30]. Впервые были представлены данные о цитогенетических последствиях облучения для человека *in vivo* в условиях радиоактивного загрязнения в зоне аварии на ЧАЭС [31].

Изучены генетические эффекты в популяциях мышевидных грызунов и дрозофилы из зоны аварии на ЧАЭС (1986–1989 гг.) [32]. В экспериментальных условиях на мутантных линиях дрозофилы *mei-9* и *rid(2)201G-1* подтверждены данные, полученные в натуральных условиях, об увеличении генетического груза в популяциях в зависимости от мощности и величины поглощенной дозы и длительности облучения [33].

Итоги 10-летнего изучения радиозэкологической обстановки в зоне аварии представлены более чем в 200 научных публикациях, в том числе в восьми монографиях. В период с 1986 по 2000 гг. защищены три докторские и пять кандидатских диссертаций.

Изучение последствий воздействия аварийных выбросов ЧАЭС на наземные экосистемы снова продемонстрировало высокую биологическую эффективность низких доз ионизирующих излучений. Стало очевидно, что выявленные радиозэкологами Коми научного центра негативные изменения в популяциях животных и растений с территорий повышенного фона естественной радиации не являются артефактом и могут наблюдаться в разных радиозэкологических ситуациях. Это стало импульсом к активному развитию новых направлений в отделе радиозэкологии, способствующих углубленному пониманию процессов, протекающих в биосфере в условиях растущего техногенного влияния, включая фактор повышенной радиации.

На первый план выдвигаются проблемы оценки состояния природных популяций, обитающих длительное время в условиях хронического облучения в малых дозах, и зависимости наблюдаемых эффектов от факторов радиационной и нерадиационной природы.

При изучении ранних и отдаленных изменений структурно-функциональных характеристик эндокринной системы и системы крови, печени и органов размножения установлены гистоморфологические и гормональные механизмы адаптивных и деструктивных реакций этих органов и тканей в ответ на воздействие ионизирующих излучений и факторов нерадиационной природы. В специальных экспериментах по дополнительному к облучению воздействию стрессирующих факторов в дозах, не вызывающих выраженных повреждающих эффектов у мышевидных грызунов, удалось зафиксировать не только типы клеточных перестроек, но и процессы, протекающие в различные сроки после облучения. Многолетние данные свидетельствуют о том, что

хроническое воздействие ионизирующей радиации в малых дозах приводит к закономерному развитию морфологических перестроек на уровне клеток, тканей, органов и структурно-функциональных единиц. Выраженность этих изменений не имеет линейной зависимости от дозы облучения, что обусловлено комплексным воздействием факторов как радиационной, так и нерадиационной природы. В условиях радиоактивного загрязнения среды обитания ионизирующее излучение модифицирует влияние экзогенных (высокая плотность популяции грызунов, химически токсичные вещества) и эндогенных (беременность, половое созревание) факторов на состояние эндокринных желез мышевидных грызунов, и может вызывать перестройки таких базисных гистогенетических процессов, как пролиферация и дифференцировка клеток и тканей. Это приводит к формированию отклонений в нормальном строении тканей, изменению их клеточного состава и в конечном итоге – изменению адаптивных реакций [34, 35].

Показано, что в условиях хронического воздействия радионуклидов уранового и ториевого рядов в популяциях животных и растений протекают микроэволюционные процессы, выражающиеся в длительно существующем повышенном уровне генетической изменчивости и элиминации из популяций особей с наибольшим количеством повреждений [36,37]. Внешнее облучение выступает в качестве фактора отбора, увеличивая частоту эмбриональных летальных мутаций у растений, а инкорпорированный в надземной массе ^{230}Th определяет не только уровень внутривидовой цитогенетической изменчивости, но и, увеличивая вариабельность растений по чувствительности к внешним воздействиям, возможности их адаптации. Ведущим фактором, обуславливающим высокий уровень в клетках растений двойных фрагментов – маркеров радиационного воздействия, – является инкорпорированный ^{226}Ra .

С 1990 г. важнейшим направлением отдела радиозэкологии становится выявление закономерностей совместного действия факторов радиационной и нерадиационной природы на разные уровни организации живого. В экспериментальных исследованиях было показано, что зависимость «доза – эффект» при действии на животных и растения низких доз гамма-излучения нелинейна и характеризуется наличием диапазонов, различающихся уровнем индуцируемых повреждений и механизмами их реализации. Проанализированы результаты исследований совместного и раздельного действия на растения и животных радионуклидов и тяжелых металлов. Установлено, что синергические ответные реакции растений и животных являются закономерными событиями и возникают с наибольшей вероятностью при низкоинтенсивных воздействиях, характерных для условий окружающей среды [37–40, 41]. Результат взаимодействия зависит от величины, соотношения доз и концентраций действующих агентов [37–40], от последовательности действия факторов, функциональных свойств исследуемой ткани [42, 43].

По этой причине реально наблюдаемый уровень биологических эффектов в природных популяциях, населяющих радиоактивно загрязненные тер-

ритории, существенно отличается от прогнозируемого на основе результатов экспериментальных исследований отдельного действия факторов. В этих условиях как внешнее облучение в малых дозах, так и инкорпорированные тяжелые естественные радионуклиды оказывают достоверное влияние на уровень генетической изменчивости в популяциях и возможности их адаптации к конкретной радиоэкологической ситуации [37–45].

В начале XXI столетия результаты 60-летнего мониторинга северотаежных экосистем с повышенным фоном естественной радиоактивности, проводимого отделом радиоэкологии, позволили сделать выводы, ставшие незаменимой основой для решения проблем защиты окружающей среды от радиационных воздействий и реабилитации техногенно загрязненных территорий.

Установлено, что при формировании дозовых нагрузок преимущественно за счет внутреннего облучения от инкорпорированных ТЕРН, дополнительного воздействия повышенных концентраций химически токсичных элементов и экстремальных климатических условий негативные изменения затрагивают процессы, происходящие как на уровне отдельных организмов, так и сообществ растений и животных.

Протяженные во времени функциональные изменения ослабляют жизненные ресурсы организмов, слагающих популяции, и являясь своеобразной «ценой адаптации», отражают общебиологическую закономерность, которая состоит в том, что все приспособительные реакции организма обладают лишь относительной целесообразностью. Наиболее благоприятные индивидуальные адаптации складываются в интегральный популяционный ответ – постепенно формируется повышенная среднепопуляционная устойчивость к разным по своей природе воздействиям.

Уникальные адаптивные возможности растений позволили им за 18–19 лет заселить безжизненное пространство радиоактивных отвалов и сформировать многоярусное сообщество за счет расселения наиболее устойчивых к радиоактивному и химическому загрязнению видов. Основным механизмом поддержания популяционного гомеостаза и обеспечения постоянства численности индикаторного вида – полевков-экономок – явилось увеличение интенсивности их размножения.

Процессы, происходящие на организменном и популяционном уровнях в ответ на хроническое воздействие тяжелых естественных радионуклидов, не обладают высокой специфичностью и подчиняются общебиологическим закономерностям реакции живых систем на неблагоприятные условия окружающей среды. Это дает широкие возможности для выработки общей стратегии защиты биосферы от неблагоприятных воздействий. С другой стороны, исчисляемый миллиардами лет период полураспада многих тяжелых естественных радионуклидов обуславливает большую длительность развертывания во времени адаптивных изменений, формирующихся у видов, населяющих территории с повышенным фоном естественной радиоактивности, по сравнению с другими ситуациями антропогенного/техногенного воздействия на окружающую среду. Это привносит определенную специфику в оценку риска для компонентов

окружающей среды тех стадий ядерного топливного цикла, которые связаны с попаданием в экосистемы избыточных концентраций ТЕРН, и требует применения обеспечивающих долгосрочную защиту методов реабилитации загрязненных территорий. В частности, в таких ситуациях можно рекомендовать метод консервации радиоактивных отходов и грунтов, состоящий в создании многоступенчатой системы физических и геохимических барьеров, способных обеспечить радиоэкологическую безопасность для населения и окружающей среды в годовом цикле и на долговременную перспективу [46].

Напротив, дезактивация насыпным методом, не препятствуя включению радионуклидов в почвообразование и биогенные циклы миграции, позволяет не более чем в три раза снизить радиационный фон территории и эффективна лишь в течение 5-летнего периода после применения, а потому не может рекомендовать себя в долговременной перспективе [47,48].

Полученные за многолетний период фундаментальные знания о биологических эффектах повышенных доз радиации позволили на современном этапе перейти от изучения радиационного фона как фактора среды обитания к использованию ионизирующего излучения как инструмента для познания молекулярных механизмов функционирования живых организмов. Интенсивно развиваются исследования в области геронтологии и молекулярной биологии под руководством д.б.н., чл.-корр. РАН А.А. Москалева и к.б.н. М.В. Шапошникова. С использованием классического объекта генетических исследований – *Drosophila melanogaster* – получены экспериментальные подтверждения участия процессов распознавания и репарации поврежденных ДНК, а также белков теплового шока в естественном и радиационно-индуцированном старении [49–52].

Заключение

На сегодняшний день отдел радиоэкологии Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН остается одним из известнейших в России и за рубежом научных подразделений, занимающихся решением задач фундаментальной и прикладной радиоэкологии. Роль системных радиоэкологических исследований многократно возрастает в связи с необходимостью решения инновационных задач ядерной энергетики и разработки стратегии развития атомной промышленности России в XXI в. Полученные в радиоэкологии результаты, раскрывающие отдаленные последствия хронического воздействия повышенного фона естественной радиоактивности на разных уровнях биологической организации, являются одними из надежных фундаментов для развития теории и практики радиационной защиты человека и окружающей среды с применением интеграционных подходов. Неопровержимым подтверждением признания научных трудов отдела радиоэкологии на международном уровне является тот факт, что в современной базе данных FREDERICA, объединившей накопленные в мировой литературе с конца 1960-х гг. до настоящего времени знания о действии ионизирующих излучений на растения, животных, их популяции и экосистемы, 15% библиографических ссылок по Чернобыльской тематике принадле-

жит сотрудникам отдела радиоэкологии, а по биологическим эффектам повышенного фона естественной радиоактивности – 90%. Это составляет 60 % всех публикаций отдела радиоэкологии, вышедших в открытой печати с самого момента его основания.

Литература

1. *Итоги исследований по радиоэкологии и радиобиологии в Институте биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (к 40-летию отдела радиоэкологии)*/ А.И. Таскаев, А.Г. Кудяшева, О.Н. Попова, Л.Д. Материй, И.И. Шуктомова, Н.П.Фролова, Г.М. Козубов, В.Г. Зайнуллин, О.В. Ермакова, А.О. Ракин, Л.А.Башлыкова // Радиационная биология. Радиоэкология. 2000. Т.40. № 1. С.118–125.
2. *Методы радиоэкологических исследований*. М.: Атомиздат, 1971. 260 с.
3. *Маслов В.И., Маслова К.И.* Радиоэкологические группы млекопитающих и птиц биогеоценозов районов повышенной естественной радиоактивности // Радиоэкологические исследования в природных биогеоценозах. М.: Наука, 1972. С. 161–173.
4. *Вавилов П.П., Верховская И.Н., Попова О.Н., Коданева Р.П.* Об угнетающем действии малых доз ионизирующих излучений на вегетирующие растения // Радиобиология. 1966. Т. 6. № 2. С. 278–293.
5. *Вавилов П.П., Верховская И.Н., Попова О.Н., Коданева Р.П.* Условия накопления радия растениями из почвы // Радиоэкологические исследования в природных биогеоценозах. М.: Наука, 1972. С. 95–103.
6. *Верховская И.Н., Маслов В.И., Маслова К.И.* Действие малых доз радиации и инкорпорированных естественно-радиоактивных элементов на сперматогенез полевок-экономок (*Microtus oeconomus*) в природных условиях // Радиобиология. 1965. Т.5. Вып. 5. С.720–729.
7. *Влияние малых доз ядерных излучений на живые организмы в районах повышенной естественной радиации*/ П.П.Вавилов, В.И. Маслов, Э.И.Попова, Т.А.Власова, З.Г.Ивлева, Р.П.Коданева, С.Н.Катаева, Я.И.Каминский, К.И.Маслова, В.Я.Овченков, О.Н. Попова, Г.В.Русанова, Г.В. Попова, А.Д. Чистяков, А.Н. Басырова, Г.И. Есова, Р.С. Кочанова/ Рук. П.П. Вавилов, науч. консультант И.Н. Верховская. Отчет за 1960 г. Сыктывкар, 1961. Ф. 1. Оп. 14. Д. 11. 372 л.
8. *Русанова Г.В.* Микроморфология антропогенно измененных почв. Екатеринбург, 1988. 158 с.
9. *Груздев Б.И., Рубцов Д.М.* Накопление тория, урана и радия растениями и органогенными горизонтами почв // Радиоэкологические исследования в природных биогеоценозах. М.: Наука, 1972. С. 112–123.
10. *Вавилов П.П., Груздев Б.И., Маслов В.И.* Итоги многолетнего эксперимента по дезактивации радиевых и урано-радиевых загрязнений в условиях средней тайги // Экология. 1977. Т. 17. № 6. С. 32–38.
11. *Maslov V.I., Maslova K.I., Verchovskaya I.N.* Characteristic of the radioecological groups of mammals and birds of biogeocoenosis with increased natural radiation // Radiological contraction processes. London, 1966. P. 561–571c.
12. *Маслов В.И.* Миграция урана, радия и тория в системе почва-растения и роль мышевидных грызунов в этих процессах: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1972. 17 с.
13. *Кудяшева А.Г.* К 100-летию Всеволода Ивановича Маслова (04.01.1917– 20.06.1994) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т.57. Вып. 2. С. 238–240.
14. *Таскаев А.И., Алексахин Р.М.* Решение некоторых вопросов радиоэкологии с помощью картографостатистического метода // Вопросы радиоэкологии наземных биогеоценозов. Сыктывкар, 1974. С. 32–39.
15. *Шуктомова И.И., Таскаев А.И., Титаева Н.А.* Определение изотопного состава урана и тория в почвенных и растительных образцах// Радиохимия. 1983. Т. XXV. Вып. 4. С.547–550.
16. *Шуктомова И.И., Таскаев А.И.* Влияние интенсивной химизации сельского хозяйства на накопление естественных радионуклидов в почве и продукции растениеводства. М. : ЦИНАО, 1986. С. 54–59.
17. *Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере (миграция и биологическое действие)*. М.: Наука, 1990. 368 с.
18. *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.
19. *Алиев А.Т., Кашкин К.П.* Эстеразы плазмы крови полевок-экономок (*Microtus oeconomus*), обитающих в условиях повышенного уровня естественной радиации // Радиобиология. 1973. Т. 13. Вып. 4. С. 598–601.
20. *Кудяшева А.Г.* Активность дегидрогеназ (сукцинатдегидрогеназы, пируватдегидрогеназы и лактатдегидрогеназы) в тканях полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в условиях повышенной радиоактивности : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев, 1986. 24 с.
21. *Пикулев А.Т., Кудяшева А.Г., Таскаев А.И.* Влияние хронического гамма-облучения на активность дегидрогеназ в тканях полевок-экономок и их потомства, обитающих в условиях повышенной радиоактивности // Радиобиология. 1987. Т. 27. Вып. 2. С. 218–223.
22. *Криволуцкий Д.А., Семяшкина Т.М., Ми-*

- хальцова З.А., Турчанинова В.А. Дождевые черви как биоиндикатор радиоактивного загрязнения почвы // Экология. 1980. № 6. С. 67–72.
23. Рубцов Д.М. Гумус и естественные радиоактивные элементы в горных почвах Коми АССР. Л.: Наука, 1974. 74 с.
24. Титаева Н.А., Таскаев А.И. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны. Л.: Наука, 1983. 232 с.
25. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры/Р.М. Алексахин, Л.А. Булдаков, В.А. Губанов, Е.Г. Дрожко, Л.А. Ильин, И.И. Крышев, Л.А. Линге, Г.Н. Романов, М.Н. Савкин, М.М. Сауров, Ф.А. Тихомиров, Ю.Б.Холина. М.: Издат, 2001. 751с.
26. Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений. СПб.: Наука, 1994. 256 с.
27. Попова О.Н., Таскаев А.И., Фролова Н.П. Генетическая стабильность и изменчивость семян в популяциях травянистых фитоценозов в районе аварии на Чернобыльской АЭС. СПб.: Наука, 1992. 144 с.
28. Материй Л.Д., Ермакова О.В. Гистоморфологические критерии радиоактивного загрязнения среды. Сыктывкар, 1993. 24 с. (Сер. «Научные доклады» /Коми НЦ УрО РАН; Вып. 312).
29. 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.
30. Зайнуллин В.Г., Ракин А.О., Таскаев А.И. Динамика частоты цитогенетических нарушений в микропопуляциях мышевидных грызунов, обитающих в районе аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1994. Т. 34. Вып. 6. С. 852–857.
31. Results of cytogenetic examination of liquidators of the Chernobyl NNP accident/ V.G. Zajnullin, P.A. Borodkin, S.I. Chernyak, Y.N. Skaletskij, A.V. Sevankaev, V.A. Shevchenko// Радиобиология. 1992. Т. 32. № 5. С. 668–672.
32. Зайнуллин В.Г. Генетические эффекты действия хронического облучения малыми дозами ионизирующего излучения. СПб.: Наука, 1998. 105 с.
33. Seymour, Carmel Mothersill. Effects of Historic Radiation Dose on the Frequency of Sex-Linked Recessive Lethals in Drosophila Populations Following the Chernobyl Nuclear Accident/ Samuel Hancock, Nguyen T.K. Vo, Soo Hyun Yun, Vladimir G. Zainullin, Colin B. // Environmental Research. 2019. Vol. 172. P.333–370.
34. Ермакова О.В. Структурные перестройки периферических эндокринных желез мышевидных грызунов в условиях хронического облучения в малых дозах : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ, 2008. 45 с.
35. Ермакова О.В., Павлов А.В., Кораблева Т.В. Цитогенетические эффекты в фолликулярном эпителии щитовидной железы при длительном воздействии гамма-излучения в малых дозах// Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. Вып. 2. С. 160–166.
36. Евсеева Т.И., Гераськин С.А., Майстренко Т.А., Белых Е.С. Проблемы количественной оценки биологических эффектов совместного действия факторов радиационной и химической природы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т.48. №2. С. 203–211.
37. Estimation of ionizing radiation impact on natural Vicia cracca populations inhabiting areas contaminated with uranium mill tailings and radium production wastes / T.Evseeva, T.Majstrenko, S.Geras'kin, J.Brown, E.Belykh// Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407. P. 5335–5343.
38. Евсеева Т.И., Гераськин С.А. Сочетанное действие факторов радиационной и нерадиационной природы на традесканцию. Екатеринбург, 2001. 156 с.
39. Евсеева Т.И., Гераськин С.А., Шуктомова И.И., Храмова Е.С. Комплексное изучение радиоактивного и химического загрязнения водоемов в районе расположения хранилища радиоактивных отходов // Экология. 2003. № 3. С. 176–183.
40. Evseeva T.I., Geras'kin S. A., Shuktomova I. I. Genotoxicity and toxicity assay of water sampled from a radium production industry storage cell territory by means of Allium-test // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 68. P. 235–248.
41. Ermakova O.V. Comparative Morphological Analysis of Peripheral Endocrine Glands of Small Mammals Inhabiting Areas with High Levels of Radioactivity and Exposed to Chronic Irradiation in Model Experiments // Biophysics. 2011. Vol. 56. No 1. P. 135–139.
42. Евсеева Т.И., Майстренко Т.А., Гераськин С.А., Белых Е.С. Оценка дозовых нагрузок, не вызывающих негативных эффектов в природных популяциях растений при хроническом воздействии радионуклидов уранового и ториевого рядов // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т.50. №4. С. 383–390.
43. Оценка спонтанного и химически индуцированного мутагенеза у мышевидных грызунов, находившихся в условиях техногенно- и природноповышенного радиационного фона / А.Ф.Маленченко, С.Н.Сушко, А.О.Савин, О.В.Ермакова, Л.А.Башлыкова, О.В.Раскоша// Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 3. С. 20–26.
44. Кудяшева А.Г., Шевченко О.Г., Загорская Н.Г. Ранние эффекты отдельного и совместного

- действия нитрата свинца и облучения в малых дозах на морфо-физиологические и биохимические показатели мышей // Вестник Поморского ун-та. 2007. № 1 (11). С. 56–65. 2.
45. Кудяшева А.Г., Андреева Л.И., Володин В.В., Володина С.О. Биохимические параллели клеточных адаптивных реакций при хроническом низкоинтенсивном облучении и действии фитоэкдистероидного препарата Серпистен // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55. № 1. С. 43–46. 3.
46. Рачкова Н.Г. Первые данные об эффективности консервации приповерхностного хранилища радиоактивных отходов бывшего радиевого промысла // Радиохимия. 2019. Т. 61. № 2. С. 174–179. 4.
47. Шапошникова Л.М., Шуктомова И.И. Последствия применения насыпного метода дезактивации на примере радиевого промысла // Экология. 2015. № 3. С. 237–240.
48. Шапошникова Л.М. Фитопоглощение радия 226 из техногенно загрязнённых почв на примере *Chamaenerion angustifolium*, *Lathyrus pratensis* и *L. Vernus* // Теоретическая и прикладная экология. 2018. №4. С. 53–60. 5.
49. 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. 6.
50. *The role of D-GADD45 in oxidative, thermal and genotoxic stress resistance* / A.Moskalev, E.Plyusnina, M.Shaposhnikov, L.Shiova, A.Kazachenok, A. Zhavoronkov // *Cell Cycle*, 2012. Vol. 11. №22. P. 4222–4241.
51. *Shaposhnikov M., Proshkina E., Shilova L., Zhavoronkov A., Moskalev A.* Lifespan and stress resistance in *Drosophila* with overexpressed DNA repair genes // *Scientific Reports*, 2015. Vol. 5. P. 15299. 7.
52. *Koval L., Proshkina E., Shaposhnikov M., Moskalev A.* The role of DNA repair genes in radiation-induced adaptive response in *Drosophila melanogaster* is differential and conditional // *Biogerontology*. 2020. Vol. 21. № 1. P. 45–56.
- Shuktomova, N.P. Frolova, G.M. Kozubov, V.G. Zainullin, O.V. Ermakova, A.O. Rakin, L.A. Bashlykova // *Radiation biology. Radioecology*. 2000. Vol.40. № 1. P. 118–125.
- Metody radioekologicheskikh issledovanij* [Methods of radioecological research]. Moscow: Atomizdat, 1971. 260 p.
- Maslov V.I., Maslova K.I.* Radioekologicheskie gruppy mlekopitajushhih i ptits biogeocenzov rajonov povyshennoj estestvennoj radioaktivnosti // *Radioekologicheskie issledovaniya v prirodnyh biogeocenzah* [Radioecological groups of mammals and birds of biogeocenoses of areas of increased natural radioactivity // *Radioecological research in natural biogeocenoses*]. Moscow: Nauka, 1972. P.161–173.
- Vavilov P.P., Verkhovskaya I.N., Popova O.N., Kodaneva R.P.* Ob ugnetajushhem dejstvii malyh doz ionizirujushhih izluchenij na vegetirujushhie rasteniya [On the depressing effect of low doses of ionizing radiation on vegetating plants] // *Radiobiology*. 1966. Vol. 6. № 2. P. 278–293.
- Vavilov P.P., Verkhovskaya I.N., Popova O.N., Kodaneva R.P.* Usloviya nakopleniya radiya rastenijami iz pochvy // *Radioekologicheskie issledovaniya v prirodnyh biogeocenzah* [Conditions for radium accumulation by plants from the soil // *Radioecological studies in natural biogeocenoses*]. Moscow: Nauka, 1972. P. 95–103.
- Verkhovskaya I.N., Maslov V.I., Maslova K.I.* Dejstvie malyh doz radiacii i inkorporirovannyh estestvenno-radioaktivnyh elementov na spermatogenez polevok-ekonomok (*Microtus oeconomus*) v prirodnyh uslovijah [The effects of low radiation doses and incorporated natural radioactive elements on spermatogenesis of *Microtus oeconomus* in the natural environment] // *Radiobiology*. 1965. Vol. 5. Issue 5. P.720–729.
- Vlijanie malyh doz jadernyh izluchenij na zhivye organizmy v rajonah povyshennoj estestvennoj radiacii* [Influence of low doses of nuclear radiation on living organisms in areas of high natural radiation] / P.P. Vavilov, V.I. Maslov, E.I. Popova, T.A. Vlasova, Z.G. Ievleva, R.P. Kodaneva, S.N. Kataeva, Ya.I. Kaminsky, K.I. Maslova, V.Ya. Ovchenkov, O.N. Popova, G.V. Rusanova, G.V. Popova, A.D. Chistyakov, A.N. Basyrova, G.I. Esova, R.S. Kochanova / Supervisor P.P. Vavilov, sci.consultant I.N.Verkhovskaya. Report for 1960. Syktyvkar, 1961. F. 1. Op. 14. D. 11. 372 p.
- Rusanova G.V.* Mikromorfologija antropogенно izmenennyh pochv [Micromorphology of anthropogenically changed soils]. Ekaterinburg, 1988. 158 p.
- Gruzdev B.I., Rubtsov D.M.* Nakoplenie torija, urana i radiya rastenijami i organogennymi gorizontami pochv // *Radioekologicheskie issledovaniya v prirodnyh biogeocenzah* [Accu-

References

1. *Itogi issledovanij po radioekologii i radiobiologii v Institute biologii Komi nauchnogo centra Ural'skogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk (k 40-letiju otdela radioekologii)* [The results of research in radioecology and radiobiology at the Institute of Biology, Komi Science Centre, Ural Branch, RAS (to the 40th anniversary of the Department of Radioecology)] / A.I. Taskaev, A.G. Kudyasheva, O.I. Popova, L.D. Matery, I.I.

- mulation of thorium, uranium and radium by plants and organogenic soil horizons // Radioecological research in natural biogeocenoses]. Moscow: Nauka. 1972. P. 112–123.
10. Vavilov P.P., Gruzdev B.I., Maslov V.I. Itogi mnogoletnego eksperimenta po dezaktivacii radiyevykh i urano-radiyevykh zagrjaznenij v uslovijah srednej tajgi [Results of a multi-year experiment on decontamination of radium and uranium-radium contamination in the middle taiga] // Ecology. 1977. Vol. 17. № 6. P. 32–38.
 11. Maslov V.I., Maslova K.I., Verhovskaya I.N. Characteristic of the radioecological groups of mammals and birds of biogeocenosis with increased natural radiation // Radiological contamination processes. London, 1966. P. 561–571.
 12. Maslov V.I. Migracija urana, radija i torija v sisteme pochva-rastenija i rol' myshevidnyh gryzunov v etih processah [Migration of uranium, radium and thorium in the soil-plant system and the role of mouse-like rodents in these processes]: Abstract of diss... Cand. Sci. (Biology). Moscow, 1972. 17 p.
 13. Kudyasheva A.G. K 100-letiju Vsevoloda Ivanovicha Maslova (04.01.1917–20.06.1994) [To the 100th anniversary of V.I. Maslov (04.01.1917–20.06.1994)] // Radiation biology. Radioecology. 2017. Vol. 57. Issue 2. P. 238–240.
 14. Taskaev A.I., Aleksakhin R.M. Reshenie nekotorykh voprosov radioekologii s pomoshhju kartografostatisticheskogo metoda // Vopr. radioekologii nazemnykh biogeocenozov [Solving some issues of radioecology using the cartographic and statistical method // Problems of radioecology of terrestrial biogeocenoses]. Syktyvkar, 1974. P. 32–39.
 15. Shuktomova I.I., Taskaev A.I., Titaeva N.A. Opredelenie izotopnogo sostava urana i torija v pochvennykh i rastitel'nykh obrazcah [Determination of the isotopic composition of uranium and thorium in soil and plant samples]. Radiochemistry. 1983. Vol. XXV. Issue 4. P. 547–550.
 16. Shuktomova I.I., Taskaev A.I. Vlijanie intensivnoj himizacii sel'skogo hozjajstva na nakoplenie estestvennykh radionuklidov v pochve i produkcii rastenievodstva [Influence of intensive agricultural chemization on the accumulation of natural radionuclides in soil and crop production]. Moscow: Central Inst. of Agrochem. Service of Agriculture, 1986. P. 54–59.
 17. Tjazhelye estestvennye radionuklidy v biosfere (migracija i biologicheskoe dejstvie) [Heavy natural radionuclides in the biosphere (migration and biological action)]. Moscow: Nauka, 1990. 368 p.
 18. Maslova K.I., Matery L.D., Ermakova O.V., Taskaev A.I. Atlas patomorfologicheskikh izmenenij u polevok-ekonomok iz ochagov lokal'no go radioaktivnogo zagrjaznenija [Atlas of pathomorphological changes in *Microtus oeconomus* from foci of local radioactive contamination]. St. Petersburg: Nauka, 1994. 192 p.
 19. Aliev A.T., Kashkin K.P. Esterazy plazmy krovi polevok-ekonomok (*Microtus oeconomus*), obitajushhijh v uslovijah povyshennogo urovnja estestvennoj radiacii [Plasma esterases of voles (*Microtus oeconomus*) living in conditions of high levels of natural radiation] // Radiobiology. 1973. Vol. 13. Issue 4. P. 598–601.
 20. Kudyasheva A.G. Aktivnost' degidrogenaz (sukcinatdegidrogenazy, piruvatdegidrogenazy i laktatdegidrogenazy) v tkanjah polevok-ekonomok (*Microtus oeconomus* Pall.), obitajushhijh v uslovijah povyshennoj radioaktivnosti [Dehydrogenase activity (succinate dehydrogenase, pyruvate dehydrogenase and lactate dehydrogenase) in the tissues of voles (*Microtus oeconomus*) living in conditions of high radioactivity]: Abstract of diss... Cand. Sci. (Biology). Kiev, 1986. 24 p.
 21. Pikulev A.T., Kudyasheva A.G., Taskaev A.I. Vlijanie hronicheskogo gamma-obluchenija na aktivnost' degidrogenaz v tkanjah polevok-ekonomok i ih potomstva, obitajushhijh v uslovijah povyshennoj radioaktivnosti [Influence of chronic gamma radiation on the activity of dehydrogenases in the tissues of voles (*Microtus oeconomus*) and their offspring living in conditions of high radioactivity] // Radiobiology. 1987. Vol. 27. Issue 2. P. 218–223.
 22. Krivolutsky D.A., Semyashkina T.M., Mikhaitsova Z.A., Turchaninova V.A. Dozhdevye chervi kak bioindikator radioaktivnogo zagrjaznenija pochvy [Earthworms as a bioindicator of radioactive soil contamination] // Ecology. 1980. № 6. P. 67–72.
 23. Rubtsov D.M. Gumus i estestvennye radioaktivnye elementy v gornyx pochvah Komi ASSR [Humus and natural radioactive elements in mountain soils of the Komi ASSR]. Leningrad: Nauka, 1974. 74 p.
 24. Titaeva N.A., Taskaev A.I. Migracija tjazhelykh estestvennykh radionuklidov v uslovijah gumidnoj zony [Migration of heavy natural radionuclides in conditions of the humid zone]. Leningrad: Nauka, 1983. 232 p.
 25. Krupnye radiacionnye avarii: posledstviya i zashhitnye mery [Major radiation accidents: consequences and protective measures] / R.M. Aleksakhin, L.A. Buldakov, V.A. Gubarov, E.G. Drozhko, L.A. Ilyin, I.I. Kryshev, A. Linge, G.N. Romanov, M.N. Savkin, M.M. Saurov, F.A. Tikhomirov, Yu.B. Kholina. Moscow: Izdat, 2001. 751 p.
 26. Kozubov G.M., Taskaev A.I. Radiobiologicheskie i radioekologicheskie issledovaniya drevesnykh rastenij [Radiobiological and radioecological studies of woody plants]. St. Petersburg: Nauka, 1994. 256 p.
 27. Popova O.N., Taskaev A.I., Frolova N.P. Geneticheskaja stabil'nost' i izmenchivost'

- semjan v populacijah travjanistyh fitocenov v rajone avarii na Chernobyl'skoj AES [Genetic stability and variability of seeds in populations of herbaceous phytocenoses in the area of the Chernobyl accident]. St.Petersburg: Nauka, 1992. 144 p.
28. *Matery L.D., Ermakova O.V.* Gistomorfologicheskie kriterii radioaktivnogo zagrjaznenija sredy [Histomorphological criteria for radioactive contamination of the environment]. Syktyvkar, 1993. 24 p. (Series "Sci. reports" / Komi Sci. Centre, Ural Branch, RAS; Issue 312).
 29. *Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Zagorskaya N.G., Taskaev A.I.* Biohimicheskie mehanizmy radiacionnogo porazhenija prirodnyh populacij myshevidnyh gryzunov [Biochemical mechanisms of radiation damage in natural populations of mouse-like rodents]. St.Petersburg: Nauka, 1997. 156 p.
 30. *Zainullin V.G., Rakin A.O., Taskaev A.I.* Dinamika chastoty citogeneticheskikh narushenij v mikropopulacijah myshevidnyh gryzunov, obitajushhih v rajone avarii na Chernobyl'skoj AES [Dynamics of the frequency of cytogenetic disorders in micropopulations of mouse-like rodents living in the area of the Chernobyl accident] // Radiation biology. Radioecology. 1994. Vol. 34. Issue 6. P. 852–857.
 31. *Results of cytogenetic examination of liquidators of the Chernobyl NNP accident / V.G. Zainullin, P.A. Borodkin, S.I. Chernyak, Y.N. Skaletskij, A.V. Sevan'kaev, V.A. Shevchenko* // Radiobiology. 1992. Vol. 32. № 5. P. 668–672.
 32. *Zainullin V.G.* Geneticheskie efekty dejstvija hronicheskogo obluchenija malymi dozami ionizirujushhego izluchenija [Genetic effects of chronic exposure to low doses of ionizing radiation]. St.Petersburg: Nauka, 1998. 105 p.
 33. *Seymour, Carmel Mothersill.* Effects of Historic Radiation Dose on the Frequency of Sex-Linked Recessive Lethals in Drosophila Populations Following the Chernobyl Nuclear Accident / Samuel Hancock, Nguyen T.K. Vo, Soo Hyun Byun, Vladimir G. Zainullin, Colin B. // Environmental Research, 2019. Vol. 172. P. 333–370.
 34. *Ermakova O.V.* Strukturnye perestrojki perifericheskikh endokrinnyh zhelez myshevidnyh gryzunov v uslovijah hronicheskogo obluchenija v malyh dozah [Structural rearrangements of peripheral endocrine glands of mouse-like rodents under conditions of low doses of chronic irradiation]: Abstract of diss... Dr. Sci. (Biology). Moscow: Moscow State Univ., 2008. 45 p.
 35. *Ermakova O.V., Pavlov A.V., Korableva T.V.* Citogeneticheskie efekty v follikuljarnom epitelii shhitovidnoj zhelezy pri dritel'nom vozdejstvii gamma-izluchenija v malyh dozah [Cytogenetic effects in the follicular epithelium of the thyroid gland under prolonged exposure to low doses of gamma radiation] // Radiation biology. Radioecology. 2008. Vol. 48. Issue 2. P.160–166.
 36. *Evseeva T.I., Geraskin SA, Maistrenko TA, Belykh E.S.* Problemy kolichestvennoj ocenki biologicheskikh effektov sovmestnogo dejstvija faktorov radiacionnoj i himicheskoj prirody [Problems of quantitative assessment of biological effects of combined action of factors of radiation and chemical nature] // Radiation biology. Radioecology. 2008. Vol. 48. №2. P. 203–211.
 37. *Estimation of ionizing radiation impact on natural Vicia cracca populations inhabiting areas contaminated with uranium mill tailings and radium production wastes / T.Evseeva, T.Maistrenko, S.Geras'kin, J.Brown, E.Belykh* // Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407. P. 5335–5343.
 38. *Evseeva T.I., Geras'kin S.A* Sochetannoe dejstvie faktorov radiacionnoj i neradiacionnoj prirody na tradeskanciju [Combined effect of radiation and non-radiation factors on tradescantia]. Ekaterinburg, 2001. 156 p.
 39. *Evseeva T.I., Geras'kin S.A., Shuktomova I.I., Khramova E.S.* Kompleksnoe izuchenie radioaktivnogo i himicheskogo zagrjaznenija vodoemov v rajone raspolozhenija hranilishha radioaktivnyh othodov [Comprehensive study of radioactive and chemical contamination of reservoirs in the area of the storage of radioactive wastes] // Ecology. 2003. № 3. P. 176–183.
 40. *Evseeva T.I., Geras'kin S.A., Shuktomova I.I.* Genotoxicity and toxicity assay of water sampled from a radium production industry storage cell territory by means of Allium-test // J. of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 68. P. 235–248.
 41. *Ermakova O.V.* Comparative Morphological Analysis of Peripheral Endocrine Glands of Small Mammals Inhabiting Areas with High Levels of Radioactivity and Exposed to Chronic Irradiation in Model Experiments // Biophysics. 2011. Vol. 56. No. 1. P. 135–139.
 42. *Evseeva T.I., Maistrenko T.A., Geras'kin S.A., Belykh E.S.* Ocenka dozovyh nagruzok, ne vzyvajushhih negativnyh effektov v prirodnyh populacijah rastenij pri hronicheskom vozdejstvii radionuklidov uranovogo i torievogo rjadov [Assessment of dose loads that do not cause negative effects in natural plant populations under chronic exposure to radionuclides of the uranium and thorium series] // Radiation biology. Radioecology. 2010. Vol.50.№4. P. 383–390.
 43. *Ocenka spontannogo i himicheskii inducirovannogo mutageneza u myshevidnyh gryzunov, nahodivshihjsja v uslovijah tehnogenno- i prirodnopovyshennogo radiacion-*

- nogo fona [Assessment of spontaneous and chemically induced mutagenesis in mouse-like rodents under conditions of technogenic and naturally increased radiation background] / A.F. Malenchenko, S.N. Sushko, A.O. Savin, O.V. Ermakova, L.A. Bashlykova, O.V. Raskosha // Radiation safety issues. 2011. № 3. P. 20–26.
44. *Kudyasheva A.G., Shevchenko O.G., Zagorskaya N.G.* Rannie efekty razdel'nogo i sovместного dejstvija nitrata svinca i obluchenija v malyh dozah na morfofiziologicheskie i biohimicheskie pokazateli myshej [Early effects of separate and combined action of lead nitrate and low-dose irradiation on morphophysiological and biochemical parameters of mice] // Bull. of Perm Univ. 2007. №1 (11). P. 56–65.
45. *Kudyasheva A.G., Andreeva L.I., Volodin V.V., Volodina S.O.* Biohimicheskie paralleli kletochnyh adaptivnyh reakcij pri hronicheskom nizkointensivnom obluchenii i dejstvii fitoekdisteroidnogo preparata Serpisten [Biochemical parallels of cellular adaptive reactions under chronic low-intensity irradiation and the action of phytoecdysteroid drug Serpisten] // Radiation biology. Radioecology. 2015. Vol. 55. № 1. P. 43–46.
46. *Rachkova N.G.* Pervye dannye ob effektivnosti konservacii pripoverhnostnogo hranishha radioaktivnyh othodov byvshego radioevogo promysla [First data on the effectiveness of conservation of near-surface storage of radioactive waste from the former radium industry] // Radiochemistry. 2019. Vol. 61. № 2. P. 174–179.
47. *Shaposhnikova L.M., Shuktomova I.I.* Posledstvija primenenija nasypnogo metoda dezaktivacii na primereradioevogo promysla [Consequences of using the bulk decontamination method on the example of radium industry] // Ecology. 2015. № 3. P. 237–240.
48. *Shaposhnikova L.M.* Fitopogloshhenie radija-226 iz tehnogenno zagryznjonyh pochv na primere Chamaenerion angustifolium, Lathirus pratensis i L. Vernus [Phytoabsorption of radium-226 from technogenically polluted soils on the example of Chamaenerion angustifolium, Lathirus pratensis and L. Vernus] // Theoretical and applied ecology. 2018. № 4. P. 53–60.
- Moskalev A.A., Plyusnina E.N., Zainullin V.G.* Vlijanie gamma-izluchenija v malyh dozah na prodolzhitel'nost' zhizni u mutantov drozofily po raspoznavaniju i reparacii povrezhdenij DNK [The effect of low doses gamma radiation on the life span of Drosophila mutants on the recognition and repair of DNA damage] // Radiation biology. Radioecology. 2007. Vol. 47. № 5. P. 586–588.
49. *The role of D-GADD45 in oxidative, thermal and genotoxic stress resistance / A. Moskalev, E. Plyusnina, M. Shaposhnikov, L. Shilova, A. Kazachenok, A. Zhavoronkov* // Cell Cycle. 2012. Vol. 11. № 22. P. 4222–4241.
50. *Shaposhnikov M., Proshkina E., Shilova L., Zhavoronkov A., Moskalev A.* Lifespan and stress resistance in Drosophila with overexpressed DNA repair genes // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. P. 15299.
51. *Koval L., Proshkina E., Shaposhnikov M., Moskalev A.* The role of DNA repair genes in radiation-induced adaptive response in Drosophila melanogaster is differential and conditional // Biogerontology. 2020. Vol. 21. №1. P. 45–52.

Статья поступила в редакцию 23.03.2020