



# ВЕСТНИК

Института биологии  
Коми НЦ УрО РАН

№ 4-5  
(162-163)

## В номере

### ОБЗОР

**Кудяшева А.** Радиобиологические и радиоэкологические исследования  
в Институте биологии ..... 2

### СТАТЬИ

**Шуктомова И., Рачкова Н.** Исследования миграции радионуклидов  
в компонентах экосистем (1975-2010 гг.) ..... 10

**Тентюков М.** Оценка удельной активности искусственных и естественных  
радионуклидов в стоке сухих аэрозолей ..... 12

**Кудяшева А.** Основные направления биохимических исследований  
в отделе радиоэкологии ..... 17

**Ермакова О.** Радиоэкологическая гистология ..... 26

**Зайнуллин В., Евсеева Т.** Эколого-генетические механизмы реакции биологических  
систем (от клетки до популяции) на низкоинтенсивные воздействия ..... 29

**Москалев А., Шапошников М., Шосталь О., Плюснина Е., Романова Е.,  
Велегжанинов И., Данилов А., Мезенцева В., Чернышова Д.**  
Взаимосвязь генетических механизмов стрессоустойчивости и долголетия ..... 33

### КОНФЕРЕНЦИИ

**Дымов А., Тентюков М.** Международная конференция «Arctic as a messenger  
for global processes – climate change and pollution» ..... 40

### ВОСПОМИНАНИЯ

**Алексахин Р.** Мой друг Анатолий Иванович Таскаев – видный радиоэколог  
и талантливый организатор биологических исследований ..... 43

Издается  
с 1996 г.

Главный редактор: к.б.н. А.И. Таскаев

Зам. главного редактора: д.б.н. С.В. Дегтева

Ответственный секретарь: И.В. Рапога

Редакционная коллегия: д.б.н. В.В. Володин, д.э.н., д.т.н. А.Н. Киселенко,  
к.х.н. Б.М. Кондратенко, к.б.н. Е.Г. Кузнецова, к.б.н. Е.Н. Мелехина,  
д.б.н. А.А. Москалев, к.б.н. А.Н. Петров, к.с.-х.н. Н.В. Портнягина,  
д.б.н. Г.Н. Табаленкова, к.с.-х.н. А.Л. Федорков, к.б.н. И.Ф. Чадин,  
к.б.н. Т.П. Шубина

РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ И РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ИНСТИТУТЕ БИОЛОГИИ

Рождение нового научного направления в Коми филиале АН СССР – радиозологии – было продиктовано жизнью. Массовые испытания ядерного оружия вслед за атомными бомбардировками Хиросимы и Нагасаки привели к глобальному радиоактивному загрязнению биосферы Земли и вызвали глубокую озабоченность ученых. Во многих странах мира в 1950-е годы возникают атомные центры и научно-исследовательские учреждения, в которых видное место отводится радиобиологии – науке о действии ионизирующих излучений на биологические объекты. В Республике Коми имелись предпосылки для развития исследований в данном научном направлении. Во-первых, как и другие приарктические регионы планеты, территория республики оказалась особенно подвержена загрязнению радиоактивными осадками в силу специфики распределения радионуклидов в стратосфере. Во-вторых, здесь были уникальные участки с естественно и техногенно повышенным фоном радиации. Инициатором идеи организации в филиале исследований по радиозологии стал П.Ф. Рокицкий – генетик, работавший в те годы в Сыктывкаре. Его горячо поддержали П.П. Вавилов – председатель президиума Коми филиала АН СССР и В.И. Маслов – сотрудник отдела зоологии. На базе существовавшей радиобиологической группы 21 сентября 1959 г. создается лаборатория радиобиологии в составе 12 чел. во главе с В.И. Масловым. При активной консультативной поддержке д.б.н. И.Н. Верховской начаты исследования природных биогеоценозов в районах повышенной естественной радиоактивности.

Сотрудники лаборатории в короткий срок провели инвентаризацию районов и участков с повышенной природной радиоактивностью на территории Коми АССР, выполнили большой объем дозиметрических работ. В пределах обширного экологического региона были выделены перспективные для последующих исследований локальные радиевые и урано-радиевые, ториевые участки, различающиеся по комплексу геохимических и экологических условий. На них в последующем проводились основные научные работы радиобиологов: Ухтинский район – пос. Водный, Южный, Северный, Полярный Урал, Средний Тиман. Первые результаты давали основание предполагать неблагоприятное влияние повышенной радиоактивности на живые организмы. Предстояло кропотливое изучение в различных направлениях всех компонентов геоценозов: почвы, воды, наземной и водной флоры и фауны, а также обследование людей, проживающих в пос. Водный.

Первые исследования водных биогеоценозов позволили установить формы нахождения естественных радионуклидов в воде и донных отложениях и выявить растения-индикаторы радиационных эффектов от радионуклидов. Э.И. Попова, Т.А. Власова, Г.И. Есова обследовали на значительной территории многочисленные радиеносные скважины, ручьи и прочие мелкие водоемы, загрязняющие бассейн протекающей здесь р. Ухта [1]. С 1963 г. группа энтомологов (Э.Н. Габова и Т.С. Остроушко) приступила к обследованию энтомофауны в регионе радиевого промысла.

С организацией радиозологических исследований на Воднинском стационаре объектом постоянного изучения стала местная флора. Для изучения миграции естественных радионуклидов в системе субстрат–растение использовали метод сопряженного анализа. Исследуя коэффициенты биологического поглощения (КБП) радионуклидов растениями в различных растительных ассоциациях и в различных климатических зонах северо-востока европейской части СССР, Б.И. Груздев оценил неодинаковую роль различных групп растений в поглощении урана, радия и тория в зависимости от содержания этих радионуклидов в почвообразующей породе. Определена роль органогенного горизонта разных типов почв в накоплении нуклидов. Установлено, что распределение трех названных радионуклидов у дикорастущих растений, так же как и у культурных, происходит по акропетальному типу [1, 2].

Сложность и неопределенность радиационной обстановки на участках с повышенным фоном радиации диктовали необходимость постановки экспериментов, позволяющих вычленять действие радиационного фактора и исследовать его влияние на растения в относительно «чистом» виде.

Многолетние эксперименты по хроническому низкофоновому (~2.5 мР/ч) воздействию  $\gamma$ -излучения на вегетирующие растения культурной флоры (ячмень, пшеница, бобы) в природных условиях обнаружили многочисленные модификации, проявляющиеся в массовом угнетении вегетативного роста непосредственно облучаемых растений при одновременном формировании более крупного зерна. Следующее поколение, выращиваемое из таких семян, имело признаки стимуляции ростовых процессов на начальном этапе жизни. П.П. Вавилов, И.Н. Верховская, О.Н. Попова, Р.П. Коданева установили, что подобные массовые модификации проявлялись лишь в годы, когда облучение исходного поколения приходилось на сезоны с повышенной солнечной инсоляцией [3]. При изучении цитогенетической картины микроспорогенеза не было обнаружено принципиальных различий в поведении мей-

Составитель А.Г. Кудяшева. Использованы материалы опубликованной к 40-летию отдела радиозологии статьи «Итоги исследований по радиозологии и радиобиологии в Институте биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук» / 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. Радиоэкол., 2000. Т. 40, № 1. С. 118-125.

отических хромосом в пыльниках растений при внешнем воздействии  $\gamma$ -излучения. Отмечены лишь единичные признаки стимуляции кроссинговера, проявляющиеся в упорядочении конъюгации хромосом [2]. Испытание по двум чувствительным генетическим системам – хлорофильным мутациям и мутации в локусе *waxy* – также не показали ощутимых изменений в частоте мутаций у растений при хроническом воздействии  $\gamma$ -излучения [4]. В то же время при контакте корней растений с радиоактивной породой возникала тенденция к увеличению частоты генетических нарушений в результате генотоксического действия радия и урана, поступающих в растения по корневому каналу.

Экспериментальные исследования позволили охарактеризовать корневое поступление в растения  $^{226}\text{Ra}$ . Получены данные о его распределении в различных частях и органах растения, установлены акропетальный градиент концентрации нуклида в однородных метамерных органах и отсутствие его реутилизации в растении, прослежена положительная связь масштабов выноса  $^{226}\text{Ra}$  из почвы и биологической продуктивности растений [2, 5, 6]. Методом анализа пасоки изучена суточная динамика поступления  $^{226}\text{Ra}$  в растения [7]. Установлена гетерогенность содержания  $^{226}\text{Ra}$  в местах его депонирования в растении, преобладание подвижных адсорбционно связанных и водорастворимых форм [8]. Изучен аэральный канал загрязнения растений  $^{210}\text{Po}$  [9].

Первые исследования почвоведов (Г.В. Русанова) были посвящены изучению закономерностей профильного распределения и миграции естественных радионуклидов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) в почвах северной тайги на радиевых и урано-радиевых участках [2]. Установлено, что при загрязнении подзолистых, пойменных и болотных почв пластовыми радиоактивными водами основная аккумуляция радиоактивных изотопов происходит в органоаккумулятивных горизонтах, представляющих биосорбционный барьер. Проведена оценка влияния различных видов и доз удобрений на подвижность радионуклидов в пойменной дерново-луговой почве и поступления их в сельскохозяйственные растения. Разработан прогноз долговременного поведения радионуклидов в почвах таежной зоны [10].

Д.М. Рубцов изучил содержание и особенности профильного распределения  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  также в горных и лесных тундровых почвах на участках с повышенным содержанием естественных радиоэлементов в породах. Выявлено преимущественное накопление радионуклидов в продуктах выветривания (мелкоземье) по сравнению с почвообразующей породой и установлены зональные черты их распределения в профиле почв. Накопление  $^{232}\text{Th}$  в зоне распределения происходит в крупнодисперсной части мелкозема. Обнаружен сложный характер взаимодействия тонкодисперсных фракций, содержащих радиоэлементы, с цеолитной и органической коллоидальными системами в почвах [1, 2].

Сбор, обработка и анализ большого фактического материала показали необходимость создания унифицированных методов описания радиационной обстановки, представляющих особую сложность в природной среде. Для изучения содержания  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Rn}$  и других элементов в разнообраз-

ных биотических и абиотических объектах была создана радиохимическая группа во главе с В.Я. Овченковым, ставшая позднее самостоятельной лабораторией отдела радиоэкологии. Радиохимики принимали участие в экспедиционных работах, изучали качественный и количественный состав радионуклидов, их распределение в различных компонентах биогеоценозов. В.Я. Овченков, Д.М. Рубцов оценили содержание и распределение радиоактивных элементов в почвах участков с техногенно повышенной естественной радиоактивностью. Сделана попытка в эксперименте описать миграцию  $^{226}\text{Ra}$  из мест его концентрирования в природных условиях. Установлено, что его десорбция из радиоактивной породы, глины и почвы очень незначительна. В песке он связан менее прочно и может при определенных условиях практически полностью перейти в жидкую фазу. Выявленные закономерности могут рассматриваться в качестве модели естественных ареалов рассеивания  $^{226}\text{Ra}$ . Для исследования ультрамалых количеств радиоактивных элементов в природных объектах модифицированы существующие методы радиохимического анализа [1, 2].

В.И. Маслов возглавлял все исследования, которые проводились в отделе, но особое внимание он уделял изучению биологического действия малых доз ионизирующего излучения на организм и популяции млекопитающих биогеоценозов с повышенной естественной радиоактивностью. Он не только планировал исследования по радиоэкологии того дня, но намечал перспективы развития этой науки в будущем. Организация и проведение многолетних радиоэкологических исследований строились на широкой комплексной программе, охватывающей взаимодействие всех основных биотических и абиотических компонентов в условиях природных биогеоценозов повышенной естественной радиоактивности. Комплексный метод радиоэкологических исследований природных биогеоценозов, по мнению В.И. Маслова, в опубликованной им в одной из своих работ [2] предусматривает изучение биологического действия радиационных факторов на всех уровнях – от молекулярного до популяционного – с охватом тех основных вопросов, которые помогают выяснению механизмов 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 [12, 15]. 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 [14]. Классификация позволила выйти на основные объекты для последующего изучения – мышевидных грызунов. В.И. Масловым была проделана огромная работа по изучению миграции естественных радиоэлементов в си-

стеме почва–растение, а также по оценке роли мышевидных грызунов в этих процессах. Был получен интересный и обширный материал по распределению, перераспределению и состояниям радиоэлементов в различных компонентах биогеоценозов с повышенным техногенным уровнем естественной радиоактивности [1, 2].

Первые гистоморфологические исследования, проведенные К.И. Масловой по биоэффективности малых доз ионизирующей радиации на репродуктивную систему мелких млекопитающих, обитающих на территориях, загрязненных естественными радионуклидами, показали высокую радиочувствительность сперматогенного эпителия. Изменения, происходящие в гонадах, как было установлено, представляли собой сложный комплекс деструктивных компенсаторно-репаративных процессов, влияющих в целом на состояние популяции [2, 11, 12].

Существенное внимание на этом этапе изучения уделялось разработке приемов и методов постановки и проведения полевых и лабораторных радиоэкологических исследований, определению радиационной обстановки, чувствительности и точности радиохимических анализов и дифференциальному учету радиобиологических эффектов. Вклад радиоэкологов Республики Коми в развитие методологических и методических основ нарождающегося научного направления – радиоэкологии – был настолько ощутим, что 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 [1]. Правильный выбор радиоэкологических полигонов, проведение на них детальной  $\gamma$ -съемки, составление карт  $\gamma$ -полей, дозовых нагрузок и растительности (В.С. Никифоров, А.И. Таскаев, В.И. Маслов, Б.И. Груздев), а также карт вертикального распределения естественных радионуклидов в почвенном покрове, разработка картографо-статистического метода комплексного изучения территорий повышенной радиоактивности (А.И. Таскаев, Р.М. Алексахин) послужили основой для проведения дальнейших исследований отдела радиоэкологии [13].

В середине 1970-х годов был создан прогрессивный метод изучения миграции естественных радионуклидов в системе почва–растение по изотопным неравновесиям, позволивший оценить относительную активность отдельных изотопов трех природных радиоактивных рядов, выявить преобладающее направление миграции радионуклидов в генетических горизонтах различных типов почв в условиях гумидной зоны, установить основные формы нахождения радионуклидов в почвах, оценить различия в интенсивности миграции отдельных радионуклидов, в том числе изотопов одного и того же элемента, по цепочке почва–растение [14, 15]. Впоследствии основной акцент был сделан на изучении процессов миграции четырех изотопов тория трех природных радиоактивных рядов в разных подтипах почв. Была установлена возможность использования отношений генетически связанных изотопов тория ( $^{232}\text{Th}$  и  $^{228}\text{Th}$ ) в качестве индикаторов интенсивности и направленности миграционных процессов как непосредственно в почвах, так и в системе почва–растение [16].

Неотъемлемая часть проводимых радиоэкологических исследований в природных биогеоценозах – составление описания радиационной обстановки в опытах или наблюдениях. В.С. Никифоров разработал алгоритм решения этой задачи в сложных и пестрых условиях, позволяющий любому исследователю выбрать для изучения набор необходимых и достаточных факторов [2].

Существенно расширились работы по изучению биологического действия комбинированного (внешнее + внутреннее) многокомпонентного ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -), но малоинтенсивного воздействия ионизирующей радиации на организм животных в условиях радиоактивного загрязнения различного генезиса.

Б.В. Тестов и А.А. Моисеев исследовали популяцию красной полевки, обитающей на ураново-радиево-ториевом Североуральском радиоэкологическом полигоне. Изучали динамику и структуру популяции, показатели репродукции и состояния периферической крови. При относительно небольшой радиационной нагрузке ( $\sim 2$  сЗв/год) наблюдали повышенную эмбриональную гибель и небольшое увеличение числа лейкоцитов, особенно у перезимовавших самцов. Однако при смене фаз популяционного цикла изменения тех же показателей оказались значительно более высокими, что указало на необходимость учета всего комплекса внутрипопуляционных процессов при изучении действия радиационного фактора на млекопитающих [17].



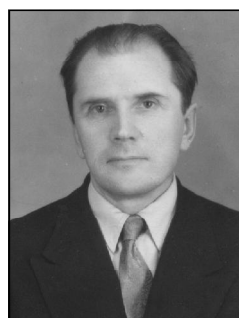
П.Ф. Роицкий



П.П. Вавилов



И.Н. Верховская



В.И. Маслов



К.И. Маслова

Проводимое на полевках-экономках многолетнее изучение состояния органов, тканей и систем Л.Д. Материй, в дальнейшем О.В. Ермаковой (репродуктивной, иммунной, эндокринной, сосудистой систем и печени) позволило выявить некоторые закономерности развития деструктивных и компенсаторных процессов, а также формирования необратимых патологий. Было установлено, что патоморфологические изменения формируются на фоне активно протекающих компенсаторно-восстановительных процессов, направленных на приспособление организма к условиям повышенной радиоактивности. Активизация компенсаторных реакций, создавая напряженное состояние, усугубляет патологические процессы. Степень выраженности биологических эффектов существенно зависит от генезиса радиоактивного загрязнения, уровня  $\gamma$ -фона, множества популяционных характеристик (пол, возраст, фаза популяционного цикла, миграционная активность животных), а также от прочих воздействий нерадиационной природы [21-24].

Начатые в 1970-х годах биохимические исследования мышевидных грызунов – обитателей урано-радиевого и радиевого участков (Ухтинский стационар) – выявили нарушения у полевки-экономки белкового обмена. А.Т. Алиев предложил использовать определение активности сывороточных эстераз в качестве чувствительного теста на облучение [18]. В органах и тканях грызунов исследованы также изменения содержания тиоловых групп, играющих важную роль в энергетическом обмене (В.Ф. Удот, А.Г. Кудяшева). Установлено, что хроническое (внешнее и внутреннее) воздействие ионизирующей радиации в малых дозах приводит к дискоординации процессов ферментативного дегидрирования в тканях диких грызунов [19, 20]. Эксперименты по влиянию одного хронического воздействия  $\gamma$ -излучения, имитирующего действие радиации на радиевом стационаре, подтвердили результаты, полученные на животных природных популяций, и позволили сделать вывод о том, что исследованный уровень малых доз ионизирующей радиации не безразличен для живого организма [20].

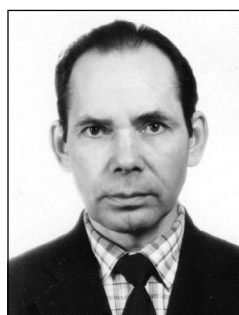
Проведенные в первое десятилетие комплексные исследования легли в основу разработки методических подходов к решению ряда проблем наземной радиоэкологии. Они получили положительную оценку на выездной сессии Научного совета по проблемам радиобиологии АН СССР, бюро отделения биохимии и биофизики физиологически активных соединений. Результаты исследований были озвуче-

ны на международных симпозиумах в Швеции (1967 г.) и Франции (1969 г.).

В 1973 г. Сыктывкар вновь стал местом встречи радиоэкологов на Всесоюзном симпозиуме по теоретическим и практическим проблемам действия малых доз ионизирующих излучений. На совещании поднимался вопрос о создании на базе радиоэкологического стационара в Коми АССР Всесоюзного центра радиоэкологических исследований. В соответствии с этими рекомендациями здесь работали несколько лабораторий ИЭМЭЖ АН СССР (группы докторов биол. наук Д.А. Криволюцкого, М.Ф. Поповой, Б.М. Граевской). Кафедра геохимии МГУ (к.г.-м.н. Н.А. Титаева с сотр.) участвовала в постановке и проведении совместных работ на четырех стационарах в разных природных зонах. Институт общей генетики АН СССР проводил работы на урано-радиево-ториевом горно-таежном радиоэкологическом стационаре (д.б.н. В.А. Шевченко с сотр.). Углубленное изучение природных биогеоценозов повышенной естественной радиации продолжало оставаться главным стратегическим направлением исследований отдела. Развитие ядерной энергетики неизбежно порождает проблему появления больших протяженных источников поступления в окружающую среду радионуклидов, в том числе естественных, их радиационного воздействия на окружающую среду. В начале 1960-х годов был поставлен долгосрочный эксперимент по дезактивации урано-радиевых отходов с целью установления прогноза поведения материнских радионуклидов и оценки радиологической обстановки на реабилитируемых территориях [25]. Было показано, что дезактивация загрязненных территорий насыпным методом несмотря на свои достоинства – временное мероприятие. По прошествии ряда лет дезактивационный слой утрачивает роль защитного барьера. Растительность, обживающая дезактивированную территорию, начинает выступать в качестве мощного фактора изменения радиоэкологической обстановки. Вместе с тем она сама начинает испытывать увеличивающееся во времени воздействие радиационного фактора. На примере изучения популяции многолетнего травянистого растения горошка мышиного [26] показано, что территория дезактивированного урано-радиевого хвостохранилища не может быть определена как стабильная среда. Ионизирующие излучения в сочетании с другими сопутствующими факторами выступают как генератор мутационного процесса. Прослежена серия изменений: нарастание числа мутаций хромосом с одновремен-



О.Н. Попова



Б.И. Груздев



Э.Н. Габова



Т.С. Остроушко



Р.П. Коданева

ной элиминацией из популяции особей-носителей летальных мутаций, повышение радиочувствительности хромосом и другие изменения – показатели возможных микроэволюционных сдвигов в природных растительных популяциях, осваивающих загрязненную радионуклидами территорию.

Проведенные многолетние исследования природных биогеоценозов повышенной радиоактивности различного генезиса позволили получить многочисленные материалы, указывающие на большое разнообразие и специфику реакции живых организмов в ответ на низкофоновое хроническое облучение.

В 1970-х годах под руководством Д.А. Криволицкого были начаты исследования почвенной мезофауны на территориях с повышенным содержанием естественных радионуклидов [27]. Уменьшение численности животных прослеживалось уже при мощностях доз 100-200 мкР/ч и было наиболее заметным при учетах массовых групп: многоножек, дождевых червей, почвообразующих личинок насекомых, пауков (Т.М. Семьяшкина).

Более 20 лет в отделе изучались отдаленные последствия хронического облучения людей. П.А. Бородин, С.Н. Катаева, В.А. Беляков проводили медицинское обследование населения пос. Водный. Выявлены особенности некоторых заболеваний как по структуре, так и по частоте встречаемости (профессиональный лучевой дерматит, тиреотоксикоз). Тогда же П.А. Бородин начал исследования отдаленных последствий хронического облучения людей, подвергшихся профессиональному облучению на бывшем радиевом промысле.

С 1960 по 1968 г. радиобиологи принимали участие во внеплановых исследованиях по оценке загрязнения Коми АССР радиоактивными атмосферными осадками. Результатом стал отчет «Изучение больших природных сообществ (биоценозов) в условиях глобальных локальных выпадений продуктов ядерных взрывов», который подвел итог многолетнему непрерывному изучению огромного северного региона (1968).

Радиобиология искала выход в практику в условиях нестабильного северного растениеводства. В специфичных условиях севера при производстве сельскохозяйственных культур весьма важен вопрос получения устойчивых урожаев, ускорения темпов развития растений. По инициативе чл.-корр. АН СССР А.М. Кузина в отделе были начаты прикладные работы по химическому мутагенезу и предпосевному облучению семян сельскохозяйственных культур

тур открытого и закрытого грунта (1974-1986 гг.) [28, 29].

В 1980-е годы при исследовании поступления искусственных радионуклидов из почв в растения была получена информация о поведении в агро- и фитоценозах  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  из глобальных выпадений относительно больших площадей таежной зоны Коми АССР (И.Г. Кочан). Установлены характерные закономерности накопления указанных радионуклидов естественными и сеянными травостоями с учетом пространственной вариативности свойств почвенного покрова и оценена возможность использования набора физико-химических характеристик почв в качестве основы для прогнозирования загрязнения травостоев  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

В 1985 г. в отделе приступили к изучению генетических характеристик лабораторных и природных популяций *Drosophila melanogaster*. В ящичных популяциях дрозофилы дикого типа изучались жизнеспособность, уровень доминантных и рецессивных летальных мутаций на протяжении более чем 50 поколений (А.О. Ракин).

Биологические объекты в природной среде подвергаются воздействию нескольких факторов одновременно. Для правильной интерпретации эффектов встал вопрос о необходимости изучения сочетанного воздействия малых доз ионизирующей радиации и других факторов различной природы. Возникла проблема специального экспериментального изучения комбинированного действия малых доз на живые организмы. А.О. Ракин, В.Г. Зайнуллин изучали эффекты хронического сочетанного действия нитратов свинца, урана и тория на популяции дрозофилы. А.Г. Кудяшева, Н.Г. Загорская, О.Г. Шевченко изучали ранние и отдаленные эффекты сочетанного действия хронического  $\gamma$ -облучения и нитратов свинца и натрия на процессы перекисного окисления липидов в тканях лабораторных мышей. Группа гистоморфологов (Л.Д. Материй, О.В. Ермакова, О.В. Раскоша, Д.В. Гурьев) исследовали эффекты сочетанного действия хронического низкоинтенсивного  $\gamma$ -облучения и солей тория на гистоморфологические изменения органов кроветворения и эндокринной системы лабораторных мышей. В.И. Шершунова исследовала механизмы сочетанного действия свинца и радионуклидов на овсяницу луговую и ячмень яровой.

Чернобыльская авария переключила внимание радиоэкологов на изучение последствий радиоактивного загрязнения Украинского полесья. Специалисты Института биологии были привлечены к вы-



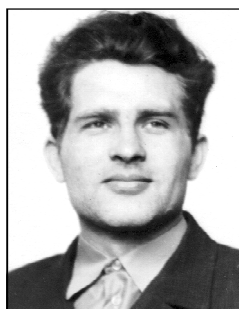
В.Я. Овченков



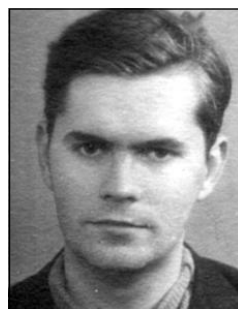
Г.В. Русанова



Д.М. Рубцов



А.И. Таскаев



В.С. Никифоров

полнению 11 тем в рамках общегосударственного задания комплексной программы по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (раздел программы «Влияние радиоактивного загрязнения на флору и фауну»). Отработанные в ходе предшествовавших исследований на полигонах с повышенной радиоактивностью в Коми АССР методические приемы и сама методология исследования эффектов малых доз ионизирующей радиации в природных экосистемах были использованы при реализации этой программы.

Радиоэкологический мониторинг в аварийной зоне включал в себя комплексное изучение отдельных элементов природных экосистем (почва, лес, травянистый покров, мышевидные грызуны, почвенная фауна, дрозofiла).

Исследованы формы нахождения изотопов плутония в ненарушенных и пахотных почвах подзолистого типа; показано, что состояние изотопов Pu определялось непосредственно свойствами выпадений; предполагается, что интенсивность процессов трансформации свойств изотопов Pu будет зависеть как от типа почв, так и от вида выпадений [30].

Основным объектом изучения лесов стала сосна обыкновенная как главная лесообразующая порода Чернобыльского леса, чувствительная к радиационному воздействию. Наряду с процессами ингибции роста, подавления новообразовательных процессов, отмирания ослабленных деревьев уже к концу первого вегетационного периода были отмечены проявления процессов репарации и восстановления. Установлены морфофункциональные закономерности в реакции хвойных на облучение. Предложена гипотетическая схема развития процессов радиационного поражения и прохождения репарационных процессов. Дан прогноз общего состояния лесов в зоне аварии и представлены рекомендации экологической рекультивации в 30-километровой зоне [31-33].

Обследование природных популяций травянистых растений подтвердило сложившееся представление о травянистой флоре как о достаточно устойчивой к действию ионизирующих излучений. В популяциях большинства обследованных видов установлена стабильность систем семенного воспроиз-

водства. Для чувствительных видов отмечены изменения в генетической структуре популяций, возрастание общей резистентности в условиях длительного хронического облучения ценоза [34].

В радиоэкологическом мониторинге были использованы разные виды мышевидных грызунов как наиболее контактирующие с почвой и растительным покровом. Использованы экологические, гистоморфологические, биохимические, биофизические и цитогенетические методы исследования. Изучено в динамике морфологическое состояние некоторых органов и тканей критических систем (периферическая кровь, костный мозг, селезенка, надпочечники, щитовидная железа, печень) полевки-экономки. Выявлен сложный комплекс многообразных функциональных сдвигов, характеризующих периоды развития лучевой патологии у разных поколений мышевидных грызунов [34-36].

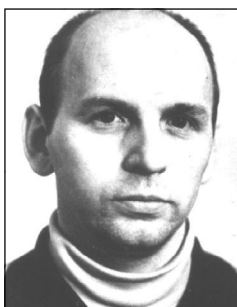
Проведено сравнительное изучение воздействия повышенного уровня естественной радиоактивности (территории в Коми АССР) и техногенного загрязнения в зоне аварии на ЧАЭС на процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ) и дегидрирования в органах пяти видов мышевидных грызунов. Установлены существенные изменения отдельных звеньев исследуемых процессов у зверьков, отловленных как в зоне аварии на ЧАЭС, так и на участках с повышенным естественным фоном. Впервые показан сложный полимодальный характер биохимических сдвигов в зависимости от мощности дозы внешнего облучения. Сохранение измененного антиоксидантного статуса, состава фосфолипидов и процессов дегидрирования в органах мышевидных грызунов в течение длительного времени и дезинтеграция обменных процессов способствуют разрыву взаимосвязи и изменению ее природы между биохимическими и биофизическими показателями и переходу клеточных систем регуляции в новое стационарное состояние [37, 38].

Цитогенетический мониторинг мышевидных грызунов выявил высокий уровень нарушений в первые годы после аварии. Через восемь лет отмечено повторное повышение частоты образования микроядер в клетках (Л.А. Башлыкова, В.Г. Зайнуллин, А.О. Ракин). Впервые представлены данные о цитогенетических последствиях облучения для человека *in vivo* в условиях радиоактивного загрязнения в зоне аварии на ЧАЭС [39, 40].

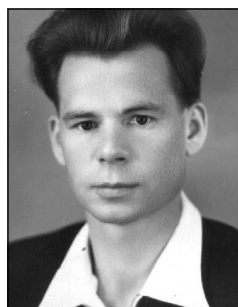
Исследование почвенной фауны в аварийной зоне выявило изменение видовой структуры сообществ мокриц (*Craspeacea*, *Isopode*) и доминирование ви-



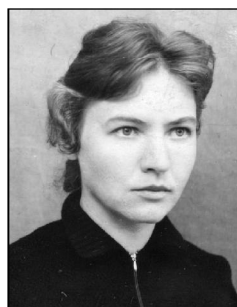
О.В. Ермакова



Б.В. Тестов



П.А. Бородин



Л.Д. Материй



В.Ф. Удов



А.Г. Кудряшева





Отдел радиоэкологии. Слева направо: верхний ряд – А.И. Кичигин, В.В. Камбалов, Н.Г. Рачкова, Г.В. Башлыкова, Л.М. Носкова, О.Г. Шевченко, Н.В. Бородкина, О.В. Раскоша, В. Богданов, А.А. Москалев; нижний ряд – А.А. Хомиченко, М.В. Шапошников, А.Г. Кудяшева, Н.Г. Загорская, Т.И. Евсеева, О.Н. Полова, А.И. Таскаев, К.И. Маслова, О.В. Ермакова, Н.А. Трофимова, Т.Н. Музакка, Э.И. Кирушева, И.И. Шуктомова.

дов, не характерных для данного типа биогеоценозов. Отмечены необратимые изменения в микропопуляциях изопод при дозах, в 100-200 раз меньших, чем общепринятые (Е.Б. Куприянова).

Совместно с сотрудниками Института общей генетики и Института биологии развития АН СССР был осуществлен генетический мониторинг местных популяций дрозофилы (1986-1989 гг.). Выявлено увеличение генетического груза в зависимости от мощности и величины поглощенной дозы. Монотонность дозовой зависимости нарушается тем больше, чем длительнее срок облучения. Мутантные линии дрозофилы *mei-9* и *rid(2)201<sup>G-1</sup>* предложены в качестве тестирующих объектов для мониторинга радиоактивных загрязнений.

В числе первых на месте аварии работала группа в составе А.И. Таскаев, Б.В. Тестова, П.А. Бородкина, В.Г. Зайнуллина, Л.А. Башлыковой, Г.П. Хлыбовой по цитогенетическому обследованию лиц, подвергшихся облучению при ликвидации последствий аварии. Результаты определения методом биологической дозиметрии поглощенных доз были переданы медикам для принятия аргументированных решений о лечении пострадавших.

Итоги 10-летнего изучения радиоэкологической обстановки в зоне аварии нашли воплощение более чем в 200 научных публикациях, сведенных в издание [41], в которое вошли и семь монографий.

Сегодня «малые дозы» опять актуальны как и в далекие 1960-е годы. Вернуться к ним неотвратимо заставил Чернобыль. И снова они во многом остаются непонятными, особенно на фоне глобального загрязнения биосферы. Ясно, что поиск остановить нельзя. Надо искать, возможно, иные подходы, выработать иной взгляд на вещи. Важным направлением исследований отдела по-прежнему остается

изучение совместного действия на живые организмы ионизирующих излучений низкой интенсивности и других факторов среды. Решение всех этих проблем ложится на плечи молодежи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методы радиоэкологических исследований / Под ред. И.Н. Верховской. М.: Атомиздат, 1971. 260 с.
2. Радиоэкологические исследования в природных биогеоценозах / Под ред. И.Н. Верховской. М.: Наука, 1972. 266 с.
3. (Вавилов П.П.). Об угнетающем действии малых доз ионизирующих излучений на вегетирующие растения / П.П. Вавилов, И.Н. Верховская, О.Н. Попова, Р.П. Коданева // Радиобиология, 1966. Т. 6, вып. 2. С. 278-293.
4. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере (миграция и биологическое действие). М.: Наука, 1990. 368 с.
5. Попова О.Н., Коданева Р.П., Вавилов П.П. К вопросу о распространении в растениях радия, поглощенного из почвы // Физиология растений, 1964. Т. 11, вып. 3. С. 436-441.
6. Вавилов П.П., Попова О.Н., Коданева Р.П. К вопросу о поведении радия в растениях // ДАН СССР, 1964. Т. 157, № 4. С. 992-994.
7. Попова О.Н., Кырчанова А.Н. Анализ пасоки как средства изучения миграции Ra-226 в системе почва-растение // Экология, 1971. № 6. С. 33-37.
8. Попова О.Н., Кырчанова А.Н. Формы депонирования Ra-226 в растениях // Агрехимия, 1974. № 2. С. 110-115.
9. Попова О.Н., Таскаев А.И., Тестов Б.В. Аэральное поступление Po-210 в растения на участках с повышенным содержанием радия // Экология, 1974. № 6. С. 22-28.
10. Русанова Г.В. Микроморфология антропогенно измененных почв. Екатеринбург, 1988. 158 с.



11. *Верховская И.Н., Маслова К.И., Маслов В.И.* Действие малых доз радиации и инкорпорированных естественно-радиоактивных элементов на сперматогенез полевков-экономок (*Microtus oeconomus*) в природных условиях // Радиобиология, 1965. Т. 5, вып. 5. С. 720-729.
12. (*Маслов В.И., Маслова К.И., Верховская И.Н.*) Maslov V.I., Maslova K.I., Verkhovskaya I.N. Characteristic of the radioecological groups of mammals and birds of biogeocoenosis with increased natural radiation // Radiological contraction processes. London, 1966. P. 561-571.
13. *Таскаев А.И., Алексахин Р.М.* Вопросы радиоэкологии наземных биоекоценозов // Труды Коми филиала АН СССР. Сыктывкар, 1984. С. 32-39.
14. *Титаева Н.А., Таскаев А.И.* Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны. Л.: Наука, 1983. 232 с.
15. (*Шуктомова И.И.*) Поведение  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в почвах горной тундры / *И.И. Шуктомова, Н.А. Титаева, А.И. Таскаев, Р.М. Алексахин* // Почвоведение, 1983. № 8. С. 49-53.
16. *Шуктомова И.И., Таскаев А.И.* Влияние интенсивной химизации сельского хозяйства на накопление естественных радионуклидов в почве и продукции растениеводства. М., 1986. С. 54-59.
17. *Тестов Б.В.* Влияние радиоактивного загрязнения на популяции мышевидных грызунов: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Екатеринбург, 1993. 35 с.
18. *Алиев А.Т., Кашкин К.П.* Эстеразы плазмы крови полевков-экономок (*Microtus oeconomus*), обитающих в условиях повышенного уровня естественной радиации // Радиобиология, 1973. Т. 13, вып. 4. С. 598-601.
19. *Кудяшева А.Г.* Видовые особенности энергетического обмена у двух видов грызунов // Экология, 1985. № 6. С. 72-74.
20. *Пикулев А.Т., Кудяшева А.Г., Таскаев А.И.* Влияние хронического гамма-облучения на активность дегидрогеназ в тканях полевков-экономок и их потомства, обитающих в условиях повышенной радиоактивности // Радиобиология, 1987. Т. 27, вып. 2. С. 218-223.
21. *Материй Л.Д., Маслова К.И.* Влияние повышенной естественной радиоактивности в среде обитания на морфологию костного мозга (*Microtus oeconomus*) // Радиобиология, 1984. Т. 24, вып. 2. С. 243-246.
22. *Маслова К.И.* Влияние экологического фактора повышенной естественной радиоактивности на организм мышевидных грызунов // Радиоэкология позвоночных животных. М.: Наука, 1978. С. 33-59.
23. *Материй Л.Д.* Цитоморфологическое изучение системы крови у полевков-экономок, обитающих в условиях действия повышенных уровней естественной радиоактивности: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 1979. 25 с.
24. (*Маслова К.И.*). Атлас патоморфологических изменений у полевков-экономок из очагов локального радиоактивного загрязнения / *К.И. Маслова, Л.Д. Материй, О.В. Ермакова, А.И. Таскаев*. СПб.: Наука, 1994. 192 с.
25. (*Вавилов П.П.*). Итоги многолетнего эксперимента по дезактивации радиевых и урано-радиевых загрязнений в условиях средней тайги / *П.П. Вавилов, Б.И. Груздев, В.И. Маслов* и др. // Экология, 1977. № 6. С. 32-38.
26. (*Попова О.Н.*) Изменчивость популяции *V. cracca* L. на территории, имитирующей урано-радиевое загрязнение / *О.Н. Попова, В.И. Шершунова, Р.П. Коданева, А.И. Таскаев*. Сыктывкар, 1985. 34 с. (Сер. Науч. докл. / Коми фил. АН СССР; Вып. № 127).
27. (*Криволицкий Д.А.*) Дождевые черви как биоиндикатор радиоактивного загрязнения почвы / *Д.А. Криволицкий, Т.М. Семьякина, З.А. Михальцова, В.А. Турчанинов* // Экология, 1980. № 6. С. 67-72.
28. *Фролова Н.П., Фролов Ю.М., Таскаев А.И.* Влияние предпосевого гамма-облучения семян *Raponticum carthamoides* (Willd.) на рост, развитие, а также продуктивность надземной фитомассы (Коми АССР) // Растительные ресурсы, 1984. Т. 20, вып. 1. С. 74-81.
29. *Фролова Н.П., Фролов Ю.М., Таскаев А.И.* Продолжительность жизни и продуктивность рапонтика сафлоровидного при предпосевном гамма-облучении семян в условиях Коми АССР // Сельскохозяйственная биология, 1985. № 4. С. 18-21.
30. (*Кочан И.Г., Шуктомова И.И.*) Kochan I.G., Shuktomova I.I. Soil factor onfluence on the plutonium isotope distribution among profiles layers and mobile forms in the 20 km Chernobyl zone // J. Radionalyt. Nuclear. Chem. Lett., 1995. Vol. 201, № 5. P. 371-379.
31. (*Козубов Г.М.*). Радиационное воздействие на хвойные леса в районе аварии на Чернобыльской АЭС / *Г.М. Козубов, А.И. Таскаев, Е.И. Игнатенко* и др. Сыктывкар, 1990. 136 с.
32. *Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений. СПб.: Наука, 1994. 256 с.
33. *Ладанова Н.В.* Структура ассимиляционного аппарата хвойных при воздействии ионизирующего излучения. СПб.: Наука, 1994. 84 с.
34. *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.
35. *Материй Л.Д., Ермакова О.В.* Гистоморфологические критерии радиоактивного загрязнения среды. Сыктывкар, 1993. 24 с. – (Сер. Науч. докл. / Коми НЦ УрО РАН; Вып. № 312.)
36. Воздействие радиоактивного загрязнения на наземные экосистемы (1986-1996 гг.) В 2-х томах. Сыктывкар, 1996. – (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 145).
37. (*Шишкина Л.Н.*). Структурно-функциональные нарушения в печени диких грызунов из района аварии на Чернобыльской АЭС / *Л.Н. Шишкина, Н.Г. Загорская, А.И. Таскаев* // Радиобиология, 1992. Т. 32, вып. 1. С. 19-29.
38. (*Кудяшева А.Г.*) Биохимические механизмы радиационного поражения природных популяций мышевидных грызунов / *А.Г. Кудяшева, Л.Н. Шишкина, Н.Г. Загорская, А.И. Таскаев*. СПб.: Наука, 1977. 156 с.
39. *Зайнуллин В.Г.* Генетические эффекты действия хронического облучения малыми дозами ионизирующего излучения. СПб.: Наука, 1998. 105 с.
40. *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. Радиоэкол., 1994. Т. 34, вып. 6. С. 852-857.
41. Библиографический указатель монографий, сборников, научных сообщений, статей и тезисов, подготовленных сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН по результатам работ в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в 1987-1996 гг. Сыктывкар, 1996. 32 с. ❖

**ИССЛЕДОВАНИЯ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ  
В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМ (1975-2010 гг.)**

**Р**адиоэкологические исследования в Институте биологии с самого начала их организации проводились по широкой комплексной программе. Объектом изучения были почва, воды, растения, животные и даже человек. На этапе становления отдела радиоэкологии большое внимание уделялось приемам и методам проведения полевых и лабораторных экспериментов, определению радиационной обстановки, чувствительности и точности радиохимических методов и дифференциальному учету радиобиологических эффектов. Эти методические подходы к решению ряда проблем наземной радиоэкологии стали отправной точкой для последующих исследований в области миграции радионуклидов в объектах окружающей среды.

В дальнейшем, опираясь на опыт применения уже освоенных сотрудниками отдела радиохимических методик, было создано прогрессивное направление в изучении миграции естественных радионуклидов в системе почва–растение, основанное на использовании явления изотопных неравновесий. Первым шагом на этом пути стала разработка метода определения изотопов урана, радия и тория в водах, почвах и растениях, позволившего А.И. Таскаеву впервые доказать [6, 7], что основную опасность представляют не родоначальники природных радиоактивных семейств, а многочисленные продукты их распада. Анализ изотопных отношений свидетельствует об отсутствии радиоактивного равновесия в рядах урана и тория не только между различными химическими элементами, но и генетически связанными изотопами одного и того же элемента (уран-238 и 234; торий-232 и 228). Причина выявленного нарушения кроется в неравновесном соотношении между указанными радионуклидами в самих источниках загрязнения и их различной миграционной способности в почвах. Это явление обнаруживается, в частности, в разделении изотопов одного и того же элемента (уран-238, 234; радий-226,



**И. Шуктомова**



**Н. Рачкова**

224; торий-232, 230; торий-232, 228; радон-222, 220) при переходе из почвы в растения. Для растений более доступны радионуклиды либо образовавшиеся в почвах в результате радиоактивного распада уже после прекращения их загрязнения, либо генетически связанные с почвами (уран-238, торий-232). Впервые были определены коэффициенты биологического поглощения для изотопов урана, тория и радия, которые свидетельствовали о различной доступности растениям радионуклидов одного и того же элемента. Таким образом, метод изотопных неравновесий позволил оценить относительную активность отдельных изотопов трех природных радиоактивных рядов, выявить преобладающее направление миграции и различия в ее интенсивности, основные формы нахождения изотопов (сорбционная, минерально-обломочная), в том числе одного и того же элемента, в почвах гумидной зоны и почечке почва–растение.

Позднее метод изотопных отношений был применен при исследовании процессов миграции тория на территориях с природно повышенным его содержанием И.И. Шуктомовой [7]. Впервые установили и исследовали уровни содержания, формы нахождения, особенности распределения и миграции сразу четырех изотопов тория в разных подтипах почв в зависимости от ландшафтно-геохимических условий. Была выявлена значительная роль растительности в распределении в почвенных профилях отдельных изотопов тория. Получена количественная оценка межвидовых различий в их накоплении древесно-кустарниковой и травянистой растительно-

стью и влияние экологических условий на этот процесс. Таким образом, была доказана возможность использования отношений генетически связанных изотопов тория (торий-232 и 228) в качестве количественных индикаторов интенсивности и направленности миграционных процессов как непосредственно в почвах, так и в почвенно-растительном покрове. Благодаря методу изотопного анализа отдел радиоэкологии приобрел широкую известность не только в нашей стране, но и за рубежом. Публикации специалистов лаборатории стали ценным источником научной информации для многих отечественных исследователей в области миграции естественных радионуклидов.

Авария на Чернобыльской АЭС, одна из наиболее крупных техногенных катастроф в истории планеты, круто изменила многое в судьбах людей, изменила и наши научные планы. В конце 1980-х–начале 1990-х годов сотрудники лаборатории переориентировались на изучение процессов миграции и трансформации форм нахождения изотопов плутония в почвах (И.Г. Кочан, И.И. Шуктомова) [2]. Исследование миграции трансурановых элементов в почвенном покрове 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС (1987-1994 гг.) позволило сделать вывод, что в период времени после аварии (окончательное формирование радиоактивного следа) формы существования изотопов плутония в почвах определялись непосредственно свойствами выпадений, а не почвенно-климатическими факторами или химическими свойствами радионуклидов. Анализ полученных данных свидетельствовал о том, что интенсивность процессов трансформации форм нахождения изотопов плутония в почвах зависит от их разновидностей (в торфянистых почвах процессы идут быстрее) и вида выпадений.

Важным запоминающимся этапом исследований (1996-2000 гг.) стало участие сотрудников лаборатории миграции радионуклидов и радиохимии в выполнении региональной программы, цель которой состояла в установ-

**Шуктомова Ида Ивановна** – к.б.н., с.н.с. отдела радиоэкологии. E-mail: [shuktomova@ib.komisc.ru](mailto:shuktomova@ib.komisc.ru); тел. (8212) 43 63 01. Область научных интересов: *радиоэкология, радиохимия.*

**Рачкова Наталья Гелиевна** – к.б.н., н.с. этого же отдела. E-mail: [shuktomova@ib.komisc.ru](mailto:shuktomova@ib.komisc.ru). Область научных интересов: *миграция радионуклидов, сорбенты радиоактивных элементов.*

лении уровней облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. Результатом этих исследований стали измеренные концентрации радона-222 в воздухе жилых помещений в населенных пунктах 19 административных районов Республики Коми, оценка эквивалентной равновесной объемной активности радона, расчет доз населения от радона и продуктов его распада. Была найдена связь между повышенным содержанием радона в воздухе жилых помещений и геологическими особенностями исследуемых районов, выявлены радоноопасные территории, определены концентрации естественных радионуклидов в питьевых водоисточниках 122 населенных пунктов. Установлено, что в 33 населенных пунктах удельная активность радия-228 в водах значительно выше значений, установленных гигиеническими нормативами.

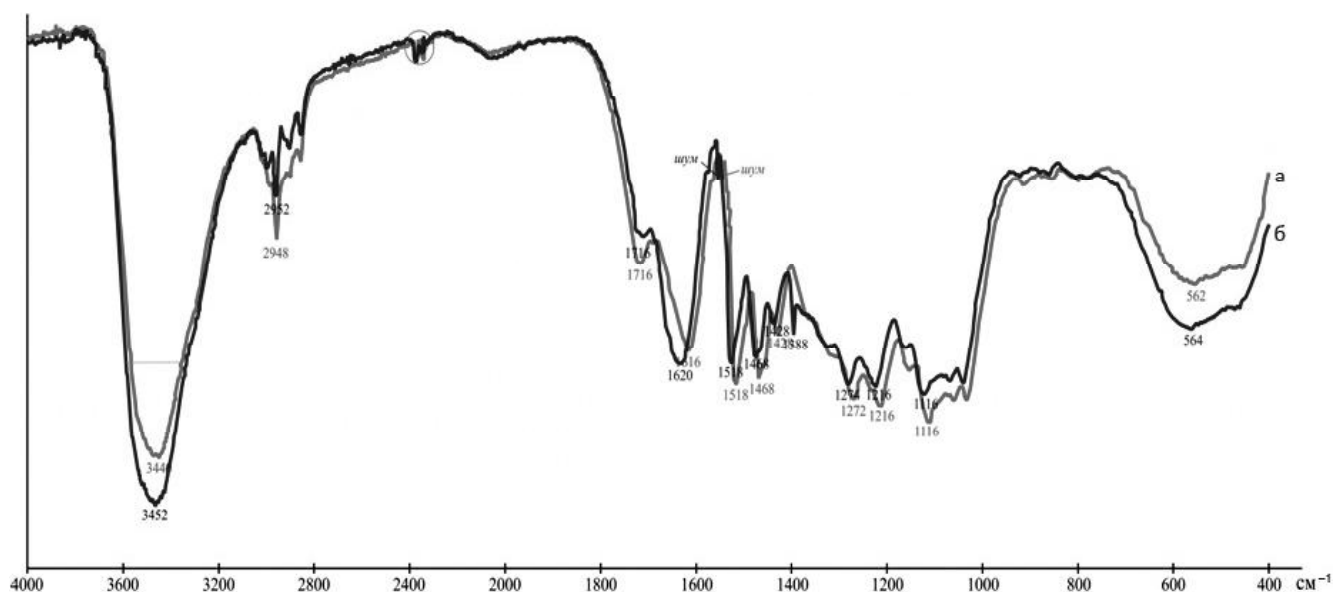
Решающее значение для понимания характера и прочности сорбции в почве, прогнозирования биологической доступности и выноса радионуклидов имеют их свойства и механизмы связывания в почвенном поглощающем комплексе. Под руководством А.И. Таскаева сотрудниками лаборатории Н.Г. Рачковой, И.И. Шуктомовой [5] были начаты исследования, касающиеся трансформации и механизмов сорбции урана, радия и тория в радиоактивно загрязненных почвах. Установлено, что трансформация соединений радионуклидов, поступивших в пахотный слой подзолистой суглинистой почвы в водорастворимой форме, имеет долговременный характер. Механизмы и прочность сорбции

урана, радия и тория в исследуемых условиях являются специфичными. Наиболее прочно в почве закреплены соединения тория. Доля его водорастворимых форм в валовом содержании через три года после загрязнения составляла 0.001-0.010 %, в то время как для радия и урана она достигала 3.8 и 0.5 % соответственно. Основное количество мобильных форм исследуемых элементов прочно поглощалось в почве в составе кислоторастворимых соединений. Механизмы и прочность сорбции урана, радия и тория зависят от физико-химических свойств почвы, относительный вклад фиксации радионуклидов в пахотном (0-20 см) слое возрастал по мере снижения их удельной активности.

Миграция и трансформация соединений тория наиболее тесно связаны с профильной дифференциацией почвенных компонентов, являющихся носителями обменного калия и фосфора. Полученные результаты позволяют заключить, что основной механизм фиксации тория состоит в сорбции его гидроксокомплексов в межпакетном пространстве и на поверхности тонкодисперсных частиц глинистых минералов. Профильное распределение урана, а также трансформация его водо- и кислоторастворимых форм определяются процессами взаимодействия радионуклида с органическими составляющими поглощающего комплекса. Важную роль в сорбции указанных форм урана играют алюминийсодержащие компоненты различной степени подвижности. В то же время по данным регрессионного анализа профильную дифференциацию радия в загрязненной подзолистой

почве контролируют процессы миграции соединений кальция. Радионуклид может мигрировать в составе железо-гумусовых растворимых комплексов, осадков гуматов и коллоидных соединений кальция или в поглощенной форме – в диффузном и неподвижном слоях алюминий- и железосодержащих органо-минеральных коллоидов и на поверхности окристаллизованных соединений железа.

Испытание сорбентов, родственных компонентам почвенного поглощающего комплекса, позволило впервые установить способность гидролизного лигнина древесины к прочному поглощению мобильных форм радионуклидов из загрязненной подзолистой суглинистой почвы. Его эффективность определялась химической природой сорбатов, при этом вклад фиксации радия, тория и урана достигал 60, 80 и 96 % соответственно. ИК-спектроскопическое исследование механизмов поглощения радионуклидов на лигнине (см. рисунок) свидетельствовало, что в сорбции принимают участие функциональные группы кислотного характера. Их взаимодействие с ураном происходит не только путем ионного обмена, но и по координационному механизму без вытеснения протона с образованием оксоаневых комплексов. Анализ результатов исследований позволяет считать, что эффективность иммобилизации урана, радия и тория на лигнине обусловлена особенностями его функционально-активных групп и нерегулярностью структуры, способностью к поглощению низкомолекулярных органических соединений коллоидной структуры, а также реализацией комплекса



ИК-спектр исходного (а) и насыщенного ураном (б) гидролизного лигнина древесины в координатах пропускания.

различных по механизмам взаимодействий с сорбатами. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования лигнина для реабилитации радиоактивно загрязненных почвенных сред [4].

Исследование механизмов сорбционной иммобилизации в почве урана, радия и тория представляет теоретический интерес, так как полученные результаты являются фактологической базой для построения моделей распространения в окружающей среде, прогнозирования путей миграции и включения радионуклидов в трофические цепи экологических систем. Важную информацию об этом может дать долгосрочный мониторинг содержания естественных радиоактивных элементов на загрязненных территориях. Сотрудниками лаборатории был проведен сбор, обработка и анализ большого фактического материала за период с 1962 по 2010 г., который позволил исследовать и сравнить пространственно-временное распределение урана, радия и тория на локальных участках, загрязненных жидкими и твердыми радиоактивными отходами химических заводов по добыче радия [3]. Анализ этих данных выявил долговременные изменения миграционной способности и запасов радионуклидов в экосистемах. Установлено, что несмотря на давность загрязнения и малоподвижную форму нахождения в почвах урана, радия и тория, они активно перераспределяются по компонентам нарушенных экосистем. Впервые показана роль тонкодисперсных гранулометрических фракций радиоактивно загрязненных почв в ограничении подвижности радия. Полученные функциональные связи между содержанием органического вещества и радия в почве и ее гранулометрических фракциях свидетельствуют о вхождении радионуклида в почвенно-поглощающий комплекс в составе орга-

нических соединений, сорбированных в межпакетном пространстве глинистых минералов. Растительный покров радиоактивно загрязненных участков влияет на миграцию урана, радия и тория как за счет изменения его видового состава в пользу возрастания доли видов с максимальным биологическим поглощением, так и за счет увеличения с течением времени коэффициентов биологического поглощения для каждого вида в отдельности.

С 2009 г. сотрудники лаборатории принимают участие в выполнении федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года», в рамках которой уже проведено обследование радиационной обстановки на территории трех объектов бывшего радиевого производства в районе пос. Водный под Ухтой. Кроме того, были произведены поиск и инвентаризация участков 12 заводов по переработке радиоактивной воды, выбраны опорные площадки для мониторинга радиационно-гигиенической и радиозэкологической обстановки. В ходе этих работ выполнено определение глубины залегания и мощности слоя радиоактивного загрязнения, его радионуклидного состава и удельной активности, изучена миграция радионуклидов с поверхностными и грунтовыми водами [1]. Установлено, что необорудованное приповерхностное хранилище радиоактивных отходов и территории бывших заводов по переработке воды не отвечают федеральным правилам и нормам и представляют опасность как неконтролируемые источники радиации. Собранные данные будут использованы для принятия экономических и экологически обоснованных организационных и инженерно-технических решений по приведению радиоактивно загрязненных участков в радиационно-безопасное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кичигин А.И., Шуктомова И.И., Носкова Л.М. Миграция Ra-226 и U-238 с территории хранилища радиоактивных отходов в пос. Водный Республики Коми с поверхностными и грунтовыми водами // Экология арктических и приарктических территорий: Матер. междунар. симпоз. Архангельск, 2010. С. 278-281.
2. Кочан И.Г., Шуктомова И.И. Динамика вертикального распределения изотопов плутония в торфяно-подзолистой почве 30-км зоны ЧАЭС // Чернобыль-94: Докл. IV междунар. науч. конф. В 2-х томах. Чернобыль, 1996. Т. 1. С. 293-298.
3. Носкова Л.М. Динамика миграции урана, радия и тория в компонентах экосистем, нарушенных в результате радиевого производства: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2010. 18 с.
4. (Рачкова Н.Г.) Патент № 2317603, Российская Федерация, МКИ8 G021 F9/1, A01B79/00. Способ реабилитации почвы, загрязненной радиоактивными нуклидами / Н.Г. Рачкова, И.И. Шуктомова; Институт биологии Коми НЦ УрО РАН; № 2006128699/06; заявл. 07.08.06; опубл. 20.02.08. Бюл. № 5.
5. Рачкова Н.Г., Шуктомова И.И. Роль сорбентов в процессах трансформации соединений урана, радия и тория в подзолистой почве. СПб.: Наука, 2006. 146 с.
6. Таскаев А.И. Закономерности распределения и миграции изотопов U, Ra и Th в почвенно-растительном покрове района повышенной естественной радиации: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 1979. 25 с.
7. Титаева Н.А., Таскаев А.И. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в условиях гумидной зоны. Л.: Наука, 1983. 232 с.
8. Шуктомова И.И. Миграция и формы нахождения изотопов тория в почвенно-растительном покрове северо-востока европейской части СССР: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Обнинск, 1986. 23 с. ❖

**ОЦЕНКА УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В СТОКЕ СУХИХ АЭРОЗОЛЕЙ**

**В** настоящее время линейная беспороговая концепция действия малых доз, принятая в официальных документах МАГАТЭ и МКРЗ, входит в противоречие с множеством данных зависимости «доза-эффект», полученных в диапазоне малых доз на лабораторных популяциях живых организмов разного уровня филогенеза (от одноклеточных до многоклеточных) [3]. В природных же условиях корректная оценка зависимости «доза-эффект»

в диапазоне малых доз ионизирующего излучения затрудняется влиянием радиационного фона территории. Положение осложняется тем, что в настоящее время радиоэкологическая обстановка динамично меняется: отмечается повсеместное увеличение естественного фона ионизирующих из-



**М. Тентюков**

**Тентюков Михаил Пантелеймонович** – к.г.н., с.н.с. отдела радиозэкологии. Тел. (8212) 43 63 01. Область научных интересов: геохимия атмосферы, геохимия ландшафтов.

лучений, появляются новые и расширяются существующие зоны с повышенным содержанием радионуклидов, растет их содержание в пищевых цепочках [2]. Одним из путей повышения информативности оценки зависимости «доза–эффект» в диапазоне малых доз ионизирующего излучения при изучении природных популяций живых организмов в условиях радиационного фона является поиск критериев распознавания – что является результатом воздействия малых доз ионизирующего излучения, а что – следствием влияния сезонных колебаний природного радиационного фона. Поскольку последний тесно связан атмосферной радиоактивностью, то изучение носителей ее распределения в приземном слое воздуха весьма актуально.

**Источники атмосферной радиоактивности** имеют естественную и искусственную (техногенную) природу. К первым традиционно относят выделение эманаций радона  $^{222}\text{Rn}$ , торона  $^{220}\text{Rn}$  и актинона  $^{219}\text{Rn}$ . Из рыхлых и кристаллических пород радон и торон (концентрации актинона столь малы, что его влияние не рассматривается) диффундируют в атмосферу, где постепенно распадаются и переходят в изотопы тяжелых металлов: ряд урана  $^{238}\text{U}$  и тория  $^{232}\text{Th}$ , которые быстро захватываются аэрозольными частицами [16]. К техногенным источникам радионуклидов в атмосфере после запрещения испытаний атомного оружия относят АЭС, транспортные средства с силовыми агрегатами на ядерном топливе, предприятия ядерного цикла (добыча урановых руд, их обогащение, получение ядерных материалов) [9], а также уран и торий в зольных уносах от сжигания угля [17].

**Геохимическая активность атмосферы.** Известно, что радиационную нагрузку атмосферные компоненты приобретают в результате геохимической активности атмосферы. Можно выделить несколько ключевых процессов, определяющих указанное свойство атмосферы: а) физико-химические – при концентрировании высокодисперсных атмосферных компонентов в каплях облаков (взаимодействие молекул газов, молекул азотной и серной кислот, субмикроскопических кристаллов льда с растворимыми и нерастворимыми аэрозольными частицами природного и техногенного происхождения); б) динамичный обмен между аэрозольной средой воздушной массы и облаками в атмосфере; в) фазовые переходы воды и связанное с ними криогенное концентрирование растворимых атмосферных компонентов; г) свободнорадикальный механизм окислительных процессов.

*Физико-химические процессы*, приводящие к концентрированию атмосферных компонентов в каплях облаков, обусловлены турбулентным перемешиванием воздуха и наличием фретических сил [11], благодаря которым аэрозольные частицы укрупняются и могут попасть в облачную каплю. В результате в ней собираются растворимые и нерастворимые аэрозольные частицы, что увеличивает минерализацию облачной капли. Когда малые облачные капли выносятся из облака, то они под действием оптического излучения нагреваются и испаряются [8]. В воздухе остается сухой остаток, который может быть вовлечен в процесс образования новых водяных капель.

*Динамичный обмен между аэрозольной средой воздушной массы и образующимися облаками* продолжает физико-химические преобразования аэрозольных частиц. При этом отмечается изменение спектра аэрозольных частиц: уменьшается концентрация аэрозольных частиц и появляются более эффективные ядра конденсации в виде крупных ядер конденсации со сложной структурой и составом [12]. Процесс очень интенсивный. Двух-трехбалльное поле кучевых облаков мощностью 1.5-2.0 км трансформирует за 1.0-1.5 ч распределение аэрозолей в трех-четырёхкилометровом слое воздуха [12, с. 56].

*Фазовые переходы воды и криогенное концентрирование растворимых атмосферных компонентов* происходят в облачных каплях при отрицательных температурах. Процесс сопровождается появлением ледяных ядер и смешанных ядер конденсации. Последние представляют собой ядро конденсации, внутри которого находятся нерастворимые частицы, окруженные гигроскопическим веществом, которое оседало на них по мере испарения облачной капли. Очевидно, что процесс перехода воды в лед сопровождается криохимическими реакциями между растворимой фазой аэрозольных частиц и намерзающих на ядро конденсации облачных капель. При этом возможно образование кристаллогидратов. В условиях низких температур кристаллогидраты могут быть относительно устойчивыми и при этом выполнять роль своеобразных «твердых» водяных растворов в атмосфере. Предполагается, что структура таких кристаллогидратов не препятствует диффузии и «встраиванию» внутри кристаллогидрата атмосферных компонентов и химическому взаимодействию между ними.

*Окислительные процессы в атмосфере* обуславливают высокий окислительный потенциал среды. При этом практически все реакции идут в сторону образования веществ, характеризующихся высшими формами окисления. Наряду с ним в атмосфере активно протекают газофазное окисление на молекулярном уровне с участием кислорода, озона, перекиси водорода и гетерогенные реакции молекулярного окисления на поверхности аэрозольных частиц. Во всех этих реакциях принимают участие свободные радикалы, образование которых во многом обусловлено фотохимическими процессами [11].

**К механизму осаждения сухих аэрозолей.** Носителями радиоактивности в атмосфере являются аэрозольные частицы в интервале радиусов от 0.015 до 0.5 мкм [16]. Вместе с тем, быстрый рост атомной и угольной энергетики, повышение добычи урановых руд и объемов радиоактивных отходов, а также усиление циклонической активности, связанное с глобальными изменениями климата, повлекло за собой увеличение скорости распределения и масштабов распространения в атмосфере радиоактивных продуктов. Все это вместе взятое обусловило повышение количества радиоактивных выпадений, что находит свое отражение в современных изменениях радиологической ситуации. Между тем, объем указанных выше частиц относительно невелик [14]. Следовательно, можно допустить, что отмеченные преобразования способствуют расширению спектра размеров частиц, участвующих в переносе радиоактивности в атмосфере и выведении радиоактивных



веществ из нее. Определенную роль в этом процессе играют сухие аэрозоли. К ним относят атмосферные частицы диаметром 0.1-10.0 мкм.<sup>1</sup> Они составляют более 70 % объема концентрации всех взвешенных в атмосфере частиц и примерно половину суммарной поверхности аэрозолей [14]. Их доля в общем объеме выпадающих осадков для умеренных широт равна 10-20 % [9] и они содержат загрязняющих веществ на 25 % больше, чем дождевые осадки [15]. Скорость осаждения сухих аэрозолей не зависит от силы тяжести и определяется только градиентом температур и концентраций в пограничном слое. Последний появляется при обтекании воздушным потоком препятствия (например, листа растения). Если на внешней границе этого слоя скорость обозначить через  $v$ , то в пограничном слое происходит резкое падение скорости воздушного потока от  $v$  до 0 (рис. 1). Данное снижение происходит за счет трения о поверхность. В зависимости от распределения скорости  $v$  пограничный слой может быть ламинарным и турбулентным. В ламинарном пограничном слое распределение скорости воздушного потока изменяется линейно: от 0 на твердой поверхности до  $v$  на границе слоя с воздушным потоком (рис. 1-А, а). Для турбулентного пограничного слоя характерно нелинейное распределение скорости воздушного потока (рис. 1-А, б). При увеличении скорости воздушного потока ламинарный слой переходит в турбулентный, но при этом ламинарный поток сохраняется в виде небольшого подслоя у твердой поверхности.

Сухое осаждение при турбулентной диффузии предполагает наличие направленного воздушного потока к поверхности. С приближением к ней частиц возникают поверхностные физико-химические процессы. Известно, что воздух «прозрачен» для солнечной радиации, поэтому его температура зависит от нагрева частиц. Нагрев, в свою очередь, зависит от интенсивности солнечной радиации. Следовательно, чем больше частиц в пограничном слое, тем выше его температура, тем активней идет молекулярное перемешивание: при нагреве частиц часть их кинетической энергии передается молекулам воздуха. При этом число соударений возрастает, и частицы могут контактировать с поверхностью и удерживаться на ней. Силы, которые обеспечивают такой контакт, называются адгезией [7].

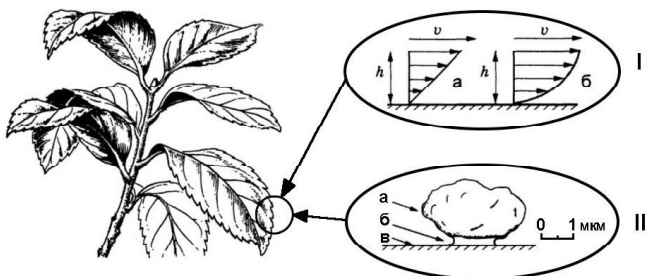


Рис. 1. Механизм осаждения сухих аэрозолей: схемы изменения скорости воздушного потока в пограничном слое (I); схема осаждения частицы из пограничного слоя (II). Пояснения в тексте.

Адгезии всегда предшествует адсорбция, которая сопровождается изменением концентрации вещества на границе раздела фаз. Процесс идет на различных межфазовых поверхностях и адсорбироваться могут любые вещества. При этом адсорбционное равновесие, т.е. равновесное распределение вещества между пограничным слоем и граничащими фазами, является динамичным равновесием и быстро устанавливается [1].

При турбулентном осаждении частицы могут контактировать не только с поверхностью, но и между собой. При этом между частицами возникает связь, которая называется аутогезией. Если силы взаимодействия между двумя частицами больше, чем при взаимодействии между частицей и поверхностью, то силы аутогезии начинают доминировать и происходит укрупнение частиц. В этом случае на осаждение частиц в пограничном слое начинают влиять уже силы гравитации, а их «прилипание» к поверхности будет обусловлено действием капиллярных сил. Его схема приведена на рис. 1-II. При контакте частицы (1-II, а) с поверхностью листа (1-II, в) между ними образуется прослойка жидкости (рис. 1-II, б) за счет капиллярной конденсации, т.е. конденсации паров в жидкость при давлении, которое меньше давления насыщенного пара. Необходимым условием для образования капиллярной прослойки является гидрофильность контактирующих поверхностей. В этом случае образующийся мениск жидкости в зоне контакта «притягивает» частицу к поверхности и удерживает ее. Появление капиллярной прослойки может наблюдаться уже при относительной влажности более 50 %, а при влажности 70 % и выше именно капиллярные силы обуславливают величину адгезии частиц [7].

### Постановка проблемы

Установлено, что геохимическая нагрузка аэрального потока, связанная с сухими аэрозолями, из-за его транзитного характера реализуется не полностью, а лишь только в том объеме дисперсного вещества, который в приземном слое воздуха поступает с нисходящим турбулентным потоком воздуха [6]. Однако химический состав аэрозолей в нисходящей ветви при традиционных методах изучения химического состава аэрозолей не всегда удается исследовать. Заметим, что основу методов составляют а) пассивный сбор аэрозольных выпадений (твердых и жидких) на планшеты, б) активное осаждение пыле-аэрозольных частиц на фильтры и импакторы путем прокачки сквозь них воздуха с помощью аспирационных установок [13, 15]. Считается, что планшетные сборы сухих выпадений воспроизводят реальное их поступление на поверхность, тогда как количественные характеристики аэрозольной нагрузки, полученные методом активного сбора, отражают потенциальные запасы дисперсного вещества в приземном слое воздуха, который не всегда и не полностью выпадает на поверхность [5]. Очевидно, что оценка поступления радионуклидов на поверхность с помощью методов пассивного сбора сухих аэрозолей более информативна.

<sup>1</sup> В этот интервал попадают частицы, представляющие наибольшую гигиеническую опасность (до 0.3 мкм) [4]. Для них характерно то, что они практически не захватываются дождевыми каплями [10].

Цель работы – выявить особенности распределения радионуклидов на сухих аэрозолях в приземном слое воздуха в условиях естественного радиационного фона путем сбора сухих аэрозолей с применением химически инертных сорбентов (метод чистой поверхности).

**Методика**

Для изучения динамики осаждения радионуклидов в составе сухих аэрозолей предложен способ, заключающийся в разделении процесса осаждения аэрозольных частиц, выделяя для последующего анализа те, осаждение которых определяется турбулентной диффузией (их размеры составляют 0.1-10.0 мкм). Взаимодействие частиц с такой размерностью как между собой в воздушном потоке, так и с поверхностью субстрата при сухом осаждении определяется силами адгезии [7]. В качестве депонирующего субстрата для сбора сухих аэрозолей использовались пластинчатый и порошковый сорбенты. В качестве первых испытывали бумажные фильтры «белая лента», а вторых – тонкодисперсный химически инертный порошок  $Al_2O_3$ . Для их экспонирования были разработаны устройства [15-17], различающиеся друг от друга лишь одной деталью – наличием ложеента, позволяющего экспонировать порошковые сорбенты (рис. 2).

Технический результат, достигаемый с помощью данных устройств, заключается в следующем. Из-за различий в теплоемкости материалов 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 внутри устройства возникает высокая вероятность диффузионного и турбулентного осаждения сухих аэрозолей из пограничного слоя на поверхность химически инертного субстрата (рис. 3).

Сбор сухих аэрозолей был организован на ключевых площадках в лесном массиве в пределах зеленой зоны г. Сыктывкар. Для экспонирования контейнеров порошковыми и пластинчатыми сорбентами в безлесных территориях (тундра, степь, пустыня), а также на участках с техногенными повреждениями растительного покрова сконструировано специальное устройство (см. фото).

На первом этапе в качестве депонирующего субстрата использовались бумажные фильтры «белая лента». Всего было установлено 25 контейнеров, в каждый из которых было вложено по четыре фильтра «белая лента»  $d = 18$  см. Время экспонирования в начале эксперимента составило один месяц (с 14 мая по 14 июня 2006 г.), которое затем было увеличено до одного года (с 14 июня 2006 г. по 16 июня 2007 г.).

На втором этапе проводилось испытание порошкового сорбента. Испытание сорбента проводилось на том же ключевом участке, что и ранее выполненные эксперименты. Химически инертный тонкодисперсный порошок  $Al_2O_3$  (марки ХЧ) насыпали тонким слоем на ложемент (до 5 г). Одна партия включала 20 устройств.

Схема наблюдений динамики концентраций радионуклидов в стоке сухих аэрозолей в лесные экосистемы предусматривала ежемесячную установку одной партии устройств с порошковым сорбентом. Период наблюдений составил год (с мая 2009 по май 2010 г.).

Для измерения удельных активностей экспонированные порошки каждой партии объединяли в одну пробу, что обеспечивало нужное количество исследуемого образца. Измерения  $^{137}Cs$ ,  $^{40}K$ ,  $^{232}Th$ ,  $^{226}Ra$  и  $^{90}Sr$  производили в аккредитованной лаборатории миграции радионуклидов и радиохимии Института биологии Коми НЦ УрО РАН (аттестат аккредитации № САРК RU. 0001.441622) на сцинтилляционном гамма-бета спектрометрическом комплексе с программным обеспечением «Прогресс» в геометриях «чашка Петри», «Кювета-D70», «Маринелли-250». Время измерения проб в указанных геометриях составило 7200, 3600 и 3600 с соответственно.

В качестве контроля эффективности адсорбции использовали ЭПР-регистрацию<sup>2</sup>. Спектры ЭПР (электронного-парамагнитного резонанса) были изучены в ЦКП «Центр спектроскопических исследований» Института геологии Коми НЦ УрО РАН на серийном радиоспектрометре SE/X-2547 (Radio-RAN, Польша) в X-частотном диапазоне с ВЧ модуляцией 100 кГц при комнатной температуре образцов. Применялся прямоугольный резонатор RX102 с модой  $TE_{102}$ . Пары образцов  $Al_2O_3$  изучены с тройной повторностью. Каждая пара – эталонный (контрольный) и экспонированный образцы сорбента.

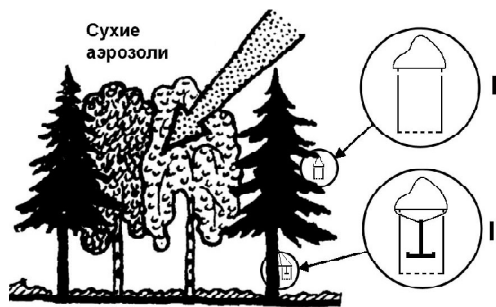


Рис. 2. Общий вид контейнеров с пластинчатым (I) и порошковым (II) сорбентами и схема их установки в лесном древостое.

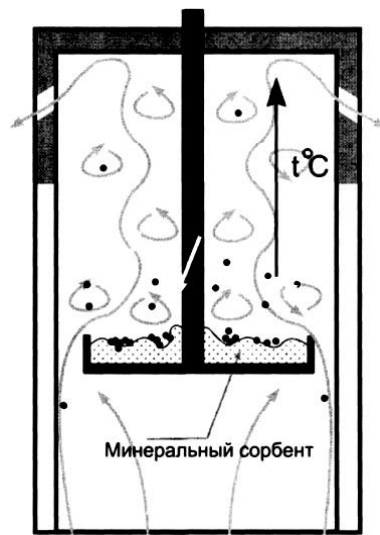


Рис. 3. Схема диффузионного и турбулентного осаждения сухих аэрозолей из пограничного слоя на поверхность химически инертного субстрата.

<sup>2</sup>Съемка и обработка ЭПР-спектров выполнены в.н.с., к.г.-м.н. В.П. Лютоевым (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН), которому автор выражает свою признательность.

**Результаты и их обсуждение**

Гамма-спектрометрия экспонированных образцов с пластинчатым сорбентом (с 14 мая по 14 июня 2006 г.) показала, что для <sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra удельная активность ниже чувствительности метода определения. Увеличение времени экспонирования аналогичной второй партии проб до одного года (с 14 июня 2006 г. по 16 июня 2007 г.) никак не сказалось на удельной активности естественных радионуклидов. В то же время удельная активность искусственного радионуклида <sup>137</sup>Cs возросла до значимых величин и составила 11.1 ± 3.3 Бк/кг.

В ходе второго этапа эксперимента в экспонированных образцах с порошковыми сорбентами удельная активность <sup>137</sup>Cs, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra оказалась ниже чувствительности метода определения. Только для <sup>40</sup>K результаты измерений показали наличие изменчивости в динамике концентраций (см. таблицу). Сопоставление данных гамма-спектрометрического анализа с ЭПР-спектроскопией экспонированных порошков указывает на корреляцию интегральной интенсивности сигналов железосодержащей фазы в сухих аэрозолях и значений удельной активности, полученных для <sup>40</sup>K, возрастающей с увеличением продолжительности экспонирования. Можно полагать, что воздушная миграция <sup>40</sup>K происходит в составе минералов теллурической пыли, тогда как наличие <sup>137</sup>Cs на пластинчатом сорбенте, возможно, отражает особенности синоптического режима территории и его появление – результат трансграничного переноса.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об участии сухих аэрозолей в переносе



Установка контейнеров в пологом леса с пластинчатыми (а) и порошковыми (б) сорбентами и пример организации сбора сухих аэрозолей в тундре (в): контейнеры с порошковыми сорбентами крепятся на поперечинах (выделены контуром), а пластинчатые – развешиваются на консолях.

радионуклидов в приземном слое воздуха, что необходимо учитывать при оценке зависимости «доза–эффект» в диапазоне малых доз при изучении природных популяций живых организмов в условиях радиационного фона.

**Заключение**

Динамические преобразования радиоэкологической обстановки способствуют расширению спектра размеров частиц, участвующих в переносе радиоактивности в приземной атмосфере, и выведении радиоактивных веществ из нее. Определенную роль в этом процессе играют сухие аэрозоли с диаметром от 0.1 до 10.0 мкм. Сухие аэрозоли, выступая в качестве носителей радионуклидов, могут влиять на радиационный фон территории, что следует учитывать при изучении природных популяций живых организмов в условиях радиационного фона.

Полученные результаты позволяют определить спектр радиоэкологических задач, которые можно решать с помощью нового метода, а именно: организация наблюдений за динамикой изменчивости концентраций радионуклидов в стоке сухих аэрозолей в пределах территорий, прилегающих к предприятиям атомной промышленности; изучение особенностей переноса радиоактивного загрязнения сухими аэрозолями

и условий формирования радиационных аномалий в приземном слое воздуха.

Кроме этого, предложенный метод чистой поверхности дает возможность по-новому организовать наблюдения за атмосферной радиоактивностью в приземном слое воздуха в зоне техногенеза и на фоновых территориях. Простота конструкции устройства сбора сухих аэрозолей и низкие затраты на его изготовление позволяют использовать устройство для одновременного сбора сухих аэрозолей в различных ландшафтных условиях и на большой площади, что, в отличие от существующих аспирационных способов, повышает качество и технологичность исследований радиоактивных выпадений, например, в труднодоступных районах.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей. М.-Л.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1947. 552 с.
2. Алексахин Р.М. Радиоэкология: столетняя история этой области естествознания – уроки эволюции и современные задачи // Биологичес-

**Схема экспонирования порошковых сорбентов (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

Номер пробы	2009 г.							2010 г.					Удельная активность, Бк/кг	
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV		V
09-5														54.0 ± 13.5
09-6														<40
09-7														62.0 ± 18.6
09-8														<40
09-9														54.0 ± 12.5
09-11														<40
09-12														То же
10-1														» »
10-2														» »
10-3														» »

Примечание. Широкой линией показана продолжительность экспонирования каждой партии устройств.

кие эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Матер. междунар. конф. Сыктывкар, 2009. С. 7-9.

3. *Бычкова И.Б.* Проблема отдаленной радиационной гибели клеток. М.: Энергоатомиздат, 1989. 158 с.

4. (*Веремей Н.Е.*) Исследование влажного вымывания аэрозольных частиц облаками и осадками / *Н.Е. Веремей, Ю.А. Довгалюк, А.Д. Егоров* и др. // Метеорология и гидрология, 1999. № 8. С. 5-14.

5. Геохимия окружающей среды / Сост. Ю.Е. Саев, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 335 с.

6. *Елпатьевский П.В.* Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука, 1993. 253 с.

7. *Елпатьевский П.В., Аржанова В.С.* К методике оценки геохимического воздействия промышленности на окружающую среду (методы и результаты) // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. М.: Наука, 1987. С. 73-79.

8. *Зимон А.Д.* Что такое адгезия. М.: Наука, 1983. 176 с.

9. *Зув В.Е., Кузиковский А.В., Погодаев В.А.* Тепловое действие оптического излучения на водные капли малого размера / ДАН СССР, 1972. Т. 205, № 5. С. 1069-1072.

10. *Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 258 с.

11. (*Израэль Ю.А.*) Кислотные дожди / *Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Прессман* и др. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 270 с.

12. *Мазин И.П.* О взаимодействии облаков с окружающей их аэрозольной средой // Метеорология и гидрология, 1982. № 1. С. 54-61.

13. *Райст П.* Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987. 280 с.

14. *Смирнов В.В.* Аэрозольный климат Подмосковья // Метеорология и гидрология, 2003. № 9. С. 37-49.

15. (*Тентюков М.П.*) Патент № 2314511, Российская Федерация. МКИ8 G01N1/22. Способ отбора сухих аэрозолей для контроля окружающей среды и устройство для его осуществления / *М.П. Тентюков*; Институт биологии Коми НЦ УрО РАН; № 2005141282/12; заявл. 28.12.05; опубл. 10.01.08. Бюл. № 1.

16. (*Тентюков М.П.*) Патент № 2357222, Российская Федерация, С1 МПК G01N 1/22, B82B 1/00. Способ контроля загрязнения воздуха наноразмерными частицами и устройство для его осуществления / *М.П. Тентюков*; Институт биологии Коми НЦ УрО РАН; № 2007138237/12; заявл. 15.10.2007; опубл. 27.05.2009. Бюл. № 15.

17. (*Тентюков М.П.*) Патент на промышленный образец № 72844, Российская Федерация, МКПО909-03. Контейнер для сбора сухих атмосферных аэрозолей / *М.П. Тентюков*; Институт биологии Коми НЦ УрО РАН; № 2008501008; заявл. 31.03.2008; опубл. 16.11.2009.

18. *Хорват Л.* Кислотный дождь. М., 1990. 80 с.

19. *Юнге Х.* Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.

20. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург, 2005. 655 с. ❖

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ БИОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОТДЕЛЕ РАДИОЭКОЛОГИИ

**Б**иохимические исследования в отделе радиобиологии начаты в 1970-е годы прошлого столетия, спустя 11 лет после создания лаборатории радиобиологии в Коми филиале АН СССР, и были посвящены прежде всего вопросам изучения радиочувствительности мышевидных грызунов, обитающих на территориях с повышенным уровнем радиации. Им предшествовали обширные исследования, которые были проведены сотрудниками отдела под руководством В.И. Маслова на отдельных представителях фауны из биогеоценозов с повышенным  $\gamma$ -фоном радиоактивности. Уже были получены данные по радиационной обстановке на исследуемых территориях, накоплены сведения об аккумуляции радионуклидов (урана и радия) в организме животных, динамике численности зверьков, гистоморфологии отдельных органов и систем организма, были начаты морфологические и цитологические исследования си-

стемы крови и кроветворных органов у полевок-экономок, обитающих на территориях с разным уровнем повышенной радиоактивности [7, 33-35, 39, 43, 44]. Чтобы дать объяснение биологическим эффектам, определить, за счет каких процессов в организме животных происходит адаптация к повышенному фону радиоактивности, необходимо было проводить исследования на новом уровне – биохимическом. Эти исследования позволили бы получить новые сведения о механизмах действия малых доз радиации на организм животных. Использование биохимических данных позволило бы определить основные пути регуляции организма, выявить адаптивные процессы, происходящие на клеточном и тканевом уровнях. Применение в радиоэкологии в 1970-е годы нового в то время метода – электрофореза – показало



А. Кудяшева

возможность его использования при оценке биологических эффектов, вызванных внутренним и внешним облучением в малых дозах у животных природных популяций. Младшим научным сотрудником отдела радиобиологии А.Т. Алиевым в Ленинградском институте усовершенствования врачей им. С.М. Кирова

под руководством д.м.н. проф. К.И. Кашкина и д.б.н., проф. П.А. Коржуева были освоены электрофоретический метод анализа белка, плазмы крови и гемоглобина на крахмальном геле, а также определение аминокислотного состава белков крови и изоферментного состава эстераз эфиров карбоновых кислот плазмы крови (фото 1). Эти методы А.Т. Алиев использовал при анализе крови полевок-экономок, отловленных на радиоактивных и относительно чистых (контрольных)

Кудяшева Алевтина Григорьевна – д.б.н., зав. лабораторией радиоэкологии животных. E-mail: [kud@ib.komisc.ru](mailto:kud@ib.komisc.ru). Область научных интересов: радиоэкология природных популяций, клеточный метаболизм.

участках на территории вблизи пос. Водный Ухтинского района. Полученные результаты были обобщены в кандидатской диссертации на соискание ученой степени по специальности «биохимия» [1]. Автором показано, что у животных, обитающих в условиях повышенного уровня естественной радиоактивности, происходят изменения отдельных биохимических показателей крови: наиболее лабильными оказались активность и спектр эстераз эфиров карбоновых кислот в плазме крови животных, а наименьшие отклонения отмечены при анализе аминокислотного состава суммарных белков плазмы крови [2, 3]. Автор в своей работе делает вывод, что обнаруженные биохимические изменения показателей крови полевок-экономок, подвергнутых хроническому лучевому воздействию в природных условиях, обусловлены целым комплексом нарушений в белковом и других обменных процессах как на субклеточном и клеточном уровнях, так и на уровне отдельных органов и тканей. Сделано предположение, что эти изменения, очевидно, протекают за счет химического (в значительной мере токсического) действия тяжелых естественных радиоактивных элементов, поступающих в организм, и сочетания этого воздействия с другими различными факторами радиационного и нерадиационного характера. Особенности этих нарушений зачастую остаются еще до конца не ясными и требуют дальнейших исследований [1, 4, 5].

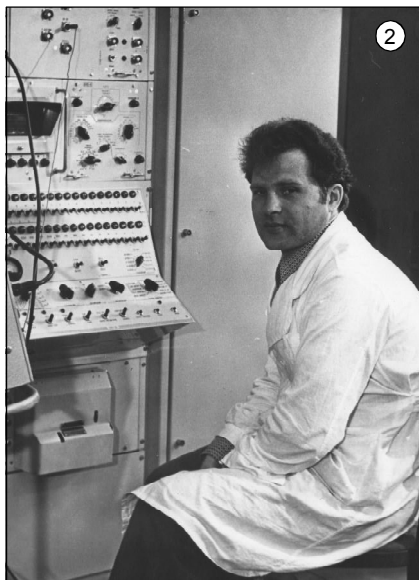
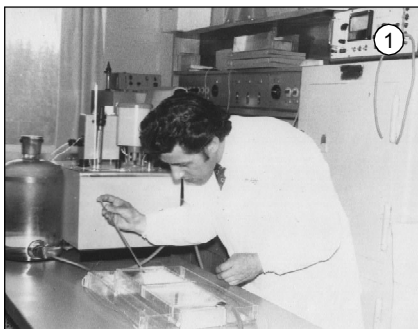
Логическим продолжением изучения проблемы радиочувствительности и радиоадаптации организма к действию малых доз ионизирующей радиации явились исследования тиоловых или сульфгидрильных групп, которым принадлежит существенная роль, в первую очередь, в определении радиочувствительности организма. По инициативе с.н.с. К.И. Масловой старшим лаборантом, а затем и младшим научным сотрудником В.Ф. Удот в биохимической лаборатории ИЭМЭЖ им.

А.Н. Северцова АН СССР (зав. лаб. д.б.н. Б.М. Граевская) был успешно освоен спектрофотометрический метод определения тиоловых групп в печени и селезенке лабораторных животных и использован при анализе полевок-экономок, отловленных на участках с различным уровнем естественной радиоактивности. Результаты анализа тиоловых групп в печени зверьков с контрольного и радиоактивного участков не показали четких различий между сравниваемыми группами животных. Однако повторная серия экспериментов с дополнительной нагрузкой на организм радиомиметика (ООК – окиси олеиновой кислоты), имитирующей действие ионизирующей радиации в полулетальной дозе, подтвердила наличие эффекта снижения общих и белковых эндогенных «тиольных» групп у полевок радиевого участка, подчеркивая тем самым большую радиочувствительность животных с радиоактивного участка к хроническому действию малых доз ионизирующей радиации. В 1975 г. исследования по определению тиоловых групп и роли их в радиочувствительности организма были продолжены старшим лаборантом А.Г. Кудяшевой [38]. Биохимические результаты по определению уровня тиолов руководитель группы к.с.-х.н., с.н.с. К.И. Маслова попыталась сопоставить с гистологической картиной происходящих изменений в печени и селезенке тех же животных, прослежена связь между падением уровня тиолов и усилением клеточной деструкции в пульпе селезенки. Установлено, что при совместном действии радиационных факторов и вещества липидной природы мышевидные

грызуны не обладают большей сопротивляемостью к действию радиомиметика по сравнению с животными, не испытывающими хронического облучения в малых дозах (рис. 1) [37].

В середине 1970-х годов вопросы радиочувствительности и радиоадаптации требовали дальнейшего углубленного комплексного изучения. В тот период, весной 1974 г., сотрудники отдела наконец переехали в новый построенный радиобиологический корпус (РБК) за железнодорожным вокзалом, который строился в течение десяти лет. На территории радиобиологического комплекса был выстроен питомник для экспериментальных животных. Большая заслуга в появлении новых, комфортных условий работы для сотрудников отдела радиобиологии принадлежала заведующему отделом В.И. Маслову, который много сил отдал, чтобы этот комплекс появился в то сложное время. В здании питомника животных для проведения радиобиологических исследований было установлено новое оборудование: рентгеновская установка, гамма-облучательная установка «Исследователь», на территории РБК был построен домик хронического гамма-облучения. Все это позволило сотрудникам успешно проводить исследования не только на животных, отловленных из биогеоценозов с повышенной радиочувствительностью, но и проводить эксперименты по влиянию ионизирующего излучения на различных видах лабораторных животных.

В 1976 г. после четырехмесячной стажировки на кафедре биохимии Белорусского государственного университета (зав. кафедрой – проф., д.б.н. А.Т. Пикулев) м.н.с. А.Г. Кудяшевой в отделе были начаты исследования процессов энергетического обмена – ферментов цикла Кребса, пируватдегидрогеназного комплекса и гликолиза в функционально различных тканях мелких млекопитающих, в том числе на лабораторных животных, мышевидных грызунах из природных популяций





(полевков-экономок), а также на зимоспящих животных (бурундуках). В те годы под руководством заведующего лабораторией радиохимических и радиофизических исследований А.И. Таскаева были развернуты не только широкомасштабные испытания предпосевого облучения семян овощных и дикорастущих растений для повышения их урожайности на полях совхозов республики, но и начаты эксперименты на мелких млекопитающих с дополнительными видами облучения. В первую очередь были проведены многочисленные эксперименты на лабораторных мышах и крысах по влиянию ионизирующего излучения разной природы и мощности (хроническое  $\gamma$ -облучение в малых дозах, рентгеновское облучение и  $\gamma$ -облучение острыми дозами) на процессы дегидрирования в различных тканях этих животных (фото 2). Эти эксперименты были успешно проведены благодаря поддержке и помощи А.И. Таскаева, так как все виды облучения на установках проводил именно он, имевший допуск для работы на них. Для определения радиочувствительности полевков-экономок из природных популяций было использовано острое облучение. Под его руководством был впервые проведен эксперимент и сделан расчет полудетальной дозы ( $LD_{50/30}$ ) для полевков-экономок природных популяций. Сравнительное изучение радиочувствительности таежных грызунов (*Microtus oeconomus* Pall.) в связи с обитанием их в различных радиоэкологических условиях среды по критерию выживаемости показало, что природные популяции полевков-экономок характеризуются высоким разбросом индивидуальной радиочувствительности ( $LD_{50/30} = 6.5-7.9$  Гр). Установлено, что обитание полевков на участках с повышенным в 50-100 раз фоном  $\gamma$ -радиации не приводит к повышению радиорезистентности взрослых (адаптированных) зверьков к острым дозам облучения. Содержание полевков в течение 9-10 месяцев в условиях вивария не сказывается на изменении их радиочувствительности [36].

В 1980-е годы были проведены первые эксперименты в домике хронического облучения на зимоспящих животных по влиянию действия хронического  $\gamma$ -облучения на состояние организма бурундуков (*Eutamias sibiricus* Laxmann) и изучены процессы энергетического обмена в период бодрствования и гибернации. Отмечены различия в поведении бурундуков,

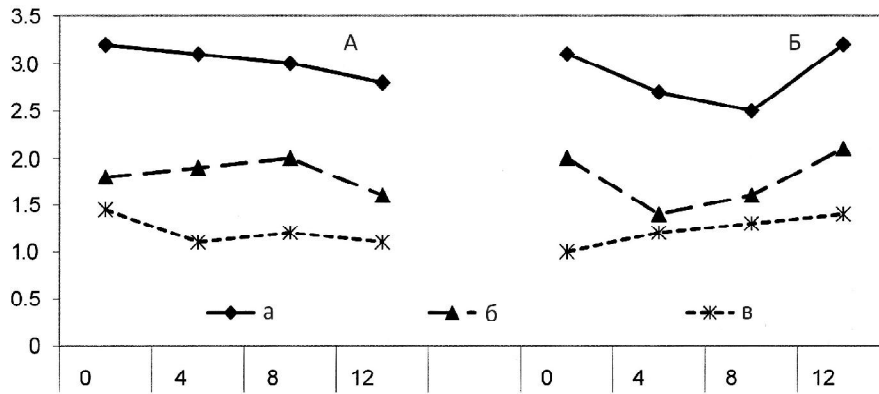


Рис. 1. Концентрация ( $n \cdot 10^{-8}$  моль/мг ткани) общих (а), белковых (б) и небелковых (в) SH-групп в печени полевков контрольного (А) и радиового (Б) участков после дополнительной нагрузки на организм окиси олеиновой кислоты (ООК). По горизонтали: время действия ООК, ч.

обусловленные влиянием хронического внешнего облучения в малых дозах на протекание процессов дегидрирования, изменения массы тела животных в разные периоды их состояния. Обнаруженные более высокие показатели массы тела и пониженная активность облученных зверьков в период гибернации являются защитными реакциями организма на хроническое действие  $\gamma$ -радиации в малых дозах. Установлено, что процессы энергетического обмена являются одним из возможных механизмов приспособления зимоспящих животных к периоду гибернации. Действие ионизирующей радиации проявляется прежде всего в дискоординации процессов дегидрирования как в период спячки, так и в другие периоды, что свидетельствует о влиянии малых доз  $\gamma$ -излучения в хроническом режиме на процессы приспособления организма к внешней среде [13, 18, 28].

Благодаря регулярным экспедициям в район бывшего радиового производства (Ухтинский район, 1981-1986 гг.) радиоэкологам удалось накопить многочисленные данные по состоянию популяций мышевидных грызунов, находящихся в условиях радиоактивного загрязнения. Дальнейшие десятилетние биохимические исследования в тканях диких грызунов, длительное время обитающих на территориях с радиоактивным загрязнением в природных условиях, м.н.с. А.Г. Кудяшевой (фото 3) позволили показать специфику действия малых доз радиации на окислительно-восстановительные ферменты с учетом возраста, пола, фазы популяционного цикла и разных радиоэкологических условий

обитания животных, оценить функциональное состояние органов и тканей грызунов. Экспериментально на потомстве полевков с контрольного и радиоактивного участков удалось вычленить один из компонентов радиационного воздействия в природных условиях, а именно – внешнее  $\gamma$ -облучение, имитирующее повышенный уровень естественной радиоактивности на радиоактивном участке. Доказано, что именно хроническое внешнее  $\gamma$ -облучение в малых дозах приводит к разнонаправленным сдвигам в активности ферментов энергетического обмена, свидетельствующим о начальных нарушениях и дисбалансе в процессах дегидрирования (рис. 2). По результатам этих исследований А.Г. Кудяшевой в 1986 г. успешно защищена кандидатская диссертация по специальности «радиобиология» в Институте онкологии и радиобиологии им. Р.Е. Кавецкого (г. Киев) [16, 18, 41].

С 1979 г. в биохимические исследования включилась выпускница Сыктывкарского государственного университета Н.Г. Загорская, которая стала

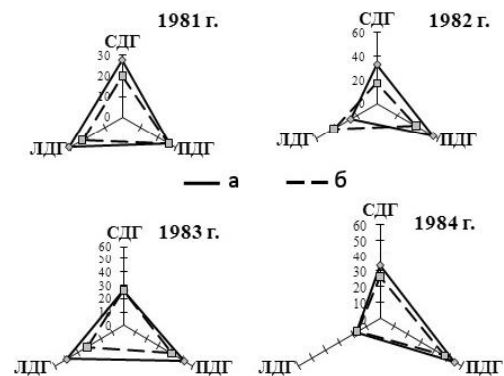


Рис. 2. Соотношение активности ферментов (пкат/мг белка) пируват- (ЛДГ), сукцинат- (СДГ) и лактат- (ЛДГ) дегидрогеназ в сердечной мышце половозрелых самцов полевков-экономок с контрольного (а) и радиового (б) участков.

бессменным и незаменимым помощником в экспедициях и проводимых экспериментах. Позднее в работу включилась м.н.с. О.Г. Шевченко, окончившая в 1992 г. Ленинградский сельскохозяйственный институт. Помощь в проведении биохимических исследований в 1980-2000-е годы оказывали инженер-химик Л.Д. Монгалева, ст. лаборанты Л.К. Попова, А.А. Рогов, Е.В. Логинова, Е.В. Ивашевская, Н.В. Бородкина.

Проблема малых доз ионизирующей радиации стала более актуальной в связи с произошедшей Чернобыльской катастрофой, поэтому группа биохимиков, как и все радиоэкологи отдела весной 1987 г., полностью переключилась на исследования в 30-километровой зоне аварии, так как в 1986 г. продолжались биохимические исследования природных популяций мышевидных грызунов на территории бывшего радиового производства в Ухтинском районе. Благодаря инициативе и под руководством А.И. Таскаева сотрудники отдела начали проводить исследования в 30-километровой зоне отчуждения уже в июне 1986 г., и группа биохимиков, в том числе все «мышатники», продолжали вести мониторинговые исследования вплоть до 1993 г. Этот период связан с новым перспективным направлением исследований в отделе: изучением процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ), имеющих важное значение в формировании биологических последствий воздействия ионизирующего излучения, особенно при малых дозах. Известно, что свободнорадикальные реакции, инициирующие процессы ПОЛ, характеризующие состояние параметров клеточных системы регуляции, являются одним из основных факторов, определяющих устойчивость организма к действию радиации [8, 57, 58]. В течение 1987-1990 гг. сотрудниками отдела А.Г. Кудяшевой, Н.Г. За-

горской, О.Г. Шевченко были освоены новые для отдела биохимические и физико-химические методы в Институте химической физики АН СССР под руководством к.х.н., с.н.с. Л.Н. Шишкиной (ныне – д.х.н., проф. Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН). Полученные данные многолетних биохимических исследований были обобщены и легли в основу защищенной А.Г. Кудяшевой в 1996 г. в МГУ им. М.В. Ломоносова докторской диссертации по специальности «радиобиология» и коллективной монографии [17, 21]. В монографии представлены результаты 15-летних исследований и раскрыты биохимические механизмы радиационного поражения природных популяций мышевидных грызунов, прослежено влияние радиоактивного загрязнения на клеточные системы регуляции процессов перекисного окисления липидов и дегидрирования в органах мышевидных грызунов, обитающих на территориях с повышенным уровнем естественной радиоактивности (Республика Коми) и в 30-километровой зоне аварии на Чернобыльской АЭС. Показана изменчивость антиокислительной активности липидов, состава фосфолипидов, обобщенных показателей липидного обмена и активности ферментов дегидрирования в органах разных по радиочувствительности видов мышевидных грызунов в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения и времени действия радиационного фактора. Обнаружена разная чувствительность органов и видов животных к радиоактивному загрязнению в природной среде, выявлены слабые и устойчивые звенья регуляции процессов ПОЛ. Установлено, что изменения антиоксидантного статуса и энергетической обеспеченности тканей мышевидных грызунов являются одним из путей биохимических адаптивных реакций к хроническому низкоинтенсивному радиационному воздей-

Продолжением этих работ с привлечением новых биохимических тест-систем, позволяющих получить дополнительные сведения о степени и глубине радиационного воздействия на клеточные системы регуляции у мышевидных грызунов, стали исследования, проводимые в 1990-е годы м.н.с. О.Г. Шевченко. Впервые изучены состав фосфолипидов, обобщенные показатели липидного обмена, интенсивность ПОЛ, активность ферментов антиоксидантной защиты в различных тканях полевков-экономок северной популяции в зависимости от возраста и пола животных, фазы популяционного цикла. Показано, что значительные изменения в составе фосфолипидов в тканях полевков-экономок из природных популяций связаны с фазами популяционного цикла зверьков. Найдена высокая чувствительность параметров системы регуляции ПОЛ к действию повышенного фона естественной радиоактивности. При этом наиболее значительные изменения липидного обмена в печени и головном мозге обнаружены у полевков-экономок, отловленных на урано-радиевом участке. Обнаружены нарушения взаимосвязей между различными параметрами ПОЛ как в радиочувствительных, так и в относительно радиорезистентных тканях. Выявлены общность и особенности действия радиации низкой интенсивности в природной среде и эксперименте. Показано, что характер ответной реакции на хроническое низкоинтенсивное облучение в малой дозе определяется, главным образом, исходным состоянием рассматриваемых параметров, по отдельным показателям облучение приводит к нивелированию различий между исходно разными группами животных (рис. 3) [45, 46, 48, 51]. Итогом полученных результатов стала диссертация, защищенная О.Г. Шевченко в 2001 г. в МГУ им. М.В. Ломоносова на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности «радиобиология».

Следующим этапом развития биохимических исследований в отделе являлось изучение сочетанного действия факторов радиационной и нерадиационной природы на клеточные системы регуляции в организме животных. В этом направлении в 1990-2000 гг. проведены серии экспериментов как на животных и их потомстве из природных популяций, отловленных на контрольных и радиоактивных участках, так и на лабораторных животных по раздельному и сочетанному

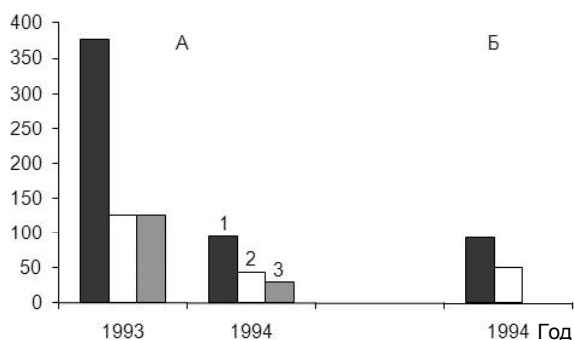


Рис. 3. Активность супероксиддисмутазы эритроцитов крови полевки-экономки (А) и рыжей полевки (Б) с контрольного (1), радиового (2) и урано-радиевого (3) участков.

ствию в условиях среды обитания. Это свидетельствует о переходе клеточного метаболизма на новый уровень функционирования, который направлен на выживание популяций и поддержание гомеостаза в изменившихся радиоэкологических условиях, что определяет процессы адаптации к хроническому воздействию радиационного фактора в малых дозах. [22, 27, 29, 56].

хроническому действию внешнего  $\gamma$ -облучения, инкорпорированных радионуклидов естественного ряда (урана-238), тяжелых металлов (нитрата свинца). Установлено, что нелинейные эффекты взаимодействия (синергизм и антагонизм) факторов различной природы с наибольшей степенью вероятности проявляются при действии низких доз/концентраций. Результат взаимодействия факторов зависит от соотношения концентраций, химических свойств и биологической значимости ионов металлов и времени действия и анализа исследуемых показателей. На лабораторных мышах линии СВА были проведены эксперименты по выявлению биохимических эффектов в ранние и отдаленные сроки после сочетанного действия хронического  $\gamma$ -облучения в малой дозе и нитрата свинца в разных дозах, а также раздельного действия хронического облучения в малых дозах и инкорпорированного нитрата урана. При сочетанном действии двух факторов возможно как усиление, так и ослабление биохимических нарушений, характерных для лучевого поражения. Установлено, что в ранние сроки анализа (1 сут.) под действием нитрата свинца на фоне хронического  $\gamma$ -облучения осуществляется функциональная перестройка систем организма, при этом наиболее высокая чувствительность к действию данных повреждающих агентов отмечена в головном мозге и системе крови. Отмечено, что наиболее глубокие изменения выявлены при низкой и средней дозах химической составляющей [30, 31].

В 2004 г. в издательстве УрО РАН была опубликована коллективная монография «Биологические эффекты в природных популяциях мышевидных грызунов» [20], которая стала итогом многолетних исследований, проведенных на природных популяциях мелких млекопитающих, обитающих на территории с нормальным и повышенным уровнем естественной радиоактивности. В ней был представлен анализ накопленных данных по динамике численности, половозрастной структуре животных, морфофизиологических параметров, системы регуляции перекисного окисления ли-

пидов, активности ферментов антиоксидантной защиты и энергетического обмена, процессов размножения и развития, цитогенетических показателей в клетках и тканях диких грызунов на территории Республики Коми. Совокупность представленных данных об отсутствии синхронного изменения смены фаз популяционного цикла у полевков-экономок урано-радиевого участка, увеличение вариабельности большинства исследуемых биохимических показателей, нарушение процессов размножения, повышение генетического груза, усиление микроэволюционных процессов – все это свидетельствует о нестабильном состоянии популяций полевков-экономок, обитающих длительное время в условиях повышенного уровня естественной радиоактивности. На основе анализа комплекса всех изученных параметров был сделан вывод о формировании на данных территориях качественно новых субпопуляций полевков-экономок, обитающих в разных радиоэкологических условиях (рис. 4) [6, 11, 23, 25].

В XX в. особую актуальность приобрела задача защиты населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях. К числу способов такой защиты относят не только предотвращение проникновения радионуклидов в организм, но и защиту клеток и тканей, и выведение из организма инкорпорированных радионуклидов, а также применение препаратов и пищевых веществ, противодействующих возрастанию процессов липопероксидации в биологических мембранах [14]. Для защиты организма от различных повреждающих факторов техногенного происхо-

ждения, в том числе от хронического действия ионизирующего излучения в малых дозах, нормализации процессов клеточного метаболизма стали широко применять природные антиоксиданты, обладающие противолучевой активностью и являющиеся средствами профилактики и раннего лечения предпатологических состояний организма при длительном действии факторов разной природы. С 1998 г. до настоящего времени совместно с лабораторией биохимии и биотехнологии Института биологии (зав. лаб. д.б.н., проф. В.В. Володин) ведутся совместные исследования в рамках тем, поддержанных грантами по программам фундаментальных исследований президиума РАН и УрО РАН «Фундаментальные науки – медицине»: «Разработка метода повышения адаптационных возможностей организма у жителей Крайнего Севера», (2004-2009 гг.) и «Молекулярно-клеточные механизмы стресс-устойчивости и оценка возможности фитотермофизиологической коррекции адаптивных реакций организма в неблагоприятных условиях окружающей среды, высоких физических и психо-эмоциональных нагрузок» (2009-2011 гг.) (науч. рук.: А.И. Таскаев).

В этом направлении в отделе были проведены многочисленные эксперименты на животных по изучению биологического действия экдистероидсодержащих соединений (серпистен и инокостерон), выделенных из растений местной флоры. Эти исследования были начаты в связи с поиском новых соединений растительного происхождения с целью коррекции пострадиационных нарушений, выявляемых

на клеточном и мембранном уровнях. Изучены токсичность (однократное и хроническое действие), биологическая активность соединений на организм лабораторных мышей с использованием физиологических, функциональных, поведенческих критериев, определены биохимические механизмы противолучевых свойств серпистена и инокостерона. Установлено, что при совместном действии серпистена и хронического  $\gamma$ -излучения в малой дозе наблюдаемый эф-



Рис. 4. Схема изменение качества популяций полевков-экономок при длительном обитании в условиях радиоактивного загрязнения среды.

фект в значительной степени зависел как от дозы вещества, так и времени его поступления в организм (до или после облучения) (рис. 5). Применение серпистана в относительно малой дозе при курсовом введении после прекращения действия  $\gamma$ -излучения вызывало нормализацию фосфолипидного спектра эритроцитов крови и печени мышей по большинству из изученных показателей; препятствовало снижению темпов роста массы животных, обусловленному воздействием хронического низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения, что говорит о наличии противолучевых свойств у данного препарата на организменном уровне. Доказано, что при тера-

певтическом использовании серпистен обладает выраженным противолучевым эффектом в области низкоинтенсивного облучения в малой дозе, однако радиозащитный эффект зависит от дозы препарата [9, 24, 26, 42].

Дополнительно более подробно было проведено изучение противолучевых свойств индивидуального 25S-инокостерона, входящего в состав серпистана. Доказано, что инокостерон способен проявлять противолучевые свойства при воздействии низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения в малой дозе и при определенной схеме введения способен приводить к нормализации показателей состояния ПОЛ в тканях облученных мышей [9]. Таким образом, результаты биохимических исследований убедительно показали, что биологическая активность экдистероидсодержащих препаратов связана с воздействием на параметры физико-химической системы регуляции ПОЛ. Это обуславливает их способность модифицировать эффекты низкоинтенсивного  $\gamma$ -облучения животных в малых дозах. Установлена существенная зависимость биологических последствий облучения от дозы экдистероидсодержащих соединений, времени их поступления в организм и исходного антиоксидантного статуса животных [40, 49].

В последнее время на основе обобщения данных литературы и результатов экспериментов, проведенных на теплокровных лабораторных животных при курсовом введении серпистана и инокостерона в малых дозах, установлено, что биохимический

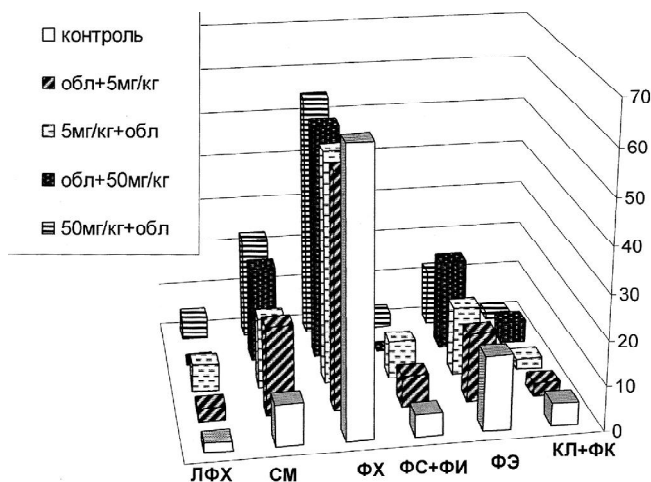


Рис. 5. Относительное содержание (%) различных фракций фосфолипидов в эритроцитах крови мышей при профилактическом и терапевтическом введении серпистана мышам, облученным в дозе 22.6 сГр. Условные обозначения: ЛФХ – лизофосфатидилхолин, СМ – сфингомиелин, ФХ – фосфатидилхолин, ФС+ФИ – фосфатидилсерин+фосфатидилинозит, ФЭ – фосфатидилэтаноамин, КЛ+ФК – кардилипин+фосфатидная кислота.

механизм действия фитоэкдистероидов в малых дозах имеет близкие механизмы, характерные для адаптивных клеточных реакций при хроническом действии низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения. Показано, что механизм действия фитоэкдистероидов связан с активацией свободнорадикальных процессов, увеличением индуцибельного белка стресса Hsp70, которые способствуют адаптации и повышению резистентности организма к стрессовым воздействиям [15].

В рамках темы отдела на 2009-2011 гг. «Оценка значимости эффектов, вызванных хроническим радиационным и нерадиационным воздействием на молекулярно-клеточном уровне, для организма и популяций животных и растений» продолжены исследования по анализу взаимосвязей между параметрами физико-химической системы регуляции перекисного окисления липидов в эритроцитах, тканях полевки-экономки и лабораторных животных в норме и в условиях хронического низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения в малых дозах. Особое внимание было уделено исследованиям влияния хронического воздействия  $\gamma$ -излучения в малых дозах в ранние периоды онтогенеза на окислительные процессы в органах грызунов. Показано, что эффект выявляется не только непосредственно после прекращения облучения, но и спустя три месяца после прекращения воздействия. Дисбаланс биохимических функций в организме не всегда напрямую связан с ростом мощности и/или дозы  $\gamma$ -излучения и сопровождается нарушением

масштаба взаимосвязей между морфологическими показателями. Сделан вывод, что хроническое низкоинтенсивное  $\gamma$ -излучение в антенатальном периоде развития оказывает системное воздействие на организм животных, обуславливая его функционирование на другом уровне регуляции [10, 55].

Определена зависимость ответной реакции антиоксидантной (АО) системы, процессов дегидрирования в тканях мышевидных грызунов из природных популяций на дополнительное облучение в малых дозах от исходного состояния ее параметров (состава фосфолипидов, активности супероксиддисмутазы, об-

щей пероксидазной активности, содержания вторичных продуктов перекисного окисления липидов, активности ферментов цикла Кребса и гликолиза). Полевки-экономки, родители которых принадлежали к популяциям, обитающим на контрольном и радиоактивно загрязненном участках, различались как по исходному АО статусу, активности ферментов дегидрирования, так и по реакции на дополнительное облучение. Именно неодинаковой ответной реакцией на воздействие облучения в малых дозах объясняется обнаруженное нивелирование различий по ряду показателей. При прогнозировании эффектов воздействия факторов низкой интенсивности следует учитывать исходные характеристики биологических объектов [47]. Проведена сравнительная оценка адаптивных реакций процессов энергетического обмена (по активности ключевых ферментов гликолиза, пируватдегидрогеназного комплекса и цикла Кребса) в тканях полевок-экономок, отловленных на территориях с разным уровнем естественной радиоактивности, и их потомства (контрольный и радиевый участки, первое-третье поколение, виварского происхождения) при стрессовых воздействиях разной природы (холод, хроническое  $\gamma$ -облучение в малых дозах, острое тотальное  $\gamma$ -облучение в дозе 6 Гр). Установлено, что направленность и характер биохимических сдвигов на дополнительные воздействия стресса разной природы, интенсивности и продолжительности действия определяются в значительной мере исходным уровнем

процессов энергетического обмена у полевок и их потомства, не подвергающихся этим воздействиям (рис. 6). Показано, что полевки-экономки и их потомство (первое-третье поколения) радиевого участка при дополнительных стрессовых воздействиях характеризуются более низкими резервными функциональными возможностями [15].

В последнее время продолжены исследования состава фосфолипидов и физико-химических характеристик липидов селезенки, эритроцитов крови и печени полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.) разного возраста, как отловленных в естественной среде обитания, так и принадлежащих к лабораторным популяциям. Выявленные возрастные изменения в составе ФЛ полевок-экономок природных популяций связаны с обеспеченностью липидов тканей антиоксидантами, поскольку наиболее значительные изменения отмечали именно в тех тканях (эритроциты крови и селезенка), для которых характерна низкая АОА липидов. Отмечено, что способность липидов селезенки разлагать пероксиды либо накапливать их взаимосвязана с составом ФЛ (рис. 7). В процессе старения организма параметры системы регуляции ПОЛ изменяются не однонаправленно, поскольку в группе животных одного возраста могут встречаться особи с различными биохимическими характеристиками. Масштаб и направленность возрастных изменений параметров системы регуляции ПОЛ зависели от типа тканей, исходного уровня антиокислительной активности ее липидов и пола животных. В естественных условиях обитания степень выраженности возрастных изменений в тканях модифицируется популяционными факторами [50, 53].

Повышенный интерес исследователей к изуче-

нию мембран эритроцитов обусловлен участием этих клеток в процессах, связанных с поддержанием гомеостаза на уровне целого организма. Известно, что эритроциты вовлекаются в патологический процесс не только при гематологических заболеваниях, но и претерпевают серьезные изменения структуры и функции при болезнях разного генеза. Мембранам эритроцитов присущи общие принципы молекулярной организации плазматических мембран, что позволяет рассматривать

эритроцит как универсальную модель для изучения изменений цитоплазматических мембран и метаболизма клеток организма [52]. В связи с этим в последние годы проводили сравнительное изучение состава фосфолипидов и физико-химических свойств липидов эритроцитов крови полевок-экономок, отловленных на территориях с нормальным и повышенным уровнем естественной радиоактивности в разные фазы популяционного цикла. Показано, что изменения в липидной

компоненте мембран эритроцитов крови полевок-экономок, обитающих на участках с повышенным уровнем естественной радиоактивности (Республика Коми), связаны с интенсификацией процессов перекисного окисления липидов и активацией эндогенных фосфолипаз. Происходящая перестройка в мембранах липидов, направленная на сохранение фазового состояния мембраны эритроцита и ее функциональной активности, в некоторых случаях позволяет компенсировать негативное воздействие радиоактивного загрязнения среды обитания животных [54] (рис. 8).

Дальнейшие биохимические исследования в лаборатории радиоэкологии животных будут направлены на решение основной проблемы: выявление закономерностей и возможных механизмов развития ответной реакции животных и их потомков на хроническое воздействие факторов физической и химической природы низкой интенсивности в природной среде. В перспективе будут решаться следующие задачи: исследование биохимических механизмов реакции эритроцитов крови и различных тканей млекопитающих на окислительный стресс, индуцированных факторами физической и химической природы в системах *in vitro* и *in vivo*; проведение экспериментальных иссле-

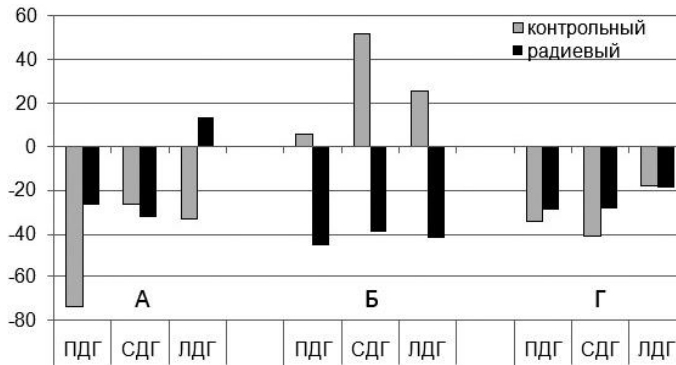


Рис. 6. Уровень активности ферментов дегидрирования в сердечной мышце (А), печени (Б) и головном мозге (В) полевок-экономок после воздействия холодом (% по отношению к значениям активности ферментов у сравниваемых групп полевок без воздействия). Условные обозначения те же, что и на рис. 2.

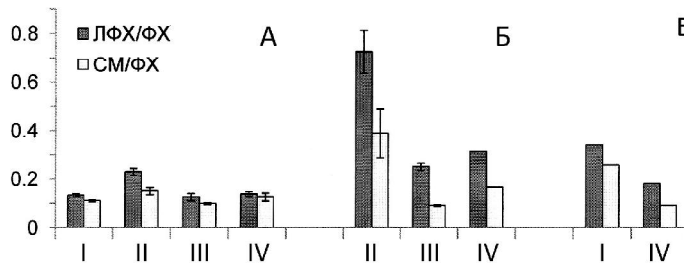


Рис. 7. Соотношения фракций фосфолипидов эритроцитов крови полевок-экономок, отловленных на контрольном (А), радиевом (Б) и урано-радиевом (В) участках в фазу пика численности. Условные обозначения: I – самки-сеголетки, II – самки перезимовавшие, III – самцы-сеголетки, IV – самцы перезимовавшие.

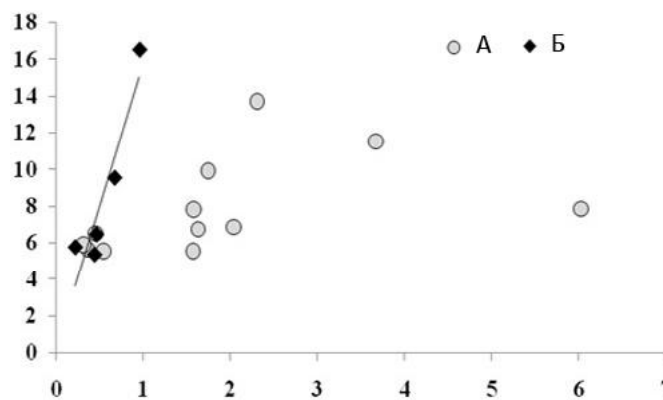


Рис. 8. Взаимосвязь между содержанием пероксидов (ROOH, ммоль/г; по горизонтали) и долей анионных фосфолипидов (ФЛ; по вертикали) в липидах эритроцитов полевок-экономок, отловленных на радиевом (А) и контрольном (Б) участках. Для контроля  $R_3 = 0.90$ ,  $P = 0.037$ .



дований с использованием дополнительных нагрузок после хронического облучения для выявления адаптивных возможностей животных. Вместе с тем в отделе будут продолжаться исследования механизмов действия на организм млекопитающих препаратов растительного происхождения и использование их в качестве адаптогенов, повышающих неспецифическую реакцию и стрессоустойчивость организма при воздействии неблагоприятных факторов окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев А.Т. Белки плазмы крови и гемоглобин полевков-экономок (*Microtus oeconomus*), обитающих в различных условиях: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1974. 29 с.

2. Алиев А.Т., Кашкин К.П. Эстеразы плазмы крови полевков-экономок (*Microtus oeconomus*), обитающих в условиях повышенного уровня естественной радиации // Радиобиология, 1973. Т. 13, вып. 4. С. 598-602.

3. Алиев А.Т., Коржуев П.А. Аминокислотный состав белков плазмы крови полевков-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в различных радиологических условиях // Радиобиология, 1973. Т. 13, вып. 6. С. 818-823.

4. Алиев А.Т., Коржуев П.А. Электрофоретическая характеристика гемоглобина полевков-экономок (*Microtus oeconomus*), обитающих в различных радиологических условиях // Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующей радиации: Матер. Всесоюз. симпоз. Сыктывкар, 1973. С. 57-58.

5. Алиева М.И., Алиев А.Т. Аминокислотный состав белков плазмы крови полевки-экономки (*Microtus oeconomus* Pall.) // Биол. науки, 1973. № 2. С. 39-41. – (Науч. докл. высш. школы).

6. (Кудяшева А.Г.) Biological consequences of increased natural radiation background for *Microtus oeconomus* Pall. populations / A.G. Kudyasheva, L.N. Shishkina, O.G. Shevchenko, L.A. Bashlykova, N.G. Zagorskaya // J. Environm. Radioactivity, 2007. Vol. 97. № 1. P. 30-41.

7. (Бочвар И.А.) Расчет внешнего гамма-облучения мышевидных грызунов на участках с повышенной естественной радиоактивностью / И.А. Бочвар, В.С. Никифоров, Б.В. Тестов и др. // Экология, 1972. № 5. С. 37-42.

8. (Бурлакова Е.Б.) Биоантиоксиданты в лучевом поражении и злокачественном росте / Е.Б. Бурлакова, А.В. Алесенко, Е.М. Молочкина и др. М., 1975. 214 с.

9. (Володин В.В.) Фармакологическая оценка новой экдистероидсодержащей субстанции «Серпистен» / В.В. Володин, Л.Д. Пчеленко, С.О. Володина, А.Г. Кудяшева, О.Г. Шевченко, Н.Г. Загорская // Растительные ресурсы, 2006. Т. 42, вып. 3. С. 113-130.

10. (Загорская Н.Г.) Влияние хронического воздействия гамма-излучения в малых дозах в ранние периоды онтогенеза на окислительные процессы в органах грызунов / Н.Г. Загорская, А.Г. Кудяшева, О.Г. Шевченко и др. // Радиационная биология, 2007. Т. 47, № 4. С. 493-500.

11. Загорская Н.Г., Кудяшева А.Г., Башлыкова Л.А. Динамика численности и некоторых морфофизиологических показателей полевков-экономок, обитающих в разных радиологических условиях // Радиоактивные и биологические последствия низкоинтенсивных воздействий. Сыктывкар, 2003. С. 19-34. – (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 172).

12. Загорская Н.Г., Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н. Влияние радиоактивного загрязнения на липидный обмен в печени полевков-экономок // Радиологический мониторинг природных экосистем. Сыктывкар, 1993. С. 45-53. – (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 130).

13. Загорская Н.Г., Материй Л.Д., Кудяшева А.Г. Действие хронического  $\gamma$ -облучения на бурундуков в условиях вивария // Радиобиология, 1984. Т. 24, вып. 4. С. 561-563.

14. (Измеров Н.Ф.) Свинец и здоровье. Гигиенический и медико-биологический мониторинг / Н.Ф. Измеров, А.Е. Ермоленко, Л.А. Тарасова и др. М., 2000. 256 с.

15. Краткий годовой отчет о выполнении планов НИР за 2010 год отделом радиэкологии по теме «Оценка значимости эффектов, вызванных хроническим радиационным и нерадиационным воздействием на молекулярно-клеточном уровне, для организма и популяций животных и растений» (№ Гр 0120.0 853805). Сыктывкар, 2010. 21 с.

16. Кудяшева А.Г. Активность дегидрогеназ (сукцинатдегидрогеназы, пируватдегидрогеназы и лактатдегидрогеназы) в тканях полевков-экономок, обитающих в условиях повышенной радиоактивности: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев, 1986. 24 с.

17. Кудяшева А.Г. Антиоксидантный статус, состав фосфолипидов и процессы дегидрирования в органах мышевидных грызунов из районов с радиоактивным загрязнением: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 1996. 35 с.

18. Кудяшева А.Г. Видовые особенности энергетического обмена у двух видов грызунов // Экология, 1985. № 6. С. 72-74.

19. Кудяшева А.Г. Роль тиолов и дегидрогеназ в радиочувствительности *Microtus oeconomus* Pall. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. С. 33-42 – (Тр. Коми НЦ УрО АН СССР; № 97).

20. (Кудяшева А.Г.) Биологические эффекты радиоактивного загрязнения в популяциях мышевидных грызунов / А.Г. Кудяшева, Л.Н. Шишкина, О.Г.

Шевченко, Л.А. Башлыкова, Н.Г. Загорская. Екатеринбург, 2004. 214 с.

21. (Кудяшева А.Г.) Биохимические механизмы радиационного поражения природных популяций мышевидных грызунов / А.Г. Кудяшева, Л.Н. Шишкина, Н.Г. Загорская, А.И. Таскаев. СПб.: Наука, 1997. 156 с.

22. (Кудяшева А.Г.) Влияние техногенного загрязнения на регуляторные системы клетки / А.Г. Кудяшева, Л.Н. Шишкина, Н.Г. Загорская, А.И. Таскаев. Сыктывкар, 1990. 40 с. – (Сер. Науч. докл. / Коми НЦ УрО АН СССР; Вып. 248).

23. (Кудяшева А.Г.) Мониторинг популяций полевков-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в условиях повышенного радиационного фона / А.Г. Кудяшева, Л.Н. Шишкина, О.Г. Шевченко, Л.А. Башлыкова, Н.Г. Загорская // Радиационная биология, 2004. Т. 44, № 3. С. 262-268.

24. (Кудяшева А.Г.) Противолучевые свойства экдистероидсодержащего препарата Серпистен / А.Г. Кудяшева, О.Г. Шевченко, Н.Г. Загорская, Л.А. Башлыкова, О.В. Ермакова и др. // Фитофарм-2006: Актуальные проблемы создания новых лекарственных препаратов природного происхождения: Матер. конф. СПб., 2006. С. 198-202.

25. (Кудяшева А.Г.) Эколого-биохимический анализ популяций мышевидных грызунов, отловленных на территориях с повышенным радиационным фоном / А.Г. Кудяшева, ..., Н.Г. Загорская, О.Г. Шевченко, А.И. Таскаев // Биорад-2009: Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Матер. междунар. конф. Сыктывкар, 2009. С. 72-74.

26. Кудяшева А.Г., Загорская Н.Г., Шевченко О.Г. Действие экдистероидов серпухи венценосной на биохимические показатели печени белых мышей // Радиологические и биологические последствия низкоинтенсивных воздействий. Сыктывкар, 2003. С. 274-280. – (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 172).

27. Кудяшева А.Г., Загорская Н.Г., Шевченко О.Г. Склад фосфоліпідів та антиоксидантний статус органів мишей, експонированих у зоні Чорнобильської АЕС // Укр. радіол. журн., 1996. Т. 4. № 1. С. 88-91.

28. Кудяшева А.Г., Таскаев А.И. Уровень активности дегидрогеназ в норме и при хроническом действии внешнего  $\gamma$ -облучения у бурундуков // Радиобиология, 1984. Т. 24, вып. 2. С. 230-233.

29. Кудяшева А.Г., Таскаев А.И., Загорская Н.Г. Влияние комплексного загрязнения на параметры систем регуляции метаболизма клетки // Чернобыль'88: Докл. I Всесоюз. науч.-техн. совещ. по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. В 4-х томах. Т. 3. Прогнозы изменения радиационной обстановки и дозовых нагрузок в зоне аварии. Чернобыль, 1989. Ч. II. С. 124-141.

30. 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 (11). С. 56-65.
31. Кудяшева А.Г., Шевченко О.Г., Загорская Н.Г. Функциональное состояние печени мышей при хроническом действии нитрата свинца и гамма-облучения в малой дозе // Сочетанное действие факторов радиационной природы на растительные и животные организмы. Сыктывкар, 2000. С. 23-33. – (Тр. Коми НЦ УрО РАН; Вып. 164).
32. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Загорская Н.Г. Видовые особенности в повреждении регуляторных систем клеток печени мышевидных грызунов в условиях слабого радиоактивного загрязнения // Экология, 1994. № 6. С. 48-53.
33. Маслов В.И. Аккумуляция урана, радия и тория животными радиоэкологической группы тесного контакта с радиоактивными веществами в среде обитания // Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующей радиации: Матер. Всесоюз. симпозиум. Сыктывкар, 1973. С. 100-101.
34. Маслова К.И. Морфологические изменения в структуре половых желез полевок-экономок, обитающих на участках с повышенной радиоактивностью // Материалы I радиобиологической конференции социалистических стран. Шпindelлерув Млыи-Бедрихов (ЧССР), 1974. С. 196.
35. Маслова К.И. Морфофизиологические индикаторы как критерий оценки действия малых доз ионизирующей радиации в природной среде // Биологические исследования на северо-востоке европейской части СССР. (Ежегодник-1974). Сыктывкар, 1975. № 9. С. 142-148.
36. Маслова К.И. О радиочувствительности и радиорезистентности природных популяций мелких млекопитающих // Радиочувствительность растений и животных биогенезов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. С. 5-15 – (Тр. Коми НЦ УрО АН СССР; № 97).
37. Маслова К.И. Радиочувствительность таежных грызунов и возможность их приспособления к действию ионизирующей радиации как радиоэкологическому фактору среды. Сыктывкар, 1978. 23 с. – (Сер. Науч. докл. / Коми фил. АН СССР; Вып. 40).
38. Маслова К.И., Кудяшева А.Г. К вопросу о радиочувствительности мелких грызунов, обитающих в разных радиоэкологических условиях // Вторая радиобиологическая конференция социалистических стран. Варна, 1978. С. 188-189.
39. Материй Л.Д. Морфология периферической крови у полевок-экономок, обитающих в различных радиоэкологических условиях // Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующей радиации: Матер. Всесоюз. симпозиум. Сыктывкар, 1973. С. 32-33.
40. (Кудяшева А.Г.) Патент № 2326672, Российская Федерация, МКИ8 А61R31/565, А39/00. Противолучевое средство / А.Г. Кудяшева, В.В. Володин, О.Г. Шевченко, Н.Г. Загорская, С.В. Володина, О.В. Ермакова; Институт биологии Коми НЦ УрО РАН; № 2006108965/15; заявл. 21.03.06; опубл. 20.05.08. Бюл. № 17.
41. 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.
42. (Пчеленко Л.Д.) Оценка возможного токсического и мутагенного эффектов экдистероидов серпухи венценовой (*Serratula coronata* L.) / Л.Д. Пчеленко, С.О. Володина, Н.Г. Загорская, О.Г. Шевченко // Радиозэкологические и биологические последствия низкоинтенсивных воздействий. Сыктывкар, 2003. С. 235-241. – (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 172).
43. Тестов Б.В., Мусеев А.А. Доза облучения грызунов в природных условиях с повышенной радиоактивностью // Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующей радиации: Матер. Всесоюз. симпозиум. Сыктывкар, 1973. С. 179-180.
44. Тестов Б.В., Таскаев А.И. Концентрация радиоактивных эманий в норках мышевидных грызунов на участках с повышенной радиоактивностью // Материалы радиозэкологических исследований в природных биогенезах. Сыктывкар, 1971. С. 65-76.
45. Шевченко О.Г. Состав фосфолипидов в тканях полевок-экономок, обитающих в условиях повышенной естественной радиоактивности // Воздействие радиоактивного загрязнения на наземные экосистемы в зоне аварии на Чернобыльской АЭС (1986-1996 гг.). В 2-х томах. Сыктывкар, 1996. Т. 1. С. 123-131. – (Тр. Коми НЦ УрО РАН; № 145).
46. Шевченко О.Г. Состояние процессов перекисного окисления липидов в тканях мышевидных грызунов из районов с повышенной естественной радиоактивностью: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2001. 24 с.
47. (Шевченко О.Г.) Зависимость ответной реакции полевок-экономок на низкоинтенсивное облучение от исходного состояния антиоксидантной системы тканей / О.Г. Шевченко, Н.Г. Загорская, ..., А.Г. Кудяшева // Журн. эволюц. биохим. физиол., 2008. Т. 44, № 2. С. 180-186.
48. (Шевченко О.Г.) О некоторых особенностях регуляции антиоксидантной системы у диких видов мышевидных грызунов / О.Г. Шевченко, Н.Г. Загорская, А.Г. Кудяшева и др. // Экология, 1999. № 1. С. 73-76.
49. (Шевченко О.Г.) Противолучевые свойства экдистероидсодержащих препаратов / О.Г. Шевченко, А.Г. Кудяшева, Н.Г. Загорская, Л.Н. Шишкина // Радиационная биология. Радиоэкология, 2007. Т. 47, № 4. С. 501-508.
50. Шевченко О.Г., Загорская Н.Г., Шишкина Л.Н. Взаимосвязь состава фосфолипидов и физико-химических характеристик липидов в тканях полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.) разного возраста // Журн. эволюц. биохим. физиол., 2010. Т. 46, № 4. С. 297-303.
51. Шевченко О.Г., Л.Н. Шишкина, Кудяшева А.Г. Влияние популяционных факторов на состав фосфолипидов различных тканей полевок-экономок природных популяций // Журн. эволюц. биохим. физиол., 2002. Т. 38, № 2. С. 169-175.
52. Шевченко О.Г., Шишкина Л.Н. Липиды эритроцитов крови как модель для оценки биологических последствий действия физических и химических факторов // Биорад-2009: Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Матер. междунар. конф. Сыктывкар, 2009. С. 381-383.
53. Шевченко О.Г., Шишкина Л.Н. Состав фосфолипидов эритроцитов крови полевок-экономок *Microtus oeconomus*, обитающих в разных радиоэкологических условиях // Журн. эволюц. биохим. физиол., 2010. № 1. С. 37-44.
54. Шевченко О.Г., Шишкина Л.Н. Липиды эритроцитов крови как модель для оценки биологических последствий воздействия физических и химических факторов // Технологии живых систем, 2009. Т. 6, № 8. С. 21-32.
55. (Шишкина Л.Н.) Показатели антиоксидантного статуса в тканях потомков полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.) из районов с повышенной естественной радиоактивностью / Л.Н. Шишкина, А.Г. Кудяшева, Н.Г. Загорская, О.Г. Шевченко // Радиационная биология. Радиоэкология, 2005. Т. 45, № 4. С. 474-479.
56. (Шишкина Л.Н.) Регуляция окислительных процессов в тканях мышевидных грызунов, отловленных в зоне аварии на ЧАЭС / Л.Н. Шишкина, А.Г. Кудяшева, Н.Г. Загорская, А.И. Таскаев // Радиационная биология. Радиоэкология, 2006. Т. 46, № 2. С. 216-232.
57. (Шишкина Л.Н.) Роль антиоксидантного статуса в формировании последствий биологического действия низкоинтенсивного излучения в малой дозе / Л.Н. Шишкина, Е.В. Кушнирева, О.Ф. Беспалько, Н.В. Полякова // Радиационная биология. Радиоэкология, 2000. Т. 40, № 2. С. 162-167.
58. 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. ❖

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГИСТОЛОГИЯ

Более полувека назад, в Коми филиале АН СССР был издан приказ о создании на базе ранее существующей радиобиологической группы лаборатории радиобиологии. Всего набралось 12 человек «первопроходцев». Эта «великолепная дюжина» послужила научным костяком нового коллектива новой лаборатории на коми земле. Научный руководитель – П.П. Вавилов, исполняющий обязанности заведующего лабораторией – В.И. Маслов, И.Н. Верховская – бессменный научный консультант лаборатории, а также вдохновитель создания гистоморфологического направления. У истоков этого направления стояла Клара Иосифовна Маслова. К ней в группу я и пришла в сентябре 1979 г., центральное «гистологическое» звено тогда составляли К.И. Маслова, Л.Д. Материй и Л.В. Батура. В помощь к Людмиле Владимировне Батуре, надежному и незаменимому помощнику наших научных сотрудников и в поле, и в виварии, и в лаборатории, виртуозу в деле нелегких и трудоемких методик лабораторных исследований я и поступила на «заливку», «проводку» и «покраску» гистологических препаратов. К этому времени у меня уже был двухлетний опыт работы лаборантом-гистологом в Институте охоты и звероводства в г. Кирове и студенческий диплом по гистологии по окончании кафедры зоологии позвоночных СГУ.

«Всегда полезно оглянуться в прошлое, которое сохраняет нам наша память, и задуматься... Ведь прошлое – это наша совесть, наш тыл, наша опора, по которым следует чаще выверять свои настоящие дела и поступки, а также отталкиваться в будущее...» Эти строки Лариса Дмитриевна Материй использовала в одной из своих статей, она очень часто обращалась к словам мудрых. И сегодня я вновь возвращаюсь к этим словам, вспоминая замечательных гистологов-радиобиологов, моих соратников и учителей, неординарных исследователей, их слабые работы и их основные достижения.

За все время существования нашей группы гистологи внесли большой вклад в познание свойств тканей, выявили многие важные закономерности функционирования тканевых структур у животных с загрязненных радионуклидами территорий. Были усовершенствованы гистологические и морфометрические методы исследования, с помощью которых получены данные об особенностях развития и патологии тканей у мышевидных грызунов в условиях радиоактивного загрязнения среды обитания.

В основу наших работ всегда были положены морфологические, морфометрические и цитогенетические методы, позволяющие зарегистрировать перестройки в тканевых системах под действием продолжительных по времени повреждающих факторов невысокой степени интенсивности, каким является фактор хронического воздействия ионизирующего излучения. Если сравнить по скорости



О. Ермакова

реакции изменения, происходящие на биохимическом уровне (например, содержание гормонов в крови животных), со структурными, происходящими на уровне тканей и клеток, то уже через несколько минут можно зафиксировать изменения показателей гормонов, и только по прошествии 4-12 ч можно увидеть изменения в структуре, причем показатели содержания гормонов в крови будут сильно варьировать в течение достаточно короткого времени.

Безусловно, больше стабильности мы увидим именно в структуре и сохранятся структурные нарушения значительно дольше. Именно поэтому при длительном и постоянном воздействии какого-либо фактора мы отдаем предпочтение морфологическим методам исследования. И с самого зарождения радиологического направления в нашем отделе эти методы разрабатываются и широко используются.

Проводимое на мелких млекопитающих многолетнее изучение состояния органов и тканей важнейших систем обеспечения (репродуктивной, иммунной, эндокринной, сосудистой систем и печени) позволило установить закономерности развития деструктивных и компенсаторных процессов, а также формирования необратимых патологий. Было установлено, что выявленные патоморфологические изменения формируются на фоне активно протекающих компенсаторно-восстановительных процессов, направленных на приспособление организма к условиям повышенной радиоактивности. Оказалось, что активизация компенсаторных реакций, создавая напряженное состояние, усугубляет патологические процессы [4-6]. Деструктивные изменения проявляются в виде сосудистых расстройств, дистрофических нарушений клеток, их локальной гибели, переходящей в некоторых случаях в очаги некроза тканей. При этом наблюдается появление атипичных клеточных форм, воспалительных инфильтратов, признаков преждевременного старения тканей и т.д. Параллельно протекающие компенсаторно-восстановительные процессы (активизация физиологической и репаративной регенерации тканей, развитие гиперплазии и гипертрофии клеток), с одной стороны, могут быть направлены на поддержание клеточного и функционального гомеостаза исследуемых систем, с другой – создают напряженное, неустойчивое состояние, ведущее к дезорганизации всей системы.

В системе крови компенсаторные процессы проявляются в высоком количестве кариоцитов, усилении пролиферативной активности клеточных пулов костного мозга. Особый интерес вызывает синхронное нарастание в системе крови таких клеточных форм, как микролимфоциты, плазматические клетки, моноциты и мегакариоциты. Это свидетельствует о напряжении защитных механизмов органа путем вовлечения системы крови в иммунный ответ на действие повреждающего фактора. В эндо-

Ермакова Ольга Владимировна – д.б.н., в.н.с. отдела радиозологии. E-mail: [ermakova@ib.komisc.ru](mailto:ermakova@ib.komisc.ru). Область научных интересов: радиозология, эндокринология, гистология.

кринной системе компенсаторно-восстановительные процессы выражаются в гиперплазии и гипертрофии («добавочная» кора надпочечников и пролиферация фолликулярного эпителия щитовидной железы).

Степень выраженности биологических эффектов во многом определяется генезисом радиоактивного загрязнения, уровнем  $\gamma$ -фона, множеством популяционных характеристик (пол, возраст, фаза популяционного цикла, миграционная активность животных), а также воздействиями нерадиационной природы [2, 6].

Основная тенденция современной гистологии, в том числе и экологической гистологии – переход от описательных исследований к экспериментальным. Экологическая гистология – направление, изучающее особенности развития и строения тканей в связи с воздействием условий обитания и адаптацией к окружающей среде. Главной задачей группы гистологов ставится познание тканевых механизмов развития, деятельности и патологии организмов в неблагоприятных условиях существования при воздействии хронического облучения. Закономерна направленность гистологических работ по пути познания субмикроскопической структуры ткани и специализированных клеток, качественных и количественных особенностей их метаболизма при различных функциональных состояниях. Комплексный подход в радиоэкологических исследованиях природных биогеоценозов, по мнению В.И. Маслова, предусматривает изучение биологического действия радиационных факторов на всех уровнях – от молекулярного до популяционного – с охватом тех основных вопросов, которые помогают выяснению механизмов радиочувствительности и адаптации организма и популяций к действию малых доз радиации [3].

Необходимо отметить, что экологию Всеволод Иванович Маслов тогда понимал как науку о популяциях. Большое внимание уделял он в своей работе именно популяционному уровню. До сих пор многие вопросы влияния хронического облучения на популяции животных в природной среде остаются нерешенными. Представление о самостоятельности популяционного уровня жизни, наряду с молекулярным и организменным, потребовало поиска новых методов изучения природных популяций. Признавая, что важнейшей целью радиоэкологических исследований является установление закономерностей динамики популяций в условиях радиационного загрязнения среды обитания, следует считать особенно целесообразным применение методов, которые позволяли бы оценивать физиологическое состояние конкретных «контрольных» и «опытных» популяций с учетом возрастной, половой и сезонной специфики. При этом изучение физиологических особенностей популяций не являлось самоцелью, а рассматривалось лишь как средство изучения их реакций в целом на действие факторов внешней среды. Метод морфофизиологических индикаторов, разработанный С.С. Шварцем [7], был подхвачен многими экологами в нашей стране. Более чем 30-летняя практика использования этого метода в нашем отделе показала перспективность его

применения при решении ряда вопросов радиоэкологии. Шире развернулись и гистологические исследования. В основу анализа популяций мышевидных грызунов «контрольных» и «опытных» территорий был положен принцип сопоставления морфофункциональных, эколого-физиологических, гистоморфологических особенностей изучаемых видов. Накопленный многолетний материал по интересным особенностям различных видов, обитающих на территориях с нормальной и повышенной радиочувствительностью, позволил найти различия в «популяционной норме» природных микропопуляций.

Самые первые гистоморфологические исследования, проводимые И.Н. Верховской и К.И. Масловой по биологической эффективности малых доз ионизирующей радиации на репродуктивную систему мелких млекопитающих, обитающих на территориях, загрязненных естественными радионуклидами, показали высокую радиочувствительность сперматогенного эпителия. Изменения, происходящие в гонадах, как было установлено, представляли собой сложный комплекс деструктивных компенсаторно-репаративных процессов, влияющих в целом на состояние организма и популяции [1]. Занимаясь проблемами радиочувствительности крови и кроветворных органов у животных в природной среде на загрязненных территориях техногенного происхождения, Л.Д. Материй выявлены морфологические признаки снижения естественного иммунитета, выход в периферическую кровь юных и бластных форм красного и белого ростков, качественные изменения клеточного состава кроветворной ткани, появление мегалобластов. Перечисленные изменения можно квалифицировать как начальные признаки возможного развития необратимой патологии. Эти закономерности легли в основу ее диссертации «Цитоморфологическое изучение системы крови у полевок-экономок, обитающих в условиях действия повышенных уровней естественной радиочувствительности». Бурная защита диссертации (1979 г.) в среде московских светил науки показала, что не только она, но и весь коллектив отдела подняли пласт науки, еще пока мало изученный, но очень важный в целях экологической профилактики загрязненных территорий и защиты людей от невидимой простым глазом радиации.

В дальнейшем гистоморфологические исследования были продолжены на органах эндокринной системы [2]. Известно, что эндокринная система первой включается в биологический ответ, участвует в поддержании организмом гомеостаза и играет ключевую роль в осуществлении адаптации к постоянно изменяющимся условиям окружающей среды.

На основе многолетних данных, полученных на радиовом полигоне (Республика Коми) и в зоне аварии на Чернобыльской АЭС, К.И. Масловой, Л.Д. Материй, О.В. Ермаковой и А.И. Таскаевым был издан «Атлас патоморфологических изменений у полевок-экономок из очагов локального радиоактивного загрязнения», который является уникальным научным трудом. В нем представлен богатый иллюстративный материал, характеризующий гисто- и цитоморфологическое состояние органов и тканей кроветворной, половой, эндокринной систем и пе-

чени мышевидных грызунов, обитающих на техногенно загрязненных территориях [4]. Накопленный гистологический материал указывает на то, что при воздействии хронического облучения в малых дозах наблюдаются существенные изменения структуры жизненно важных органов и систем.

В настоящее время отдел продолжает исследование биогеоценозов с повышенным фоном естественного и техногенного происхождения. С особой остротой стоит проблема сочетанного биологического действия радиационного и многочисленных сопутствующих факторов среды, что может иметь самые неожиданные последствия. Поэтому продолжение и расширение таких исследований исключительно важно как в теоретическом, так и практическом плане.

Наша группа, ее старейшины (К.И. Маслова и Л.Д. Материй) и сегодняшние сотрудники (О.В. Ермакова, О.В. Раскоша, Д.В. Гурьев, Н.Н. Старобор) на протяжении всего периода исследований проводит гистоморфологические исследования органов и тканей на разных этапах онтогенеза мышевидных грызунов, обитающих на территориях с повышенной радиоактивностью. Внимание сосредоточено не только на непосредственных, но и на отдаленных последствиях повреждающих воздействий на структурно-функциональные характеристики органов, а также гистогенетических и гормональных механизмах адаптивных и деструктивных реакций этих органов в ответ на воздействие неблагоприятных факторов среды. Экспериментальные подходы (воздействие различных дополнительных к облучению стрессирующих факторов в дозах, не вызывающих выраженных повреждающих эффектов) и использованные методы исследования (комплекс микроскопических, морфометрических, цитогенетических, физиологических и экологических методов) позволяют нам зафиксировать не только типы клеточных перестроек, но и процессы, протекающие в различные сроки после облучения. Накопленные данные свидетельствуют о том, что даже малые дозы ионизирующего излучения вызывают модификации базисных гистогенетических процессов – пролиферации, дифференцировки клеток различных тканей. Это приводит к формированию отклонений в нормальном строении различных органов, изменению их клеточного состава, что сочетается с нарушениями адаптивных функций.

Современное гистологическое направление отдела радиоэкологии тесно связано с цитологией, эмбриологией, медициной и другими науками. Достижения патологической гистологии широко используются в медицине, позволяя понять механизм развития различных заболеваний и предложить способы их лечения. В радиоэкологии использование гистологических методов исследования актуально и помогает решить ряд проблем закономерностей развития и дифференцировки клеток и тканей у организмов в условиях хронического воздействия малых доз радиации, вопросы адаптации на клеточном и тканевом уровнях, проблемы восстановления тканей и органов. Особого внимания заслуживают эффекты малых доз хронического облучения на молекулярно-клеточном уровне: поврежде-

ние генетического аппарата, проявляющееся в усилении процессов формирования клеток с микроядрами. Такие изменения в соматических клетках могут приводить к генетической трансформации и развитию злокачественных новообразований.

Перспективным направлением исследований группы в настоящий момент является использование культивируемых клеток в качестве «модельной системы», позволяющей проводить исследования на клеточном и молекулярном уровнях. На культурах клеток проводятся сравнительные исследования изменений уровня и типа поврежденности генома (количество повреждений ДНК и их соотношение), способности к репарации повреждений ДНК, чувствительности к дополнительному радиационному воздействию, частоты клеточной гибели, состояния окислительно-восстановительного гомеостаза у потомков облученных клеток и сравнение их с таковыми у клеток, не подвергавшихся непосредственно облучению, но получивших комплекс сигналов разлечной природы от облученных клеток («bystander» клетки).

Цель наших сегодняшних работ – синтез сведений разного уровня исследований (клетка, ткань, тканевые комплексы, орган) применительно к свойствам целостного организма и популяции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Верховская И.Н., Маслова К.И., Маслов В.И.* Действие малых доз радиации и инкорпорированных естественно-радиоактивных элементов на сперматогенез полевок-экономок в природных условиях // *Радиобиология*, 1965. Т. 5, вып. 5. С. 720-729.
2. *Ермакова О.В.* Морфофункциональные изменения щитовидной железы и коры надпочечников у полевок-экономок, обитающих в условиях повышенной радиоактивности: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 1991. 25 с.
3. *Маслов В.И.* Опыт и итоги многолетних комплексных радиоэкологических исследований в природных биогеоценозах повышенной естественной радиоактивности // *Радиоэкологические исследования почв, растений и животных в биогеоценозах Севера*. Сыктывкар, 1983. С. 6-20. – (Тр. Коми фил. АН СССР; № 60).
4. (*Маслова К.И.*) Атлас патоморфологических изменений у полевок-экономок из очагов локального радиоактивного загрязнения / *К.И. Маслова, Л.Д. Материй, О.В. Ермакова, А.И. Таскаев*. СПб.: Наука, 1994. 129 с.
5. *Материй Л.Д., Ермакова О.В.* Гистоморфологические критерии оценки радиоактивного загрязнения среды (воздействие на животных в зоне Чернобыльской АЭС). Сыктывкар, 1993. 24 с. – (Сер. Науч. докл. / Коми НЦ УрО РАН; Вып. 312).
6. *Материй Л.Д., Ермакова О.В., Таскаев А.И.* Морфофункциональная оценка состояния организма млекопитающих в радиоэкологических исследованиях (на примере полевки-экономки). Сыктывкар, 2003. 64 с.
7. *Шварц С.С., Смирнов В.С., Добринский Л.Н.* Метод морфофизиологии индикаторов в экологии наземных позвоночных. Свердловск, 1968. 386 с. (Тр. ИЭРиЖ / Урал. фил. АН СССР; Вып. 58). ❖

**ЭКОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ РЕАКЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
(ОТ КЛЕТКИ ДО ПОПУЛЯЦИИ) НА НИЗКОИНТЕНСИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**И**сследование вклада биологических и физических факторов в формирование адаптивного ответа природных популяций является сегодня особенно важным в связи с необходимостью прогнозирования экологических последствий антропогенного повышения радиационного фона. Проблемы, связанные с воздействием радиации в малых дозах, возникли на территориях, пострадавших от испытаний ядерного оружия, от аварии на ЧАЭС, Южном Урале. Для Республики Коми эта проблема также имеет большое значение, так как на ее территории имеются участки с повышенным радиационным фоном естественного и техногенного происхождения. Изменения уровня радиационного фона в большинстве случаев ускоряют микроэволюционные процессы, изменяя генетическую структуру популяций, подвергшихся такому воздействию. Это прекрасно понимал П.Ф. Рокицкий, который, получив поддержку президиума тогда еще Коми филиала АН СССР, стал инициатором радиобиологических исследований на территории Коми АССР. Поэтому нет ничего удивительного в том, что одним из первых в СССР, кто представил кариотип человека, подвергшегося облучению, был сотрудник отдела радиоэкологии П.А. Бородкин.

Интенсивные исследования последствий облучения для генотипа животных и растительных объектов были предприняты при руководстве отделом А.И. Таскаевым. Этому было несколько причин, прежде всего личный научный интерес Анатолия Ивановича, сложившиеся к тому времени научные связи отдела и, наконец, авария на Чернобыльской атомной станции, которая однозначно определила первостепенность генетических исследований на человеке как для целей биологической дозиметрии, так и для оценки рисков отдаленных последствий облучения. Накопившийся в отделе опыт исследований последствий облучения в малых дозах для генотипов человека, растительных и животных объектов, актуальность и необходимость исследований генетических последствий облучения в малых дозах для животных и растений определили тему работы лаборатории радиационной генетики на перспективу.

В определении понятия «эффекты малых доз ионизирующей радиации» существуют физический и биологический аспекты. В соответствии с физическими представлениями, механизмы взаимодействия излучения с веществом остаются неизменными во всем диапазоне доз. Вероятность повреждения находится в линейной зависимости от дозы облучения, а малые дозы соответствуют такому уровню воздействия излучения на биологическую систему, когда наблюдается только одно событие пролета



**В. Зайнуллин**



**Т. Евсеева**

ионизирующей частицы через заданный биологический объем.

Ранее были известны понятия чувствительного объема и чувствительной мишени, повреждение которых имеет для клетки решающее значение. В настоящее время общепризнанно, что мишенью действия ионизирующего излучения служит ДНК ядра. Микродозиметрические расчеты пока-

зывают, что суммарная поглощенная доза 0.01 Гр (1 рад) гамма-излучения <sup>60</sup>Со вызывает в среднем три повреждения ядра. При снижении суммарной поглощенной дозы уменьшается количество попаданий в мишень, соответственно падает и доля пораженных ядер. Учитывая вышесказанное, можно более точно определить понятие «малой дозы» облучения: это такая доза облучения, при которой фракция поврежденных чувствительных объектов меньше 0.2 ( $F < 0.2$ ). Такой уровень достигается при поглощенной дозе около 0.06 сГр (60 мрад).

В ядре-мишени, получившем попадание, поглощается энергия, величина которой варьирует в широких пределах – так, для гамма-излучения <sup>60</sup>Со ее максимальное и минимальное значения отличаются более чем в 100 раз. Средняя энергия, поглощенная в мишени при одном акте попадания, для данного типа излучения является характерной величиной и она различна для разных типов излучений с разной величиной линейной передачи энергии.

Поглощение энергии при прохождении ионизирующей частицы через мишень вызывает специфическое и неспецифическое изменения. Первую группу образуют разрывы ДНК, из которых самым существенным является двойной разрыв макромолекулы. Для его возникновения необходимо абсорбировать энергию около 100 эВ в мишени размером примерно 3 нм. В этой точке в определенной степени соприкасаются области действия малых и больших доз облучения. Для возникновения двойного разрыва ДНК необходима вышеприведенная локальная энергия, хотя общая поглощенная доза может быть любой. Остальным изменениям в ДНК (однотипные разрывы, повреждения оснований, поперечные сшивки) не уделяется большого значения из-за их быстрого восстановления. Двойные разрывы ДНК тоже восстанавливаются, но гораздо медленнее. Здесь мы подходим к другому существенному аспекту действия малых доз – действию излучения с низкой мощностью поглощенной дозы. При этом существенным становится не только само количество попаданий в мишень, но и то, как часто они происходят. Если интервал между двумя попаданиями достаточно велик (около нескольких часов), естественно ожидать, что изменения, вызванные первым попаданием, успеют восстановиться, и действие второго попадания не будет зависеть от предшествующей дозы.

**Евсеева Татьяна Ивановна** – д.б.н., в.н.с. отдела радиоэкологии. Область научных интересов: радиоэкология, экотоксикология, радиобиология, цитогенетика.

**Зайнуллин Владимир Габдуллович** – д.б.н., проф., зав. лабораторией радиационной генетики. Область научных интересов: популяционная генетика, генетическая изменчивость, радиационный мутагенез, мобильные генетические элементы, малые дозы радиации.



Второй аспект «малых доз ионизирующей радиации» – биологический. В диапазоне малых доз наблюдается индукция широкого спектра биологических эффектов, которые включают адаптивный ответ, гормезис и генетическую нестабильность. Это связано с тем, что облучение в малых дозах вызывает активацию ряда клеточных механизмов, которые модифицируют клеточный ответ на повреждающее действие радиации и определяют нелинейный характер зависимости эффекта от дозы. Поэтому с биологической точки зрения наиболее уместно определить диапазон малых доз облучения по принципу формирования специфических радиобиологических эффектов, которые отличаются от эффектов облучения в больших дозах. Необходимо учитывать, что в условиях хронического облучения популяций неизбежно адаптивное изменение спектра радиобиологических реакций и при более универсальном рассмотрении проблемы малыми дозами облучения (воздействия) можно считать те дозы, которые не вызывают соматической гибели организма.

Следует отметить, что ионизирующая радиация влияет на клеточные функции на всех уровнях организации клетки, но повреждение ДНК, как уже отмечали, представляет наиболее критическое для клетки и организма событие. Ионизирующая радиация индуцирует повреждения ДНК не только при непосредственном попадании ионизирующей частицы, но и косвенно, через индукцию свободных радикалов. Эти повреждения имеют неодинаковую природу. При прямом повреждении ДНК индуцируются повреждения оснований, спивки ДНК-ДНК и ДНК-белок, одно- и двунитевые разрывы ДНК. Мутации, индуцируемые косвенным способом, имеют природу, сходную со спонтанными мутациями, и в основном представлены повреждениями оснований и одностранными разрывами ДНК. Клетка имеет механизмы, которые защищают генетический материал от повреждений. Эти механизмы, прежде всего, обеспечивают контроль клеточного цикла, детоксикацию активных форм кислорода и репарацию генетических повреждений.

Наибольшую опасность для клетки представляют двунитевые разрывы ДНК, поэтому активация индуцибельных клеточных механизмов происходит именно на этот тип повреждений. Двунитевые разрывы ДНК являются индукторами таких эффектов малых доз облучения, как адаптивный ответ и генетическая нестабильность.

Другой тип реакций, который наблюдается в диапазоне малых доз, относится к индуцированной генетической нестабильности. Понятие генетической нестабильности можно отнести к широкому спектру клеточных реакций в ответ на облучение. Оно включает изменения кариотипа и генные мутации, амплификацию генов и нестабильность хромосом, нарушение процессов репарации и опухолевую трансформацию клеток. Механизмы, лежащие в основе формирования генетической нестабильности, полностью еще не выявлены. Допускают, что может существовать субпопуляция клеток (клеток онтогенетического резерва), которые обладают повышенной чувствительностью к облучению и отвечают за формирование эффектов генетической нестабильности. Поскольку прямого воздействия облучения на ДНК не происходит, предполагают, что в формировании нестабильности могут участвовать

эпигенетические механизмы. Кроме того, процессу генетической нестабильности способствует дефицит репаративной активности, нарушения в контроле клеточного цикла и апоптотической гибели клеток.

Явление генетической нестабильности также может быть обусловлено активностью мобильных генетических элементов. В отличие от непосредственных повреждений ДНК, которые устраняются в процессе репарации или закрепляются в виде стабильных мутаций, активация мобильных генетических элементов может вести к нескольким циклам транспозиций, вызывать образование нестабильных мутаций и способствовать многократному увеличению повреждений ДНК после действия облучения, как это показано на примере транспозона *Mu* кукурузы. В некоторых случаях высокий уровень транспозон-индуцированной мутабельности, например, отдельных лабораторных линий дрозофилы, может быть обусловлен отбором на низкий уровень приспособленности и наблюдаться в течение сотен поколений. Предполагают, что у *Drosophila melanogaster* процесс генотипической адаптации к мутагенному действию облучения может сопровождаться активацией мобильных генетических элементов. Роль этих генетических факторов, по-видимому, заключается в комплексном изменении адаптивно важных признаков при встраивании в регуляторные области генов. Это показывает, что мобильные элементы играют большую роль в обеспечении связи между генетической изменчивостью и приспособленностью организмов к неблагоприятным условиям существования. Таким образом, особенностью эффектов малых доз облучения является широкий спектр биологических реакций.

Главные последствия малых доз ионизирующей радиации для многоклеточного организма являются для него неблагоприятными. Сюда относятся генетические изменения, повышенная мутабельность и уровень канцерогенеза, а также возможная дегенерация клеток и их ускоренное старение.

Однако, возможно и «благоприятное» действие малых доз, так называемый радиационный гормезис. В литературе имеется достаточно много данных, свидетельствующих о гормезисе. Например, более низкий процент возникновения опухолей в областях с повышенным радиационным фоном, благоприятные изменения в иммунной системе после воздействия малых доз облучения, изменение роста растений, продолжительности жизни и т.д. К оценке этих результатов следует подходить весьма осторожно. Часто сложно отличить первичный, положительный эффект радиации от результатов, вызванных регуляторными процессами, которые, возможно, индуцированы повреждением других тканей.

Итак, отсутствие порога в индукции генетических нарушений под действием облучения не вызывает сомнений. С другой стороны, очевидно, что облучение в малых дозах приводит к индукции некоторых генетических и эпигенетических механизмов, могущих существенно модифицировать результат действия облучения, что позволяет предполагать сложность предсказания величины конечных радиобиологических реакций. Основным компонентом в определении эффектов облучения в малых дозах является индуцированная генетическая нестабильность, на фоне которой возможна реализа-

ция разнообразных радиобиологических реакций, приводящих как к стимуляции, так и значимому угнетению жизненно важных функций клетки или организма.

Крайне удобной для оценки последствий облучения в малых дозах является *Drosophila melanogaster*. Сегодня это секвенированный геном, самая подробная коллекция мутантных линий. Традиционные и современные методы исследований в экспериментах на этом объекте позволяют получить все разнообразие эффектов, о которых упоминалось выше. Поэтому заключая рассмотрение эколого-генетических эффектов облучения в малых дозах для животных организмов, можно остановиться на нескольких рисунках, показывающих наши последние результаты.

Данные о выживаемости самцов дрозофилы линии *Canton-S* после облучения в течение первого поколения (накопленная доза 100 мГр) показывают, что облучение приводит к достоверно значимому снижению уровня выживаемости, однако эффективность реакции на облучение зависит от цитотипа (наличия/отсутствия активных мобильных элементов) изучаемых особей (рис. 1). Полученные нами результаты по оценке выживаемости разных генотипов дрозофилы после облучения в разных дозах позволили обнаружить, что облучение в меньших дозах приводит к большему сокращению времени выживания, нежели после облучения в максимальных дозах у линии дикого типа *Canton-S*. Более того, скорость гибели особей после облучения в большей дозе со временем несколько снижается (рис. 2А). Более выраженные зависимости характера кривых выживаемости от доз облучения показаны для мутантных линий дрозофил (рис. 2Б, В). Полученные результаты свидетельствуют о том, что величина и направление реакции организмов на облучение в малых дозах зависит от генотипа, который модифицирует величину ответа на облучение в зависимости от множества иных факторов, в частности, от продолжительности облучения и мощности дозы.

Одним из важнейших направлений в радиоэкологических исследованиях является выявление закономерностей воздействия радиоактивных веществ на

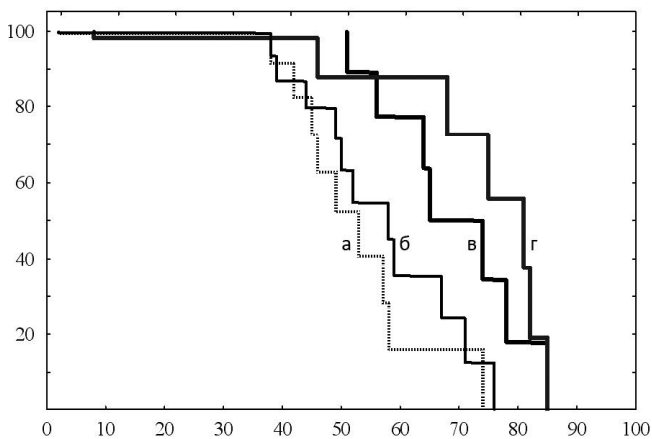


Рис. 1. Выживаемость (%) имаго самцов из экспериментальных популяций дрозофилы, различающихся по содержанию мобильных генетических элементов. Здесь и далее: по оси абсцисс – время жизни, сутки. Условные обозначения: а – популяции, не имеющие в геноме Р-элементы (100 мГр за поколение); б – популяции с «внесенными» Р-элементами (100 мГр за поколение); в – популяции, не имеющие в геноме Р-элементы (контроль); г – популяции с «внесенными» Р-элементами (контроль).

фитоценозы как природные комплексы, занимающие значительную территорию суши нашей планеты, составляющие 99 % всей биомассы Земли и являющиеся первым звеном ведущих к человеку трофических цепочек. Фактически с первых шагов становления радиоэкологии в 1930-х годах начинается изучение эффектов в природных популяциях растений, заселяющих территории с повышенным естественным фоном радиоактивности. В 1940-1950 гг. получают развитие такие направления, как лесная и сельскохозяйственная радиоэкология.

В Институте биологии Коми НЦ УрО РАН с момента создания самостоятельной лаборатории радиобиологии в 1959 г. были развернуты исследования эффектов хронического облучения природных популяций растений. Под руководством П.П. Вавилова, при участии А.И. Таскаева, Б.И. Груздева О.Н. Поповой, Р.П. Коданевой и В.И. Шершуновой были получены первые данные о накоплении тяжелых естественных радионуклидов (ТЕРН) в организме растений из природных популяций. Определены виды-биоиндикаторы для изучения индуцированных повышенными концентрациями ТЕРН биологичес-

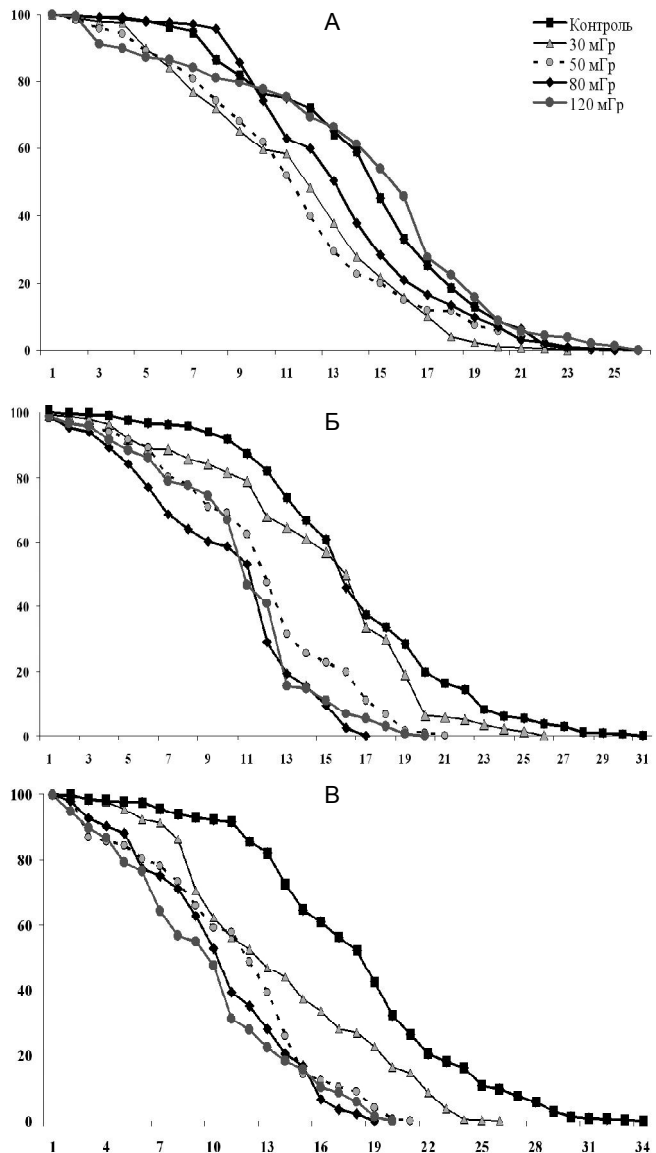


Рис. 2. Выживаемость имаго самцов мутантных линий дрозофилы *Canton-S* (А) *mus210* (Б) и *mei-41* (В) после пролонгированного  $\gamma$ -облучения в разных дозах.

ких эффектов. Проведена оценка эффективности внешнего облучения, создаваемого высокоактивными урано-радиевыми отвалами на экспериментальные популяции растений. Выявлена более высокая биологическая эффективность совместного действия инкорпорированных ТЕРН и внешнего излучения. Обнаружены различия в спектре цитогенетических нарушений, индуцируемых при разных условиях облучения растений. Весомый вклад в развитие радиоэкологии растений внесли работы Г.М. Козубова, А.И. Таскаева, О.Н. Поповой, Н.П. Фроловой, В.И. Шершуновой, выполненные при изучении последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Многолетние исследования лесных и луговых экосистем позволили изучить динамику мутационного процесса в природных популяциях растений в период острого и хронического облучения, оценить изменение их репродуктивных способностей в зависимости от доз облучения и на основе полученной информации дать прогнозные оценки возможных последствий для фитоценозов радиоактивных выпадений.

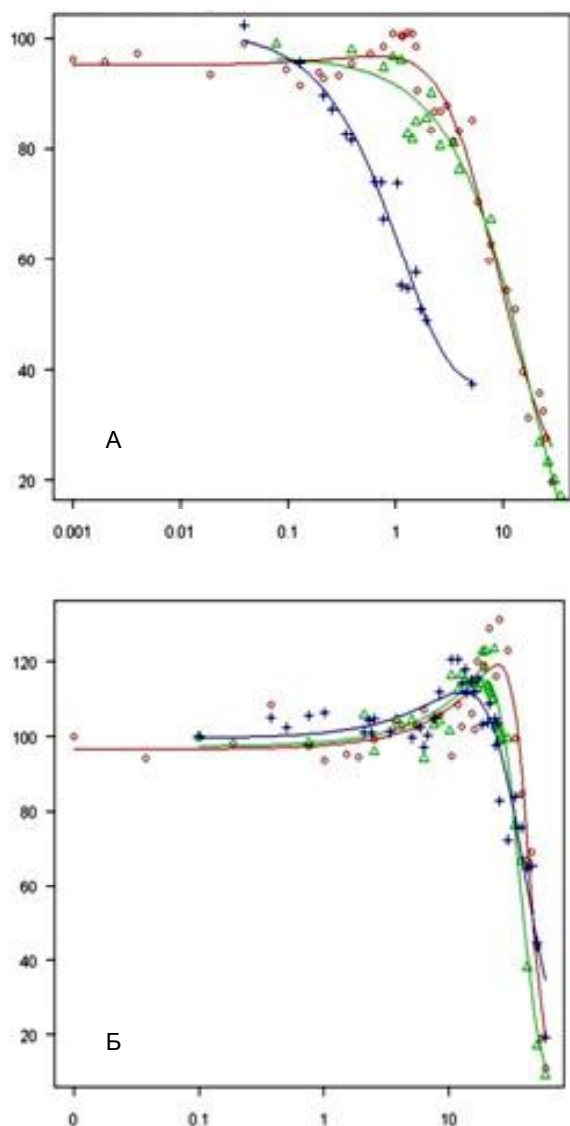


Рис. 3. Зависимости снижения прироста биомассы *Chlorella vulgaris* от концентрации  $^{232}\text{Th}$  (А) либо  $^{238}\text{U}$  (Б) в суспензии при их раздельном или совместном с бутионинсульфоксимином и кофеином действии. По оси абсцисс: логарифм концентрации, мкмоль/дм<sup>3</sup>; по оси ординат: прирост биомассы по отношению к контролю, %.

По мере накопления информации о реакции природных популяций на воздействие ионизирующих излучений в разных радиоэкологических ситуациях стала очевидной необходимость оценки роли факторов радиационной и нерадиационной природы в наблюдаемых изменениях в сообществах растений. До сих пор анализ эффектов, возникающих при воздействии многокомпонентных смесей, содержащих радиоактивные и нерадиоактивные загрязнители, является серьезным пробелом в научных знаниях и одной из задач радиоэкологии, требующей скорейшего решения.

В отделе радиоэкологии эта тематика на протяжении ряда лет являлась основным направлением научной деятельности. Было показано, что синергические мутагенные эффекты у растений чаще возникают при совместном действии факторов радиационной и химической природы в таких дозах, которые не являются остро токсичными, но индуцируют труднорепарируемые повреждения ДНК. В диапазоне низких доз действующих факторов могут быть обнаружены и антагонистические эффекты. Для этого доза хотя бы одного из факторов должна быть достаточной для активации процессов восстановления повреждений ДНК. Увеличение интенсивности воздействия ведет к проявлению достоверных токсических эффектов, регистрируемых в зависимости от силы совместного влияния факторов, на уровне тканей, органов или организма растений. На основе проведенных экспериментов с лабораторными и природными популяциями растений было сделано фундаментальное обобщение о том, что синергический и антагонистический типы реакции биологических систем на совместное воздействие факторов радиационной и химической природы являются закономерными событиями и возникают с наибольшей вероятностью в диапазоне низких, характерных для условий окружающей среды, дозовых нагрузок. По этой причине реально наблюдаемый уровень биологических эффектов в природных популяциях, населяющих радиоактивно загрязненные территории, может превышать прогнозируемый на основе результатов экспериментальных исследований раздельного действия факторов (рис. 3).

Развитие этих идей поставило необходимость решения новых задач, связанных как с определением механизмов устойчивости растений к воздействию радиоактивных и нерадиоактивных токсичных элементов, так и с разработкой научных основ радиационной защиты окружающей среды. Планомерные исследования сотрудников отдела радиоэкологии в этих направлениях позволили определить пределы дозовых нагрузок, не вызывающих достоверные эффекты у биоты, и показали, что негативные изменения в природных популяциях растений и животных, обитающих в условиях совместного влияния радионуклидов уранового и ториевого рядов, могут наблюдаться при более низких дозовых нагрузках, чем в случае действия внешнего  $\gamma$ -излучения. Причем процессы репарации повреждений ДНК играют более существенную роль в снижении токсичности  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  для клеток растений, чем глутатионзависимый путь (рис. 4).

Немалое значение в рамках поставленных задач отведено проблеме защиты почвенного покрова как важнейшего компонента биосферы от радиоактив-

ного загрязнения. При изучении современной радиационной ситуации на Семипалатинском испытательном полигоне были составлены карты радиоактивного загрязнения и токсичности почв в районе испытательных площадок, проведено зонирование почв по степени нарушения их экологических функций.

Нельзя не упомянуть, что проводимые исследования по вопросам биологических последствий радиационных воздействий и проблемам радиационной защиты окружающей среды и нормирования радиационных воздействий на биоту всегда проводились в тесном контакте со специалистами ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии РАСХН (лаборатория экотоксикологии растений, зав. проф., д.б.н. С.А. Гераськин), Института общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН (лаборатория экологической генетики, зав. д.б.н. А.В. Рубанович), Института химической физики РАН им. Семенова (лаборатория 16, зав. д.б.н. А.Н. Осипов).

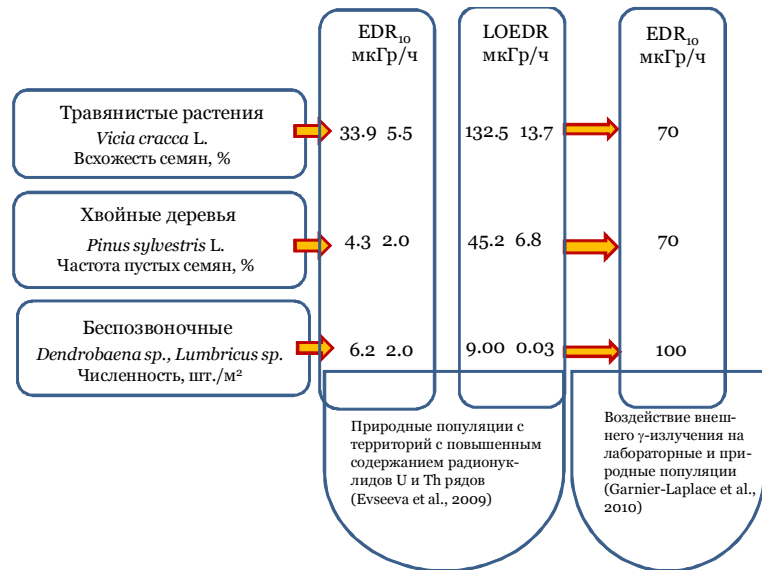


Рис. 4. Безопасные (EDR<sub>10</sub>) и эффективные (LOEDR) мощности поглощенных доз для биоты.

### ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ СТРЕССОУСТОЙЧИВОСТИ И ДОЛГОЛЕТИЯ

д.б.н. А. Москалев, к.б.н. М. Шапошников, к.б.н. О. Шосталь, Е. Плюснина, Е. Романова, И. Велегжанинов, А. Данилов, В. Мезенцева, Д. Чернышова

Изучение модельных животных (нематод, дрозофил, мышей) с мутациями, приводящими к увеличению продолжительности жизни, выявило непосредственную регуляторную связь между долгожительством, стрессоустойчивостью и условиями существования индивидуума [25, 28]. Молекулярные механизмы стрессоустойчивости имеют непосредственное отношение к долголетию [29]. В настоящее время существует острая необходимость в детализации и систематизации молекулярно-гене-

тических процессов, обеспечивающих долголетие и устойчивости организма к неблагоприятным факторам среды.

Нами предложена функциональная классификация генов, регулирующих продолжительность жизни организма [9]. Выделены три основные функциональные группы (рис. 1): регуляторы отвечают за восприятие и передачу внешнесредовых сигналов (наличие питательных веществ, сигналы о перенаселении, условия температурного и светового режимов, облучение), синтез, рецепцию и трансдук-

цию цитокинов, факторов роста и гормонов; медиаторы кодируют киназы и деацетилазы белков, транскрипционные факторы, которые под действием «регуляторов» включают или выключают программу стрессоустойчивости клетки в ответ на сигналы из окружающей среды или эндогенный физиологический стресс; эффекторы кодируют белки теплового шока, факторы антиоксидантной защиты, репарации ДНК и белков, компоненты протеасомы, кальпаины, белки автофагии и врожденного иммунитета, детоксици-

**Москалев Алексей Александрович** (1976 г.р.) – руководитель группы молекулярной радиобиологии и геронтологии в лаборатории радиационной генетики отдела радиоэкологии. В Институте биологии работает с 1999 г. после окончания Сыктывкарского государственного университета. В 2001 г. защитил кандидатскую, в 2004 г. – докторскую диссертации. Автор более 150 научных печатных работ, в том числе четырех монографий и более 50 статей (восемь опубликованы за рубежом) в рецензируемых журналах. Один из организаторов и заместитель председателя (с 2002 г.) Сыктывкарского отделения Всероссийского геронтологического общества РАН. Член ученого и диссертационного советов Института биологии, редколлегии журнала «Biogerontology» (изд-во Springer), рецензент журналов «Experimental Gerontology», «Pharmacological Research», «Doze Response» и «Радиационная биология. Радиоэкология», научный эксперт фондов «Наука за продление жизни» (Москва, Россия), «Life Extension Research Foundation» (Вильнюс, Литва) и «LifeStar Institute World Health Initiative» (Эдмонтон, Канада). Инициировал проведение в Сыктывкаре (2008-2010 гг.) международных семинаров и конференций по проблемам биологии старения: «Генетика продолжительности жизни и старения (семинар)», «Радиационное старение» и «Генетика продолжительности жизни и старения (конференция)». Активно участвовал в организации и работе международных конференций «Биорад» (2006, 2009 г.) и ежегодной Всероссийской молодежной конференции.

Стипендиат главы Республики Коми (2000 г.), обладатель грантов президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых-кандидатов (МК-178.2003.04) и докторов наук (МД-1929.2005.4, МД-1266.2007.4). Победитель конкурса молодых ученых на лучшую научную работу в области биологии УрО РАН (2000 г.) и конкурса Геронтологического общества РАН на лучшую работу по геронтологии среди молодых ученых (2003 г.). Лауреат программы «Кандидаты наук» Фонда содействия отечественной науке (2004-2005 гг.), премии им. Н.В. Тимофеева-Ресовского для молодых ученых УрО РАН (2004 г.), премии Научного совета по радиобиологии РАН (2005 г.), премии и медали «За успехи в радиационной генетике» им. В.А. Шевченко научного общества «Биосфера и человечество» им. Н.В. Тимофеева-Ресовского (2007 г.), премии им. акад. В.В. Фролькиса для молодых ученых Украинского общества геронтологов и гериатров (2009 г.), международной премии «Содружество дебютов» (2010 г.). Отмечен грамотой Отделения биологических наук РАН за радиационно-генетические исследования (2007 г.), медалями РАН для молодых ученых (2010 г.) и «За содействие развитию науки» Международной ассоциации академий наук (2010 г.).



кации ксенобиотиков. Эффекторные гены действуют аддитивно и их сверхэкспрессия может увеличивать продолжительность жизни организма.

В экспериментальных исследованиях группы молекулярной радиобиологии и геронтологии получены результаты, проливающие свет на генетические механизмы изменения продолжительности жизни в результате облучения. Умеренное стресс-воздействие, в том числе радиационное, нередко приводит к увеличению продолжительности жизни модельных животных (эффект тренировки защитных систем или гормезиса). Воздействие большими дозами ионизирующей радиации, напротив, приводит к ускоренному индуцированному старению. Возможность долголетия связана со способностью клеток адекватно реагировать на стресс. Выявление роли конкретных генов во взаимосвязи стрессоустойчивости и старения у модельных животных способствует пониманию механизмов естественного старения, а также ведет к разработке внешне-средовых и фармакологических методов достижения здорового долголетия у человека, открытию новых способов лечения возрастзависимых заболеваний, созданию радиопротекторных средств.

Наши эксперименты продемонстрировали возможность увеличения продолжительности жизни дрозофил после хронического облучения в малых дозах у линии дикого типа и еще более выраженное продление жизни у определенных мутантных линий. По-

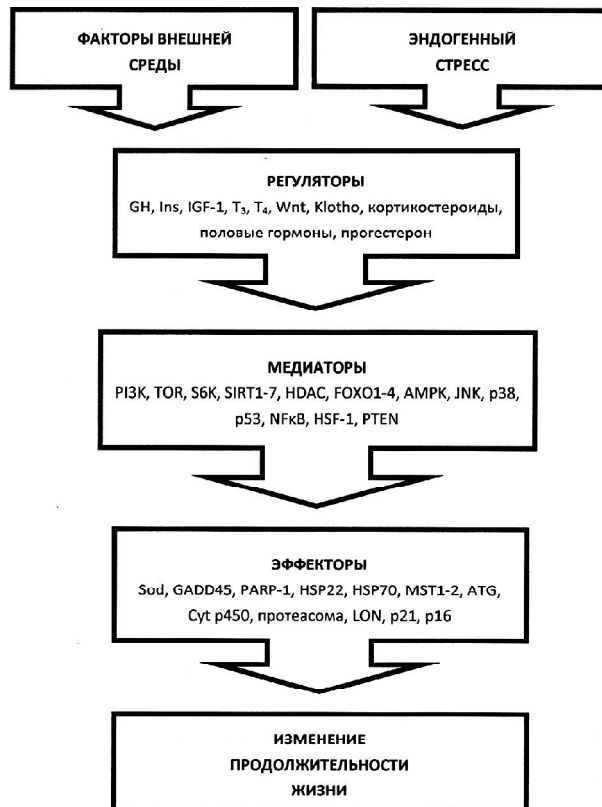


Рис. 1. Функциональная классификация генов, регулирующих продолжительность жизни организма. Пояснения в тексте.

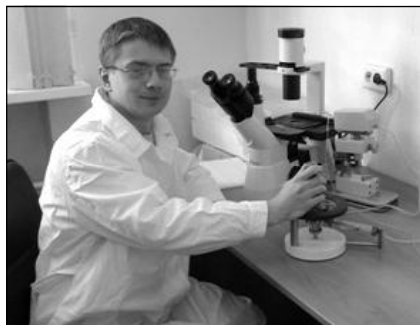
лученные данные позволили обосновать несколько новых механизмов радиационного гормезиса. Как оказалось, важную роль при действии малых доз радиации играет элиминация (по механизму апоптоза) клеток со слабой антиоксидантной и репаративной способностью на ранних стадиях развития, т.е. тех клеток, которые будут впоследствии быстрее стареть [5-7]. Это подтверждается более выраженным радиационным гормезисом для показателя медианной продолжительности жизни у мутантов по генам регуляторов апоптоза по сравнению с линией дикого типа *Canton-S* (рис. 2).

Впоследствии было установлено [27], что подвергающийся радиационно-индуцированному апоптозу клетка выделяют цитокины, способствующие компенсаторной пролиферации неповрежденных клеток и регенерации окружающей ткани. Таким образом, механизмом радиационного гормезиса на уровне организма может являться элиминация клеток с их последующим замещением устойчивыми клетками по механизму компенсаторной пролиферации.

Мы выяснили также, что гормезис по продолжительности жизни может быть следствием радиационно-индуцированного увеличения уровня генетической гетерогенности, которая способствует прекращению негативного влияния инбредной депрессии на изогенные лабораторные популяции [8]. Данный вывод был сделан на основании анализа изменения продолжительности жизни в результате хро-

нического облучения в течение более десяти поколений у инбредной линии дрозофилы *Oregon-R*, который выявил увеличение медианной продолжительности жизни по сравнению с необлученным контролем начиная со второго поколения облучения (рис. 3). Это свидетельствует о стимулирующем влиянии на продолжительность жизни радиационно-индуцированного увеличения уровня генетической гетерогенности по сравнению с необлученной изогенной популяцией.

При воздействии различных внешних стрессов практически все живые организмы от бактерий до растений и



**Шапошников Михаил Вячеславович** (1973 г.р.) в отделе радиозоологии работает с 1999 г. после окончания Сыктывкарского государственного университета и обучения в аспирантуре Коми НЦ УрО РАН. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию в Московском государственном университете. Результаты научных исследований М.В. Шапошникова опубликованы в 112 работах, в том числе две монографии (Екатеринбург, Санкт-Петербург) и 22 статьи в российских рецензируемых («Радиационная биология. Радиозоология», «Успехи геронтологии», «Генетика») и международных («Biogerontology», «Rejuvenation Research») журналах.

**Шосталь Ольга Андреевна** (1984 г.р.) после окончания (2007 г.) Сыктывкарского госуниверситета и обучения (2008-2010 гг.) в аспирантуре защитила (2010 г.) кандидатскую диссертацию «Влияние условий освещения на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster*» по специальности «экология». Имеет 24 публикации, в том числе в рецензируемых журналах («Успехи геронтологии», 2006; «Экологическая генетика», 2008, 2010; «Экология», 2009. Лауреат премии правительства Республики Коми 2010 г. в области научных исследований для аспирантов и докторантов, стипендии им. П.П. Вавилова для аспирантов Института биологии (2010 г.); обладатель гранта Фонда содействия отечественной науке «Лучшие аспиранты РАН 2010».





млекопитающих способны быстро реагировать и адаптироваться для перенесения неблагоприятного периода. Явление повышения устойчивости клетки или организма к повреждающему действию фактора после предварительного воздействия в малой дозе получило название адаптивного ответа. Данный феномен индуцируется многими типами повреждающих воздействий, включая алкилирующие агенты, тепловой и окислительный стресс, ионизирующие излучения, тяжелые металлы. Роль белков теплового шока в радиационно-индуцированном адаптивном ответе вызывает особый интерес, поскольку подразумевает общность молекулярно-клеточных систем стресс-ответа для разных видов стресса и существование перекрестной адаптации к различным экологическим факторам. В то же время остается неясным вопрос о роли белков теплового шока в формировании устойчивости к воздействию ионизирующей радиации в малых дозах и на уровне целого организма.

В связи с этим нами исследована роль различных белков теплового шока при радиационно-индуцированной адаптации дрозофил к последующему воздействию индуктора свободных радикалов параквата [17, 20]. Изучена индукция адаптивного ответа (изменение продолжительности жизни) у дрозофил линии дикого типа *Canton-S*, с мутациями фактора теплового шока *Hsf* (аллели 1-4) и белков теплового шока (*Hsp70Ba*<sup>304</sup>, *Hsp83*<sup>e6A</sup>, *Hsp22*<sup>EY09909</sup>). В качестве адаптирующего воздействия использовано хроническое низкоинтенсивное  $\gamma$ -излучение (0.017 и 0.17 сГр/ч) на предимагинальных стадиях развития (накопленная доза – 6 и 60 сГр), разрешающей дозой послужило добавление параквата (20 мМ в течение суток) в корм имаго. Показано, что хроническое облучение приводит к адаптивному ответу во всех вариантах эксперимента,

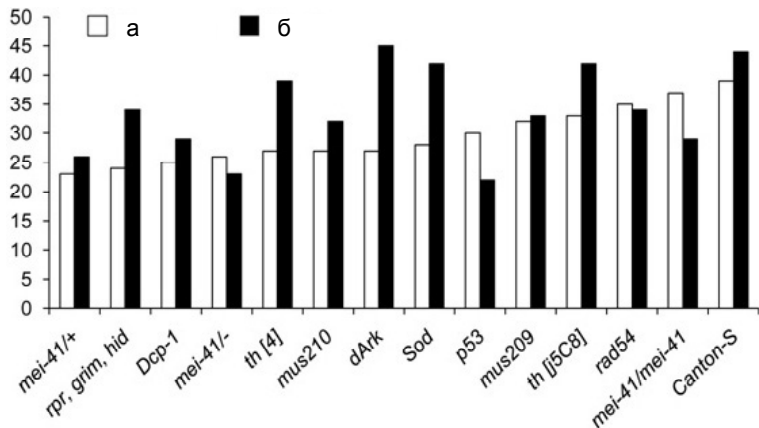


Рис. 2. Продолжительность жизни линий дрозофилы с deregуляцией апоптоза (мутация генов *grim*, *hid*, *reaper*, *Dcp-1*, *dArk*, *th*), мутациями генов репарации (*rad54*, *mus210*, *mus209*, *mei-9*, *mei-41*) и антиоксидантной защиты (*Sod*) в контроле (а) и при хроническом облучении 60 сГр (б) [6]. Здесь и далее: по вертикали – медианная продолжительность жизни, сутки.

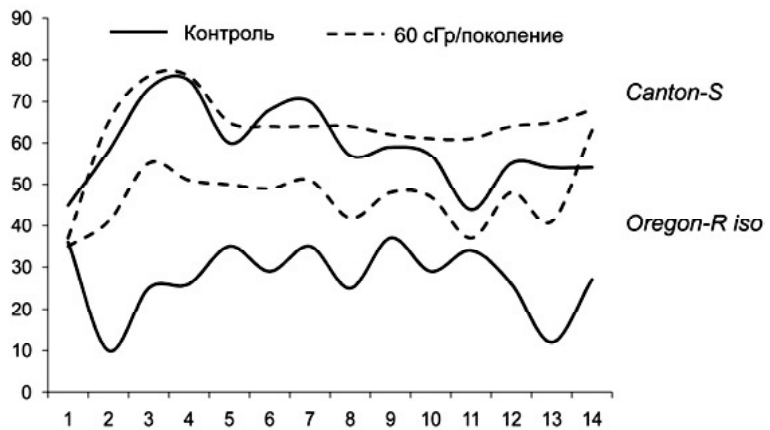


Рис. 3. Медианная продолжительность жизни гетеро- (*Canton-S*) и изогенной (*Oregon-R iso*) линий дикого типа дрозофилы в течение 14 поколений хронического облучения и в контроле [11].

за исключением гомозигот по мутациям *Hsf*<sup>#</sup> и *Hsp70Ba*<sup>304</sup> (рис. 4). У гомозигот по мутации гена *Hsp22* адаптивный ответ сохраняется у самцов, в то время как у самок отсутствует. Таким образом, у дрозофилы гомозиготы по мутациям *Hsp* и *Hsf* в большинстве случаев не проявляют адаптивного ответа, что говорит о непосредственном участии данных генов в его формировании.

Для выяснения роли механизмов стрессоустойчивости и ответа на повреждение ДНК в радиационно-индуцированных реакциях на уровне целого организма мы также провели сравнение чувствительности линий *Drosophila melanogaster* дикого типа (*Canton-S* и *Oregon-R*), и линий с мутациями генов, участвующих в репарации ДНК (*mei-41*, *mei-9*, *mus209*, *mus210*, *mus309* и *rad54*), контроле клеточного

**Плюснина Екатерина Николаевна** (1986 г.р.) – аспирантка третьего года обучения, старший лаборант-исследователь. В 2008 г. окончила Сыктывкарский государственный университет по специальности «экология». Имеет четыре публикации в российских рецензируемых («Радиационная биология. Радиоэкология» и «Успехи геронтологии») и международном («Biogerontology») журналах. В 2010 г. удостоена медали им. В.И. Корогодина за лучшую научную работу в области радиобиологии и в составе коллектива авторов – премии правительства Республики Коми.



**Романова Елена Витальевна** (1984 г.р.) – аспирантка третьего года обучения, старший лаборант-исследователь. С отличием окончила Сыктывкарский государственный университет (2007 г.). Имеет три публикации в российских рецензируемых («Радиационная биология. Радиоэкология» и «Экологическая генетика») и международном («Biogerontology») журналах. В 2010 г. удостоена премии им. П.П. Вавилова Института биологии и в составе коллектива авторов – премии правительства Республики Коми.





цикла (*mei-41*) и обезвреживающий свободных радикалов (*sod*) к действию  $\gamma$ -излучения в большой (30 Гр) и малых (6, 20, 40, 60 сГр) дозах на предимагинальных стадиях развития [24]. В качестве показателей радиочувствительности оценивали длительность личиночной стадии развития, смертность куколок и массу тела имаго. Было показано, что облучение в большой дозе приводит к увеличению времени развития и уровня гибели куколок у всех исследованных линий. Облучение в малой дозе приводит к гормезису и адаптивному ответу по продолжительности личиночной стадии развития у линий *Oregon-R*, *mus210*, *sod*, *rad54* и *mei-41*. Адаптивный ответ отсутствует у линий, гиперчувствительных к облучению в малых дозах, таких как *mus210*, *sod*, *rad54* и *mei-41*. Облучение в дозах 6 и 60 сГр приводит к

эффекту гормезиса по массе у имаго линии дикого типа *Canton-S*. Полученные данные свидетельствуют о том, что реакция на облучение целого организма определяется молекулярными механизмами ответа клеток на облучение. В основе радиационно-индуцированной гиперчувствительности, адаптивного ответа и гормезиса, по-видимому, лежат общие механизмы, связанные с репарацией ДНК, контролем клеточного цикла и обезвреживанием свободных радикалов.

На организменном уровне баланс между процессами роста и размножения, с одной стороны, и стрессоустойчивостью и долгожительством – с другой обеспечивает транскрипционный фактор FOXO [9]. Нами была выдвинута гипотеза о ключевой роли FOXO-зависимого механизма активации генов стресс-ответа в радиационном гормезисе и адаптивном ответе на

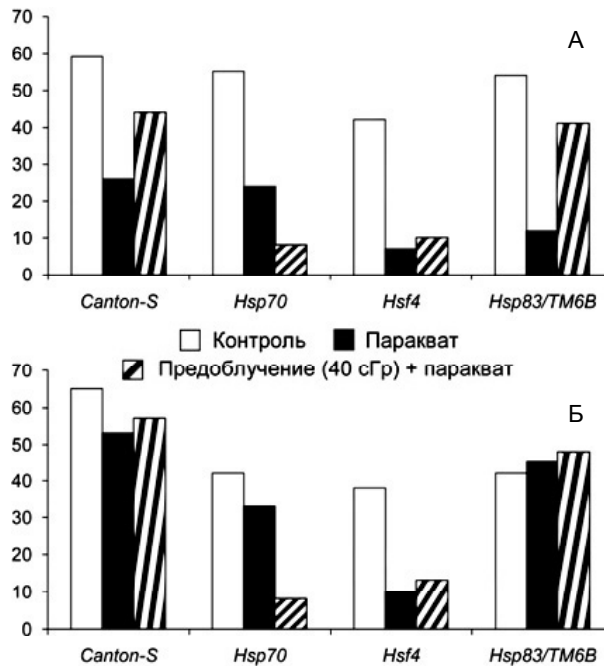


Рис. 4. Адаптивный ответ самцов (А) и самок (Б) дрозофилы линий дикого типа (*Canton-S*) и с мутациями генов белков (*Hsp70* и *Hsp83/TM6B*) и фактора теплового шока (*Hsf4*).

уровне организма [10]. Для ее проверки мы изучили влияние облучения на длительность личиночной стадии развития и продолжительность жизни дрозофил с различной активностью гена FOXO [22], а также линий, мутантных по генам стресс-активируемой ацетилазы SIRT1 и митоген-активируемой протеинкиназы JNK, контролирующей активность FOXO [14]. Показано, что у гомозигот по гипоморфным аллелям гена FOXO отсутствует гормезис и адаптивный ответ, проявляющийся в увеличении длительности личиночной стадии развития и продолжительности жизни после хронического облучения в малых дозах, в отличие от линии дикого типа *Canton-S* и FOXO-гетерозигот (рис. 5). Эффект гормезиса был обнаружен у самцов *Sirt2*, однако отсутствовал у самок. Напротив, у самок *JNK+*, в отличие от самцов, произошла индукция адаптив-

ного ответа [14]. Таким образом, полученные нами результаты демонстрируют участие FOXO-зависимого механизма активации генов стресс-ответа в эффектах хронического облучения в малых дозах на уровне целого организма, таких как гиперрадиочувствительность, гормезис и адаптивный ответ. Показана роль генов *SIRT1* и *JNK* в формировании половых различий по радиобиологическим эффектам.

Установлено, что спленциты мышей, развивавшихся в условиях воздействия хронического низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения *in vivo*, имели меньший уровень повреждения ДНК, выявляемый непосредственно после острого облучения *in vitro* в больших дозах [2, 4]. Однако раннее индивидуальное развитие мышей в условиях хронического низкоинтенсивного облучения приводит к отсроченному повышению уровня повреждений ДНК лейкоцитов периферической крови, что свидетельствует об отдаленных негативных эффектах (генетической нестабильности) в ответ на облучение в малых дозах (рис. 6) [3]. Данный вывод подтверждается сокращением продолжительности жизни и уменьшением массы тела животных, облученных в малых дозах. Полученные данные свидетельствуют о гиперчувствительности мышей к малым дозам ионизирующей радиации в период раннего индивидуального развития, проявляющейся как на уровне клеточных реакций (повышение уровня повреждений ДНК, снижение чувствительности к апоптозу), так и в ответе целого организма (сокращение продолжительности жизни и снижение массы тела).

**Велегжанинов Илья Олегович** (1984 г.р.) с отличием окончил (2007 г.) Сыктывкарский государственный университет и после обучения в аспирантуре представил диссертационную работу. Имеет 18 публикаций, в том числе три статьи в рецензируемых



журналах «Радиационная биология. Радиоэкология» и «Успехи геронтологии». Лауреат премии правительства Республики Коми 2010 в области научных исследований для аспирантов и докторантов, стипендии им. П.П. Вавилова для аспирантов Института биологии Коми НЦ УрО РАН (2009 г.).

**Мезенцева Вера Николаевна** (1988 г.р.) закончила бакалавриат Сыктывкарского госуниверситета (2010 г.) и поступила в магистратуру по специальности «Общая биология». Соавтор семи научных публикаций, в том числе статьи в журнале «Радиационная биология. Радиоэкология».



Раскрыты эколого-генетические механизмы влияния длительности освещения на продолжительность жизни [12, 13, 18]. Выявлено существование двух эколого-генетических механизмов влияния длины светового дня на продолжительность жизни дрозофилы. С одной стороны, увеличение длины светового дня способствует более активной выработке свободных радикалов, которые оказывают повреждающее действие на структуры клетки, что снижает продолжительность жизни дрозофилы. С другой стороны, снижение длины светового дня, не приводя к повреждающим эффектам, стимулирует FOXO-зависимый стресс-ответ и увеличивает продолжительность жизни.

Взаимосвязь между репродукцией и продолжительностью жизни можно рассматривать с нескольких позиций: 1) с точки зрения эволюционных теорий старения, предсказывающих антагонизм этих двух составляющих приспособленности вида, 2) молекулярно-физиологических взаимодействий герминальных и соматических тканей на уровне индивидуального организма и 3) конкурентных взаимоотношений между полами. Эволюционные теории старения предполагают существование генетического (теория антагонистической плейотропии) [30] или метаболического (теория отработанной сомы) [26] компромиссов между выживаемостью и плодовитостью. В связи с этим мы провели исследование роли виргинности и стерильности в формировании различий по продолжительности жизни у самок и самцов *Drosophila melanogaster* [21, 23]. В эксперименте использовали гибридов от скрещиваний мух дикого типа линий *Canton-S* (M) и *Harwich* (P). Реципрокные скрещивания самцов и самок данных линий позволяют получить гибридов с одинаковым генотипом, но различающихся по стерильности. Показано уменьшение продолжительности жизни у стерильных самок и увеличение у стерильных самцов (рис. 7). Полученные данные свидетельствуют о противоположном влиянии сигналов от мужских и женских гонад на продолжительность жизни. В то время как у плодовитых мух наблюдали большую продолжительность жизни самок, у стерильных особей самки жили примерно одинаковое время с самцами. Выравнивание показателей продолжительности жизни у стерильных самок и самцов свидетельствует о том, что механизм, определяющий различия в продолжительности жизни полов, связан с репродуктивной системой. Возможно, что семенники индуцируют ме-

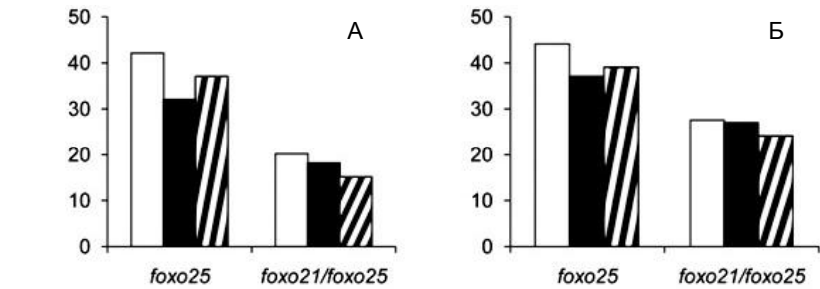


Рис. 5. Адаптивный ответ самцов (А) и самок (Б) из гетеро- (*foxo25*) и гомозиготной (*foxo25/foxo21*) по мутации в гене *FOXO* линии *Drosophila melanogaster* [14]. Различия достоверны (\*) при  $p < 0.01$  (критерий Гехана-Бреслоу-Вилкоксона). Условные обозначения: □ – контроль; ■ – 30 Гр; ▨ – 60 сГр + 30 Гр.

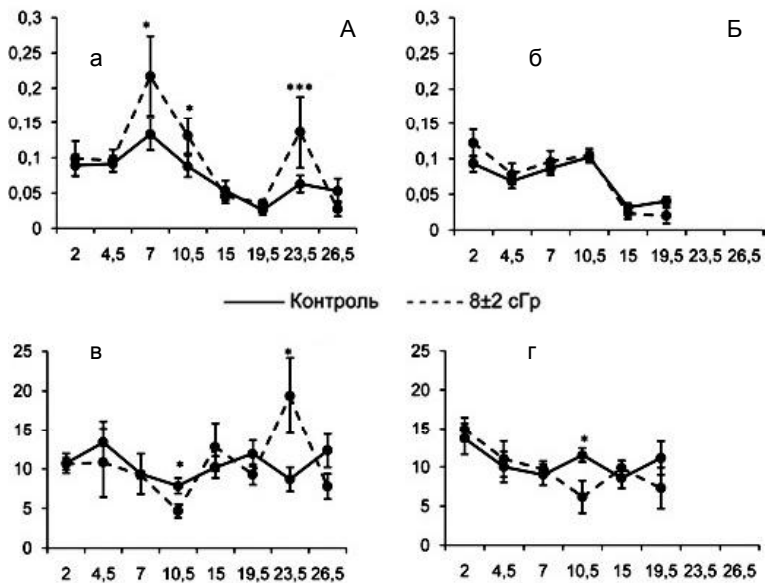


Рис. 6. Уровень повреждения ДНК (а, б) и частота апоптоза (в, г) спленцитов самцов (А) и самок (Б) мышей линии СВА. Различия достоверны (\*) при  $p < 0.05$  (U-критерий Манна-Уитни).

ханизм, сокращающий продолжительность жизни самцов, а яичники являются источником сигнала, увеличивающего продолжительность жизни самок.

Кроме того, мы предприняли попытку выяснить дифференциальный вклад поведенческой составляющей и затрат на производство половых про-

дуктов у самок и самцов [23]. Для этого провели анализ продолжительности жизни у стерильных и плодовитых особей, которые или оставались виргинными, или скрещивались в течение жизни. Анализ возраста гибели 90 % выборки показывает, что в то время как стерильные скрещивающиеся самки живут на 7 % меньше, чем пло-



**Данилов Антон Александрович** (1988 г.р.) закончил бакалавриат Сыктывкарского госуниверситета (2010 г.) и поступил в магистратуру по специальности «Общая биология».



**Чернышова Дарья Олеговна** (1988 г.р.) – студентка I курса магистратуры кафедры биологии химико-биологического факультета Сыктывкарского госуниверситета.

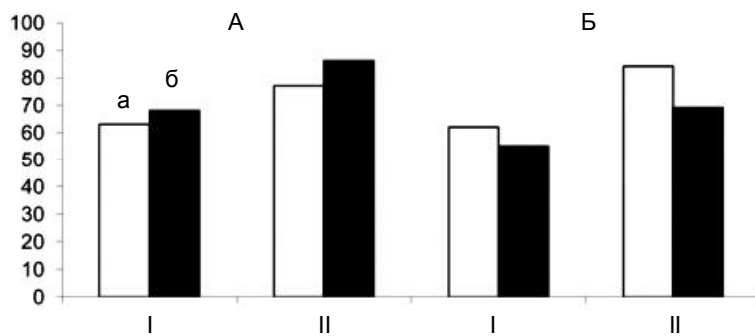


Рис. 7. Возраст (сут.) смертности 90 % выборки самцов (А) и самок (Б) стерильных (а) и плодовитых (б) виргинных (I) и скрещивающихся (II) мух.

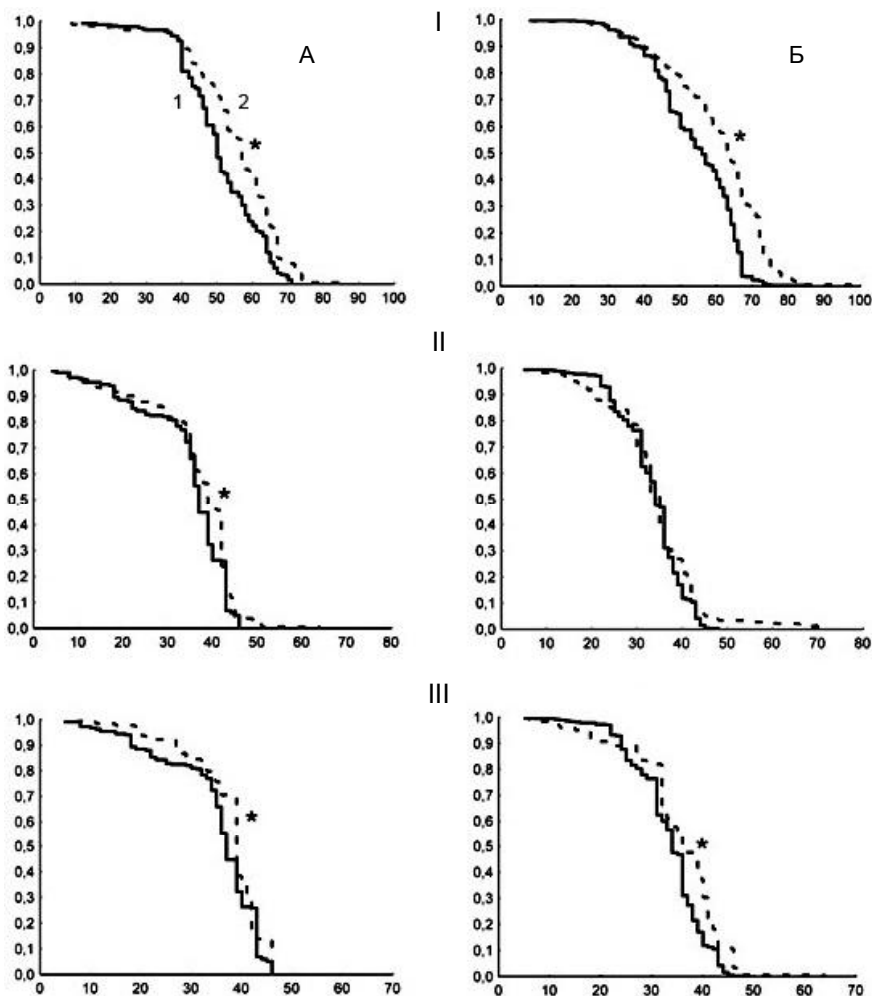


Рис. 8. Продолжительность жизни самцов (А) и самок (Б) лабораторной линии *Canton-S* в контроле (1) и после обработки (2) LY-294002 (I), 0.5  $\mu$ M вортманнином (II) 0.5  $\mu$ M рапамицином (III). Различия достоверны (\*) при  $p < 0.001$ ,  $p < 0.05$  и  $p < 0.001$  соответственно (тест Колмогорова-Смирнова). Здесь и далее: по оси абсцисс – возраст, сут.; по оси ординат – функция дожития.

витые скрещивающиеся, стерильные виргинные самки живут на 13 % дольше плодовитых скрещивающихся. Таким образом, отсутствие негативного вклада поведенческой составляющей у самок значительно перевешивает недостаток стимулирующего влияния гонад. На этом фоне у самок практически не виден негативный вклад затрат на производство половых продуктов. Это позволяет сделать вывод о преобладании вклада в продолжительность жизни поведенческой со-

ставляющей размножения над затратами на яйцепродукцию. В противоположность самкам продолжительность жизни стерильных скрещивающихся самцов по сравнению с плодовитыми скрещивающимися самцами увеличивается (рис. 7). У стерильных виргинных самцов наблюдается дальнейшее существенное увеличение продолжительности жизни по сравнению со стерильными и плодовитыми скрещивающимися самцами. В отличие от самок, сигналы от гонад и затраты на

производство половых продуктов у самцов имеют однонаправленное, негативное влияние на продолжительность жизни. Тогда как стерильные скрещивающиеся самцы живут на 13 % (по возрасту гибели 90 % выборки) дольше плодовитых, виргинные стерильные живут дольше на 53 %. Очевидно, что у них, как и у самок, затраты на выработку половых продуктов гораздо меньше поведенческой составляющей размножения.

Увеличение продолжительности жизни человека является одной из важнейших задач геронтологии и, в целом, современной профилактической медицины. В последнее время большое внимание уделяется поиску и изучению химических соединений и препаратов, обладающих свойствами, замедляющими старение [1]. С другой стороны, в последние несколько лет достигнуты значительные успехи в осмыслении генетических механизмов старения и долголетия, благодаря чему мы наметили ферменты-мишени для фармакологической коррекции старения и возрастзависимых заболеваний. Известно, что мутации, приводящие к нарушению функции генов, кодирующих ферменты фосфоинозитол-3-киназного (PI3K) каскада и TOR сигналинга, приводят к увеличению продолжительности жизни у различных по уровню организации модельных животных, таких как нематоды и мыши. Однако генетические методы коррекции продолжительности жизни не применимы к человеку. В то же время цитологам известны специфические ингибиторы PI3K, такие как LY-294002 и вортманнин, а также ингибитор TOR – рапамицин. Нами проведено исследование влияния специфических ингибиторов PI3K и TOR на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster* и показано увеличение максимальной продолжительности жизни [15, 16] (рис. 8).

У человека наследственные синдромы преждевременного старения (синдром Вернера и др.) обусловлены мутациями в генах репарации ДНК. Однако прямым подтверждением геропротекторных свойств белков репарации ДНК может служить лишь увеличение продолжительности жизни организма при сверхэкспрессии их генов. Белки консервативного в эволюции семейства GADD45 играют ключевую роль в стресс-ответе и репарации ДНК у животных и человека. У дрозофилы обнаружен ортолог *GADD45*. Мы показали [19], что сверхэкспрессия *GADD45* ведет к более эффективному устранению повреждений ДНК и вызывает увеличение продолжитель-

ности жизни без снижения ее качества (плодовитости и нервно-мышечной активности). *D-GADD45* сверхактивировали в нервной системе дрозофилы, поскольку нейрогуморальная регуляция гомеостаза детерминирует продолжительность жизни и процессы старения клеток и организма. Сверхэкспрессия *D-GADD45* (в 10 раз у самцов и в три раза у самок) вызвала увеличение медианной ПЖ самцов ( $p < 0.001$ ) и самок ( $p < 0.001$ ) по сравнению с особями родительских линий *UAS-D-GADD45* и *GAL4-1407* (рис. 8).

Кроме того, у мух с конститутивной сверхэкспрессией *D-GADD45* наблюдали увеличение возраста 90%-ной смертности на 5-59 % ( $p < 0.001$ ), а также многократное увеличение минимальной продолжительности жизни. Увеличение продолжительности жизни организмов в связи с мутациями определенных генов зачастую сопровождается снижением репродукции и ухудшением двигательной активности. У самок с конститутивной и кондиционной сверхэкспрессией *D-GADD45* в нервной системе на протяжении всей жизни плодовитость, оцененная по количеству яиц на самку, не ухудшалась либо повышалась в 1.7-2.6 раза ( $p < 0.001$ ). Аналогично изменялось количество куколок. У самцов и самок с конститутивной и кондиционной сверхэкспрессией *D-GADD45* имело место сохранение физической активности по сравнению с особями без сверхэкспрессии ( $p < 0.001$ ). Белки *GADD45* необходимы для поддержания стабильности генома в ответ на повреждение ДНК и участвуют в обеспечении эксцизионной репарации нуклеотидов. Обнаружено снижение одноцепочечных разрывов ДНК методом «ДНК-комет» в нейробластах личинок на 21-27 % ( $p < 0.001$ ) при конститутивной и кондиционной сверхэкспрессии *D-GADD45*. С другой стороны, известна роль белков *GADD45* в регуляции апоптоза. Вследствие повышенной чувствительности к индукции апоптоза могла произойти селекция наиболее устойчивых к повреждению ДНК нейробластов. Однако частота апоптоза в нейробластах личинок со сверхэкспрессией *D-GADD45* не отличалась от уровня апоптоза у контрольных генотипов.

Таким образом, сверхэкспрессия гена *D-GADD45* в нервной системе увеличивает медианную и максимальную продолжительность жизни особей дрозофилы без снижения качества жизни, что связано с более эффективным обнаружением и устранением спонтанных повреждений ДНК.

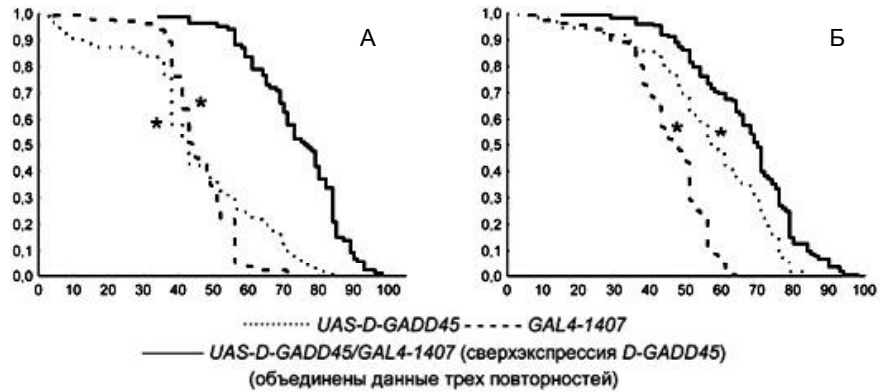


Рис. 9. Влияние сверхэкспрессии гена *GADD45* в нервной системе дрозофил на продолжительность жизни самцов (А) и самок (Б). Различия достоверны (\*) при  $p < 0.001$  (тест Колмогорова-Смирнова).

Работы группы молекулярной радиобиологии и геронтологии предваряют смену устоявшейся на данном этапе развития радиобиологии «молекулярно-клеточной» парадигмы на «интегративную» парадигму – систему представлений о том, как интегрируются молекулярно-клеточные механизмы, индуцируемые малыми дозами ионизирующих излучений, в ответную реакцию всего организма (патологию, старение, приспособленность) в зависимости от генетического фона и радиочувствительности индивидуума. Очевидно, что гены, контролирующие устойчивость организма к различным формам стресса, кодируют белки, регуляция которых (фармакологическими средствами) позволит существенно продлить жизнь. Результаты выполненных нами исследований являются фундаментальной основой для разработки новых геропротекторных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов В.Н. Средства профилактики преждевременного старения (геропротекторы) // Усп. геронтол., 2000. Вып. 4. С. 275-277.
2. Вележанинов И.О., Мезенцева В.Н., Москалев А.А. Сравнение адаптивного ответа спленоцитов мышей линии СВА и нейробластов личинок *Drosophila melanogaster*, развивавшихся в условиях воздействия хронического низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения // Радиационная биология. Радиоэкология, 2009. Т. 49, № 6. С. 665-670.
3. Вележанинов И.О., Москалев А.А. Возрастная динамика уровня повреждения ДНК, апоптоза и клеточного старения у мышей, облученных малыми дозами ионизирующей радиации на ранних стадиях развития // Усп. геронтол., 2008. Т. 21, № 3. С. 480-484.
4. Вележанинов И.О., Москалев А.А., Осипов А.И. Феномен уменьшения уровня однонитевых разрывов ДНК клеток системы крови в первом поколении хронически облучаемых мышей // Радиационная биология. Радиоэкология, 2007. Т. 47, № 5. С. 582-585.

5. (Москалев А.А.) Moskalev A.A. Investigation of the relationship of radio-induced apoptosis of *Drosophila larva* nervous system and the ageing of imago nervous system // Protection of the environment from the effects of ionizing radiation: Proc. Intern. Conf. Stockholm (Sweden), 2003. P. 80-86.
6. Москалев А.А. Радиационно-индуцированное изменение продолжительности жизни *Drosophila melanogaster*. Сыктывкар, 2004. 104 с.
7. (Москалев А.А.) Moskalev A.A. Radiation-induced life span alteration of *Drosophila* lines with genotype differences // Biogerontology, 2007. Vol. 8, № 5. P. 499-504.
8. (Москалев А.А.) Moskalev 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.
9. Москалев А.А. Старение и гены. СПб.: Наука, 2008. 358 с.
10. Москалев А.А. Генетические исследования влияния ионизирующей радиации в малых дозах на продолжительность жизни // Радиационная биология. Радиоэкология, 2008. Т. 48, № 2. С. 139-145.
11. 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.
12. Москалев А.А., Кременцова А.В., Малышева О.А. Влияние мелатонина на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster* при различных режимах освещения // Экологическая генетика, 2008. Т. 6, № 3. С. 22-30.
13. Москалев А.А., Малышева О.А. Роль светового режима в регуляции продолжительности жизни *Drosophila melanogaster* // Экология, 2009. № 3. С. 221-226.
14. (Москалев А.А., Плюснина Е.Н., Шапошников М.В.) 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.

15. *Москалев А.А., Шапошников М.В.* Продление жизни *Drosophila melanogaster* путем специфического ингибирования PI3K // Усп. геронтол., 2008. Т. 21, № 4. С. 602-606.
16. (*Москалев А.А., Шапошников М.В.*) *Moskalev A.A., Shaposhnikov M.V.* Pharmacological inhibition of phosphoinositide 3- and TOR-kinase improves survival of *Drosophila melanogaster* // Rejuvenation Res., 2010. Vol. 13, № 2-3. P. 246-247.
17. (*Москалев А.А., Шапошников М.В., Турышева Е.В.*) *Moskalev A.A., Shaposhnikov M.V., Turysheva E.V.* Life span alteration after irradiation in *Drosophila melanogaster* strains with mutations of Hsf and Hsps // Biogerontol., 2009. Vol. 10, № 1. P. 3-11.
18. *Москалев А.А., Шосталь О.А., Зайнуллин В.Г.* Генетические аспекты влияния различных режимов освещения на продолжительность жизни дрозофилы // Усп. геронтол., 2006. Вып. 18. С. 55-58.
19. (*Плюснина Е.Н., Шапошников М.В., Москалев А.А.*) *Plyusnina E.N., Shaposhnikov M.V., Moskalev A.A.* Increase of *Drosophila melanogaster* life-span due to D-GADD45 overexpression in the nervous system // Biogerontol., 2011. Vol. 12, № 3. P. 211-226.
20. *Турышева Е.В., Шапошников М.В., Москалев А.А.* Адаптивный ответ по продолжительности жизни у линий *Drosophila melanogaster* с мутациями генов фактора теплового шока и белков теплового шока // Радиц. биол. Радиоэкол., 2008. Т. 48, № 5. С. 580-587.
21. *Шапошников М.В., Москалев А.А.* Влияние дисгенной стерильности на половой диморфизм по продолжительности жизни у *Drosophila melanogaster* // Усп. геронтол., 2007. Т. 20, № 1. С. 40-46.
22. *Шапошников М.В., Москалев А.А.* Роль транскрипционного фактора FOXO в радиоадаптивном ответе при хроническом облучении и гормезисе // Радиц. биол. Радиоэкол., 2010. Т. 50, № 3. С. 312-317.
23. *Шапошников М.В., Москалев А.А., Турышева Е.В.* Влияние индуцированной стерильности и виргинности на продолжительность жизни самцов и самок *Drosophila melanogaster* // Экол. генетика, 2007. Т. 5, № 3. С. 13-18.
24. *Шапошников М.В., Турышева Е.В., Москалев А.А.* Радиационно-ин-
- дуцированный гормезис, гиперчувствительность и адаптивный ответ у *Drosophila melanogaster* радиочувствительных линий // Радиц. биол. Радиоэкол., 2009. Т. 49, № 1. С. 46-54.
25. (*Fabrizio P.*) Regulation of longevity and stress resistance by Sch9 in yeast / *P. Fabrizio, F. Pozza, S.D. Fletcher et al.* // Sci., 2001. Vol. 292. P. 288-290.
26. *Kirkwood T.B.* Evolution of ageing // Nature, 1977. Vol. 270. P. 301-304.
27. (*Kondo S.*) DRONC coordinates cell death and compensatory proliferation / *S. Kondo, N. Senoo-Matsuda, Y. Hiromi et al.* // Mol. Cell. Biol., 2006. Vol. 26 (19). P. 7258-7268.
28. (*Perez V.I.*) Is the oxidative stress theory of aging dead? / *V.I. Perez, A. Bokov, H. Van Remmen et al.* // Biochim. Biophys. Acta, 2009. Vol. 1790, № 10. P. 1005-1014.
29. *Saunders L.R., Verdin E.* Cell biology. Stress response and aging // Sci., 2009. Vol. 323, № 5917. P. 1021-1022.
30. *Williams G.C.* Pleiotropy, natural selection and the evolution of senescence // Evolution, 1957. Vol. 11. P. 398-411. ❖



## КОНФЕРЕНЦИИ



### МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ARCTIC AS A MESSENGER FOR GLOBAL PROCESSES – CLIMATE CHANGE AND POLLUTION»

к.б.н. А. Дымов, к.г.н. М. Тентюков

Конференция «Арктика как вестник глобальных процессов – изменение климата и загрязнение» организованная АМАР<sup>1</sup>, Орхусским и Копенгагенским университетами (при поддержке Северного совета министров, Министерств окружающей среды Дании и Швеции, Министерств иностранных дел Норвегии, Министерства энергетики и климата Дании, Канадской ассоциации по делам американских индейцев и северных территорий) проходила с 3 по 6 мая 2011 г. в Копенгагене. Конференция была хорошо организована. Материалы, подготовленные для участников конференции, помимо тезисов включали видеofilm об основных направлениях исследований в Арктике, отдельный выпуск с докладами экспертов по проблемам арктических территорий. Кроме этого, участникам конференции был предоставлен бесплатный выход в Интернет и возможность доступа к электронным материалам организаторов конференции. Сама конференция работала в хорошо оборудованном бизнес-центре, который размещался в четырехзвездочном отеле Redisson Blu Falconer. Следует заметить, что вначале организаторами конференции планировалось пригласить 150 человек, но уже через четыре недели количество заявок превысило 500, что уже само по себе свидетельствовало как об авторитете АМАР, так и о большом интересе научного сообщества к проблемам

Арктики. Всего в конференции приняли участие около 350 человек из 20 стран мира.

Перед конференцией 3 мая был проведен семинар молодых ученых, организованный APECS (Association of Polar Early Career Scientists), проходивший в Копенгагенском университете. Всего в семинаре приняли участие 35 молодых ученых (из 11 стран) и восемь лекторов. В ходе семинара были представлены презентации руководителей экспертных групп по различным направлениям работы АМАР, обсуждены проблемы, складывающиеся в различных областях исследования Арктики (климат, загрязнение, здоровье населения, водные экосистемы). Вечером состоялось знакомство участников конференции в ходе встречи «Icebreaker», проводимой в одном из дворцов Копенгагена совместно с регистрацией на основную часть конференции. С приветственными словами выступил Лауритис Холм-Ниелсен – глава Орхусского университета. Были показаны фильмы, касающиеся катастрофических изменений в Арктике, представлен концерт инуитов в красочных национальных одеждах. Быстро налаживанию взаимопонимания между участниками способствовал и небольшой фуршет, устроенный организаторами.

Открытие конференции состоялось 4 мая в бизнес-центре Redisson Blu Falconer с приветственных

<sup>1</sup> Программа Арктического совета по мониторингу и оценке (АМАР) – это рабочая группа под эгидой Арктического совета, которая занимается мониторингом и оценкой влияния загрязнения на Арктику окружающей среды и климатических изменений. В Арктический совет входят следующие страны: Дания, Исландия, Канада, Норвегия, Россия, США, Финляндия и Швеция.

слов Рассела Чаерса (председатель АМАР) и Томаса Бьернхольма (проректор Копенгагенского университета). Во всех вступительных речах звучала необходимость изучения Арктических регионов, бережного отношения к природе и нахождения баланса между использованием природных богатств, сосредоточенных в северных регионах, интересами коренного населения, проживающего в Арктике, и охраной окружающей среды. В ходе презентации Джима Вайта (Университет Колорадо) представлены модели изменения климата до 2050 и 2100 гг., рассмотрен баланс энергетических потоков. В докладе Боба Корела (из Центра климатических и энергетических решений) представлены сценарии потепления воздуха на 5-8 °С (до 2050 г.) и более 11 °С (до 2100 г.). Рост температуры воздуха будет способствовать поднятию уровня океана, при котором могут исчезнуть ряд городов и даже значительные части государств (таких как Бангладеш), расположенных на побережьях. Джимом Оверлендом показано, что на природные геологические процессы накладывается потепление, связанное с антропогенным воздействием. Согласно климатическому прогнозу данного автора, потепление, наблюдаемое в последнее десятилетие, приведет к возрастанию температуры поверхности Земли на 3 °С. В докладе Синтии Де Вит (Стокгольмский университет) выявлены новые поллютанты (преимущественно устойчивые органические соединения – POPs) в различных средах Арктики. На основании двух оценок, проводимых в 1998 и 2004 гг., были составлены регламентирующие документы, показаны новые загрязняющие вещества (преимущественно галоген-органические соединения), опубликован отдельный выпуск журнала «Science of the total environment», в котором рассмотрены особенности их пространственного распределения, содержание в воздухе, снеге и различных отложениях, а также их биологическая аккумуляция и трансграничный перенос.

В докладе Пала Вейхе, работающего в области здравоохранения Фарерских островов (Дания), показаны особенности распространения загрязнителей в пищевых цепях морских животных, а также коренного населения. Основная часть загрязняющих веществ является приносной. Эпидемиологические мониторинговые исследования показали, что наблюдается повышение концентраций загрязняющих веществ (особое внимание уделялось ртути) в крови, волосах жителей Фарерских островов и Гренландии. При этом загрязнение негативно влияет на внимание, память, языковые особенности и т.д.

Далее в секции презентаций SWIPA были определены особенности изменения ледовой обстановки в полярном океаническом бассейне – преимущественно наблюдалось уменьшение мощности льдов в последнее десятилетие. Уменьшение территории, занятой льдами в летние месяцы, открывает значительные территории, что позволяет водам прогреваться сильнее. Одной из проблем остается высвобождение сажи в ходе таяния льдов, так называемого Black Carbon (BC), образующегося в результате сжигания различных видов топлива. BC изменяет альбедо поверхности и приводит к изменению прогреваемости поверхностей льдов и мерзлотных почв. Так, Маргарита Джохансон показала, что поверхность, занятая снегом в Гренландии, уменьшилась на 18 % с 1966 по 2008 г. В другом докладе (Дан Мур, университет British Columbia, Vancouver)

исследовалась роль горных ледников в Арктике. Отмечается, что они оказывают существенное влияние на климат. Около 50 % горных ледников сосредоточено в Арктике. Только на территории Гренландии они занимают площадь более 400 000 км<sup>2</sup> и если они растают, то уровень мирового океана поднимется на 41 см. Терри Калаган с соавторами в своем докладе отметил, что преобразования в высоких широтах происходят взаимосвязано. При этом необходимо учитывать наличие динамического равновесия между криосферой, атмосферой, океаном и биосферой. Вместе с тем, их взаимодействие носит опосредованный характер, что делает крайне сложным их комплексное изучение. В докладе Андреаса Штольна (Норвежский институт воздушных исследований) рассмотрено влияние трансграничного переноса частиц сажи с воздушными потоками, в том числе и из бореальной зоны в Арктику. Показана существенная роль пожаров в лесных экосистемах на изменение и поглощение солнечной энергии в Арктических регионах, а также длительность существования отдельных загрязнителей в природе. Питер Оутридж в своем докладе обратил внимание на увеличение содержания ртути в тканях морских животных, проживающих в Арктике (белуга, тюлень, белый медведь). При этом автор разделил Арктику на сектора, и оказалось, что увеличение наблюдается в значительной степени в Канадско-Гренландском секторе, тогда как на территории европейской части Евразии в последнее десятилетие наблюдается некоторое уменьшение выбросов ртути. Рассмотрены особенности циклов ртути в биогеоценозах, включая различные соединения металла. Отмечена высокая активность их миграции в пищевых цепях, что увеличивает риск заболеваний коренного населения, питающегося рыбой и другими морепродуктами. Исследования динамики выпадения кислых осадков (Ричард Баллерду, Норвегия) показали их определенное влияние на особенности протекания биогеохимических циклов в арктических экосистемах.

В целом следует заметить, что содержание пленарных докладов отражает общую тенденцию зарубежных исследований, связанную с глобальным потеплением климата. Российскими исследователями данная точка зрения принимается весьма неоднозначно и с определенной долей скепсиса. Однако никакой полемики на конференции не было.



Участники конференции из Института биологии Коми НЦ УрО РАН (М.П. Тентюков, А.М. Тентюкова, А.А. Дымов).



В ходе конференции состоялось выступление не только ученых, но было и несколько докладов политиков, что вообще отличает европейский формат проведения конференции от российского. Подтверждением этому может служить следующий факт. Работа секций, как правило, открывалась выступлениями европейских министров (Лукке Фриис – министр энергетики и климата Дании; Карен Эллеманн – министр окружающей среды Дании; Андреас Карлген – министр окружающей среды Швеции). В их речах высказывалась общая мысль – о необходимости объединения усилий по исследованию Арктических экосистем. Сказано, что только вместе возможно оценить и предотвратить катастрофические изменения в Арктике.

Далее работа конференции проходила в параллельных секциях: экология, криосфера, загрязнение. Все доклады посетить не удалось. Большинство из них имели обобщающий характер и были посвящены оценке деятельности слоя, наблюдениям за парниковыми газами (углекислый газ, метан), современным трендам загрязнения устойчивыми органическими загрязнителями (POPs) совместно с различными сценариями изменения климата в Арктике. В завершение дня прошло обсуждение постерных докладов. Нами были представлены постерные доклады: «Дымов А.А., Каверин Д.А. Загрязнение тяжелыми металлами почв города Воркута». В докладе показано существенное загрязнение почв и грунтов на территории города, обусловленное выбросами угольных шахт и переносом пылевых частиц с терриконов. М.П. Тентюков представил три доклада «Иней как объект геохимического мониторинга при изучении загрязнения поверхности снега сульфатами», «Изучение аэротехногенного загрязнения при стоке сухих аэрозолей в тундровые экосистемы в районах нефтедобычи» и «Послойное изучение динамики изменчивости геохимических характеристик снега».

На следующий день состоялись пленарные доклады, из которых хотелось бы отметить доклад Пера Странда. В нем были представлены результаты российско-норвежских исследований радиоактивного загрязнения в Баренцевом море. Показана радиационная обстановка в местах затонувших атомных подводных лодок. Дана оценка возможного влияния на морские экосистемы работы российских плавучих ядерных электростанций. Рассмотрены различные варианты переноса радиоактивных веществ морскими течениями.

После пленарных докладов работа продолжалась в трех параллельных секциях: криосфера, загрязнение POPs, экология. В первой секции доклады были посвящены изменению мерзлотных почв, результатам длительного мониторинга и возможной реакции компонентов окружающей среды на потепление. В докладе А. Васильева (Сибирское отделение РАН) показано, что потепление в Сибири сопровождается увеличением количества осадков, особенно в летнее время. При этом по результатам 30-летних наблюдений каких-либо катастрофических изменений мерзлотных грунтов не наблюдается. В докладе Ханны Кристиарсен обобщены данные по термическому состоянию мерзлоты на основании 575 наблюдательных скважин и площадок длительного наблюдения CALM.

Доклады второй секции посвящены особенностям распространения POPs в арктических экосистемах,

накоплению в организмах животных, переносу воздушными и водными потоками, содержанию загрязнителей в морских водах, льдах, увеличению концентраций и влиянию потепления и антропогенной деятельности.

В секции «экология» доклады были посвящены изменению факторов обитания морских птиц, изменению бентоса, газообмену между морскими водами и атмосферой. Значительное число докладов было посвящено изучению животных, в частности, белых медведей, изучению поступления загрязнителей по пищевым цепям, их поведения, а также аккумуляции пищевых загрязняющих веществ в организмах животных при изменяющемся климате и усилении антропогенной деятельности в арктических регионах.

В отдельной секции были рассмотрены социально-экономические особенности жизнедеятельности коренного населения в условиях меняющегося климата, активной добычи природных ресурсов и особенностей изменения естественного промысла.

Учитывая, что дальнейшая работа продолжилась в трех секциях, мы постараемся остановиться на некоторых из них, производивших наибольшее впечатление. М.Д. Ананичева (Институт географии РАН) на основании анализа космоснимков и архивных данных показала существенное изменение в площади, занимаемой горными ледниками на северо-востоке России. За последние 30 лет она сократилась от 20 до 50 %. А. Клепиков представил доклад по изменению содержания пестицидов в крови жителей Ненецкого округа Архангельской области и Республики Коми. В докладе адмирала Нильса Ванга, директора колледжа королевской датской защиты, отмечены особенности изменения государственной безопасности Дании при изменяющемся климате. С потеплением возможны появления новых морских транзитных перевозок в арктических морях. Так, в 2010 г. из России в Китай за одну навигацию прошел нефтяной танкер.

В завершение конференции были сформулированы основные выводы по работе группы SWIPA. Показано, что в последние пять лет произошло наибольшее за весь период наблюдений повышение температуры. Согласно существующим прогнозам, в ближайшие 30-40 лет произойдет освобождение Северного ледовитого океана ото льда в теплый период года. К 2050 г. будет наблюдаться увеличение мощности снежного покрова в Сибири при сокращении общей продолжительности его существования. Изменения климата могут привести к трансформации арктической инфраструктуры, некоторые населенные пункты придется эвакуировать. Опасение вызывает возрастание содержания ртути в Арктике. Необходимо проводить мониторинг и сокращать выбросы данного элемента, основным источником которого является сжигание угля. Для более достоверных прогнозов необходимо проведение дополнительных исследований.

Было объявлено о проведении конференции в Монреале (Канада) 22-27 апреля 2012 г., которая будет посвящена Международному полярному году. Ее девиз – «От знаний – к действиям». В заключении конференции были высказаны слова благодарности организаторам мероприятия, а также объявлено о проведении Полярного десятилетия (IPD), начало которого запланировано на 2015 г. Дополнительную информацию о деятельности АМАР, а также ряд отчетов об оценке окружающей среды можно найти на сайте (<http://amap.no>).

## МОЙ ДРУГ АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ТАСКАЕВ – ВИДНЫЙ РАДИОЭКОЛОГ И ТАЛАНТЛИВЫЙ ОРГАНИЗАТОР БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мое первое знакомство с Анатолием Ивановичем Таскаевым произошло в начале 60-х годов прошлого века во время одной из первых радиобиологических конференций, состоявшихся в Институте биологии (тогда Коми филиала Академии наук СССР) в Сыктывкаре. Впоследствии столица Республики Коми становилась не раз местом встречи радиоэкологов. Уже в то время здесь, на земле Коми, сформировалась интересно работающая группа радиоэкологов, которую возглавлял Всеволод Иванович Маслов, горячий патриот своих родных мест. Работу этого коллектива специалистов курировали более маститые ученые, среди которых выделяю профессора Ирину Николаевну Верховскую, энтузиаста применения радионуклидных методов в биологии – радиоэколога по сути своей экспериментальной деятельности. Она очень нежно заботилась о молодом поколении радиоэкологов из Сыктывкара. Среди других ученых-мастодонтов отмечу чл.-корр. АН СССР Александра Михайловича Кузина – видного советского радиобиолога, лидера в этой области знания в нашей стране, академика ВАСХНИЛ, впоследствии президента ВАСХНИЛ Петра Петровича Вавилова, профессионально интересовавшегося радиозоологией (одно время он возглавлял президиум Коми филиала АН СССР), и академика ВАСХНИЛ Всеволода Маврикевича Клечковского, основоположника сельскохозяйственной радиозоологии, по существу руководителя радиозоологических исследований в СССР, много времени уделявшего развитию этой отрасли естествознания в разных уголках нашей великой страны.

Уже в те годы, в момент моего первого визита в столицу Коми, в группе радиоэкологов выделялся молодой и энергичный сотрудник Анатолий Таскаев. И вот с той поры с ним нас связывали почти полувековая дружба и творческие контакты.

Анатолий (разрешите дальше так иногда называть его в моем очерке) считал меня своим учителем (к еще одному он относил чл.-корр. АН СССР Д.А. Кривоуцкого, известного зоолога-радиоэколога, ученика академика М.С. Гилярова). Я всегда несколько смущаюсь причислять кого-то к своим ученикам, предпочитая, чтобы они говорили обо мне как о своем учителе, если они меня таковым рассматривают. Ведь нельзя же в самом деле высказываться о ком-то как о своем учителе только потому, что его имя стоит на титуле автореферата кандидатской диссертации (хотя по факту именно так и было в случае с Анатолием – я был научным руководителем его кандидатского труда).

Не будет преувеличением сказать, что Анатолий был феноменом в радиозоологии (как впрочем и в организации биологических исследований). Он создал



Анатолий Иванович Таскаев.

в Коми удивительно плодотворно работающий коллектив радиоэкологов (их впоследствии в нашей стране стали называть «северными радиоэкологами»), в течение более полувека отработавший богатую «научную руду» в уникальном на радиозоологической карте страны (да и мира в целом) регионе. Речь идет о территориях, обогащенных тяжелыми естественными радионуклидами (это повышенное содержание радионуклидов указанной группы связано как с природными причинами, так и с техногенным влиянием). В последнем случае имеются в виду районы добычи первого советского радия, зоны, обогащенные продуктами распада, а также радиоактивными отходами. Этому региону было суждено стать полигоном классических работ в области радиозоологии по изучению миграции тяжелых естественных радионуклидов по трофическим цепочкам и действия повышенного фона ионизирующих излучений на биоту в среде ее обитания.

Успеху в своих исследованиях в области радиозоологии А.И. Таскаев обязан, в частности, своему образованию, закончив физический факультет МГУ. В 50-60-е годы прошлого столетия радиозоология проходила свой ранний и, как выяснилось впоследствии, один из самых ярких этапов развития. Напомним, что термин «радиозоология» был введен в научный лексикон в 1956 г. Радиозоология рождалась на стыке наук, прежде всего биологического и физического профилей. Знания А.И. Таскаева в области физики оказались очень полезными в период организации радиозоологических натуральных исследований в Коми, где регион с повышенной радиоактивностью оказался очень сложным с точки зрения характеристики дозообразования у биоты. Это объяснялось присутствием широкого набора тяжелых естественных радионуклидов, комбинацией внешнего и внутреннего облучения животных и растений, динамичностью дозиметрических полей во времени и пространстве. Выполненные А.И. Таскаевым и его коллегами радиозоологические исследования в их ранний период существенно обогатили раздел экологической дозиметрии как области радиозоологии.

Широкие натурные исследования А.И. Таскаева не исключали проведение тонких экспериментальных опытов. К их числу в качестве примера я мог бы отнести эксперимент по оценке поступления радона в растения из почвы по корневому пути. Эта работа была опубликована в известном журнале «Health Physics», что было довольно престижно для радиоэкологов того времени (я испытываю чувство удовлетворения до сих пор, что оказался среди авторов этих работ, где, конечно, основную роль играл Анатолий Иванович). Публикаций по радону в радиозоологии и радиационной гигиене очень много, а цепочка почва–растение в отношении миграции Rn изучена очень слабо.

В последние полтора десятка лет XX в. и в первые годы нашего XXI в. основное внимание радиоэкологов СССР (после 1991 г. – России и ряда других стран СНГ) было сосредоточено на изучении последствий и их ликвидации одной из крупнейших техногенных катастроф в истории человечества – радиационной аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г., приведшей к радиоактивному загрязнению громадной территории с общей площадью 150 тыс. км<sup>2</sup> и охватившей не только территорию бывших республик СССР (в первую очередь Украины, Белоруссии и России), но и стран Европы. Перед радиоэкологами встала уникальная задача первостепенной теоретической и практической значимости – оценить последствия для живой природы и человека этого массивированного радиационного воздействия на окружающую среду и, по возможности, ослабить (а иногда и ликвидировать) последствия радиоактивного загрязнения. Среди многообразия радиозоологических задач А.И. Таскаев и его коллеги сосредоточились, в частности, на решении одной из наиболее трудных в методическом отношении – оценить последствия хронического облучения, источником которого были поступившие в окружающую среду радионуклиды, на природные популяции живых организмов. При этом «северные радиоэкологи» Коми с успехом использовали результаты своих более ранних многолетних исследований в областях с повышенной радиоактивностью в Коми республике. В методическом отношении исследования действия ионизирующих излучений на биоту потребовали проведения экспериментальных исследований в районах с наибольшей плотностью радиоактивных чернобыльских выпадений и, следовательно, специалисты подверглись здесь наибольшему облучению. Не случайно именно за эти работы в зоне аварии на ЧАЭС А.И. Таскаев был заслуженно награжден Орденом Мужества, высоких наград были удостоены и его коллеги из Института биологии Коми научного центра УрО РАН и других биологических учреждений академии наук.

Помимо этих работ, А.И. Таскаев и его коллеги собрали уникальный материал по миграции техногенных радионуклидов в различных природных экосистемах Чернобыльской зоны. Отметим, что радиозэкологические исследования А.И. Таскаева и его коллеги проводили в регионе Чернобыля с широким применением современных методов – цитогенетических, биохимических, биофизических. Труды биологов из Института биологии Коми научного центра УрО РАН – яркая страница в летописи исследований в зоне аварии на ЧАЭС, проведенных учреждениями АН СССР-РАН биологического профиля, куда помимо специалистов из Коми входили сотрудники Института морфологии и экологии животных им. А.Н. Северцова (ныне Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова), Института лесоведения. Общим научным руководителем биологического цикла работ в Чернобыле был академик В.Е. Соколов. Бок о бок с ними трудились радиозэкологи из Институтов национальных академий Украины и Беларуси.

В наше время эпистолярный жанр общения уходит (или уже ушел) в прошлое. Наш век глобальной информации и компьютеризации напрочь выбил из обоймы человеческих взаимоотношений эту удивительную форму контактов. Уровень эпистолярного творчества деградировал до форм «эсмэсок». А жаль! К счастью, нам с Анатолием достался отрезок человеческой истории, когда почтовая переписка была важной формой общения. Удивительные письма писал мне Анатолий! Они были профессионально обстоятельны, касались различных сторон развития радиозэкологии и участия в нем разных людей. К счастью, у Анатолия был красивый (по меньшей мере очень разборчивый) почерк. Анатолий очень обижался, когда я не отвечал (или отвечал, по его мнению, излишне кратко) на его удивительные послания.

К сожалению, груз наших директорских обязанностей (а у Анатолия еще и многолетняя работа заместителем председателя президиума Коми НЦ УрО РАН) – а на посту директора Института биологии Анатолий трудился более 20 лет (в этом мы сходны: я – директор Института также уже более 20 лет) ограничивали нашу переписку, но это только усиливало становившееся все более редкой радостью получение посланий (даже не писем) от Анатолия. Добавлю, что мы оба сетовали на нарастающее со временем увеличение административных обязанностей на нас как директоров НИИ (особенно академических). От директоров все больше требовалось обеспечение финансового благополучия руководимых нами учреждений (самым главным становилось принесение «в клюве» выгодных финансовых договоров, а не обеспечение научной состоятельности и актуальности исследовательских работ). Но мы оставались с ним едиными в главном – основная задача науки – получение добротных знаний.

Анатолий много лет уверенно держал «на плаву» и Институт, и «радиозэкологическую» компоненту этого учреждения, которая играла немаловажную роль в структуре всей экологической науки Коми.

Письменное творчество А.И. Таскаева отличали ясность мышления, строгость

изложения и обстоятельность анализа. Анатолий Иванович любил писать, был прекрасным редактором (его высоко ценили как рецензента и члена редколлегии в ведущем отечественном радиозэкологическом академическом журнале «Радиационная биология. Радиозэкология», его рецензии всегда отличались компетентностью и доброжелательностью). Он оставил большое научное наследие – сборники трудов по радиозэкологии, изданные по работам Института биологии, многочисленные препринты, статьи, труды конференций. Он воспитал большую плеяду учеников – кандидатов и докторов наук по радиобиологии и радиозэкологии, хотя сам остался кандидатом наук (как это иногда бывает, «де факто» он был, безусловно, доктором наук высокого калибра, а «де юре» – остался кандидатом). И это еще одна из особенностей Анатолия, ему так и не хватило времени защитить собственную диссертацию, хотя он имел громадное количество экспериментального материала и очень большое число научных публикаций.

А.И. Таскаев был главным редактором ежемесячного журнала «Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН». Это удивительно интересное издание, которым могут похвастаться не многие научные институты. Журнал представляет сплав самой свежей информации, полученной в стенах руководимого им Института, и хронику жизни коллектива Института и его отдельных сотрудников. Последняя всегда отличается доброжелательным и внимательным отношением к специалистам. Журнал вышел за пределы Института и снискал уважительное отношение у специалистов родственных учреждений.

Научная деятельность Анатолия Ивановича Таскаева как радиозэколога в основном пришлась на вторую половину XX в. – период интенсивного развития этой отрасли знания, время интенсивных ядерных испытаний и глобального радиоактивного загрязнения Земли, радиационных аварий (Кыштымской, Чернобыльской, на АЭС «Три Майл Айленд» в США, в Великобритании в Уиндскейле), начала развития ядерной энергетики с пришедшим осознанием, что только обеспечение ее экологической безопасности гарантирует прогресс этой отрасли. Это был период, когда в мировой науке радиозэкология нашей страны играла решающую роль в этой области знания, что было признано за рубежом. На этом фоне личность А.И. Таскаева как ученого-радиозэколога, несомненно, весьма значима.

Запомнились мои две последние встречи с Анатолием. Первая из них – в Сыктывкаре, на международной конференции, посвященной 50-летию радиобиологических исследований в Республике Коми осенью 2009 г. Среди обзорных докладов – выступление профессора Е.Б. Бурлаковой, председателя Научного совета РАН по радиобиологии, доклад профессора А.И. Газиева, президента Радиобиологического общества России. Было среди них и мое выступление. Но основное внимание привлек обзорный доклад А.И. Таскаева, в кото-

ром он описал эволюцию и историю полувековых исследований по радиобиологии и радиозэкологии в Коми и обобщил их итоги. Как всегда, солидно и обстоятельно дал анализ развития этой области знания. 40 лет из этого полувека – это и деятельность А.И. Таскаева. Доклад Анатолия (кто мог бы знать!) оказался его «лебединой песней». Как всегда, осматривая Институт. Поразили масштаб его реконструкции в экономически сложное время, оснащение новым оборудованием. Не все столичные академические институты могут этим похвастаться. И, конечно, побывали в Радиозэкологическом корпусе под Сыктывкаром – детище Анатолия Ивановича.

И, наконец, последняя моя встреча с Анатолием. Она произошла осенью 2010 г. на VI международном съезде по радиационным исследованиям в Москве – крупнейшем традиционном форуме радиобиологов в нашей стране. Съезд проходил в Институте биоорганической химии им. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН и ряде биологических и физико-химических институтов РАН. Кто мог бы подумать, что очень скоро Анатолия не станет. В тот момент передо мной был энергичный, полный планов и новых творческих замыслов человек. За столом, во время торжественного обеда (эта встреча стоит и сейчас перед моими глазами) отдельно сидела группа радиозэкологов. Это были Анатолий, его активная помощница и коллега доктор биологических наук А.Г. Кудяшева, украинские радиозэкологи – академик НАН Украины И.Н. Гудков и доктор биологических наук В.А. Кашпаров, чл.-корр. АН Республики Татарстан Р.Г. Ильязов. Подняли тост за развитие радиозэкологии, твердые в уверенности ее прогресса.

По итогам более чем полувековых исследований в Республике Коми можно говорить об успешном функционировании крупного радиозэкологического центра, внесшего значимый вклад в изучение поведения и миграции радионуклидов в окружающей среде и действия на биоту важнейшего экологического фактора – ионизирующих излучений. Эти научные знания лежат в основе существующих воззрений на значение ионизирующих излучений в современном мире и служат базовой информацией для развития ядерной энергетики и ядерных технологий, без которых немислимы дальнейший прогресс и развитие человеческого общества. И около 40 лет в проведении этих радиозэкологических исследований и руководстве ими важную роль играл Анатолий Иванович Таскаев – крупный радиозэколог и прекрасный организатор биологических и экологических исследований. Дальнейшее развитие радиозэкологических работ должно

стать лучшим памятником этому ученому. Анатолия сегодня с нами нет, но он всегда останется в нашей памяти.

**Р. Алексахин,**  
академик Россельхозакадемии,  
директор Всероссийского  
научно-исследовательского  
института сельскохозяйственной  
радиологии и агроэкологии  
Россельхозакадемии,  
вице-президент  
Международного союза  
радиозэкологии

