

**ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ОБОБЩЕНИЕ В ОБЛАСТИ
КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ РАДИОЭКОЛОГИИ**

Рец. на кн.: А. Н. Трапезников, И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева, В. Н. Трапезникова. «Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах». — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. — 880 с.

В двухтомной монографии представлены результаты многолетнего и всестороннего изучения поведения радионуклидов различного генезиса в пресноводных и наземных экосистемах, полученные в экспериментальных работах и в исследованиях на территориях, загрязненных техногенными радионуклидами в процессе штатной работы атомно-энергетических объектов и в аварийных ситуациях. В исследованиях были использованы концептуальные подходы, разработанные в трудах выдающегося естествоиспытателя Н. В. Тимофеева-Ресовского, под руководством которого авторы работали на начальных этапах формирования радиоэкологии как научной дисциплины.

Одной из важнейших составляющих радиоэкологии является радиоэкология пресноводных экосистем. В 1-й главе первого тома монографии рассмотрена роль и место радиоэкологии пресноводных экосистем среди других наук и обоснована особая актуальность радиоэкологических исследований водных экосистем Уральского региона, где производились подземные технологические ядерные взрывы, испытания ядерного оружия, сосредоточено производство и хранение ядерных боеприпасов, ведется переработка ядерного топлива, а также добыча и первичная переработка урана и тория. Кроме того, северная часть региона находится в зоне влияния Новоземельского полигона ядерных испытаний, средняя и южная часть — производственного объединения «Маяк», где происходили тяжелейшие радиационные катастрофы. Проведен глубокий анализ задач, которые призвана решать пресноводная радиоэкология, и среди наиболее важных авторами выделены следующие: определение барьерной роли пресноводных экосистем по отношению к миграции радиоактивных веществ; изучение транспортной функции водных экосистем в процессах переноса радионуклидов; определение экологических факторов, влияющих на аккумуляцию радионуклидов компонентами пресноводных экосистем; изучение изотопных отношений радионуклидов с целью идентификации источников радиоактивного загрязнения водных экосистем.

Во 2-й главе изложены методологические подходы к проведению радиоэкологических исследований, описаны методики отбора природного материала, проведения лабораторных опытов с гидробионтами и донными отло-

© Волкова Е. Н., Гудков И., Кузьменко М. И., 2009

жениями, методы определения содержания радионуклидов в компонентах пресноводных и наземных экосистем.

Одной из важнейших проблем, решаемых радиоэкологией пресноводных экосистем, является количественная оценка барьерной функции водных экосистем разного типа. Результаты исследований особенностей накопления, распределения и миграции радионуклидов в слабопроточном искусственном водохранилище (на примере Белоярского водохранилища) представлены в главе 3. Проанализирована многолетняя и сезонная динамика концентрации ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs в водных массах и рассчитан вынос радионуклидов из водохранилища. Очень ценными с практической точки зрения являются исследования распределения ^{60}Co и ^{137}Cs в экспериментальной системе вода — лед, результатом которых является вывод о том, что в случае поступления ^{60}Co и ^{137}Cs в водоемы следует использовать воду из растаявшего льда, а не подледную, обогащенную радионуклидами. На основании изучения особенностей накопления радионуклидов в донных отложениях разного типа авторами установлено, что накопление радионуклидов пресноводными грунтами в значительной степени зависит от наличия в них органических соединений. Максимальные значения коэффициента накопления зарегистрированы в богатых органическими веществами илистых сапропелях, минимальные — в песчаных грунтах, обедненных органическими соединениями.

Интересные результаты получены относительно влияния температурного фактора на накопление ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs высшими водными растениями, при этом, что особенно ценно, исследования проводили в природных условиях и в эксперименте. Авторы отмечают, что с повышением температуры на 16°C коэффициент накопления ^{60}Co макрофитами увеличивается в 2—4,7 раза, ^{137}Cs — на 18—20%, а аккумуляция растениями ^{90}Sr практически не зависит от температуры. В результате определения запасов ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде, донных отложениях и макрофитах доминирующих видов установлена специфика распределения радионуклидов в экосистеме водохранилища. Максимальные запасы исследуемых радионуклидов содержатся в грунтах водоема — от 92% для ^{90}Sr до 98% для ^{137}Cs . Далее в процентном соотношении следует вода: от 2% для ^{137}Cs до 8% для ^{90}Sr . Относительные запасы радионуклидов в макрофитах водохранилища чрезвычайно малы — от тысячной доли процента для ^{137}Cs до сотой доли процента — для ^{60}Co . Авторы приходят к выводу, согласно которому донные отложения водоема выполняют основную барьерную роль и препятствуют выносу радионуклидов за пределы водохранилища, а вода — главную транспортную функцию.

Результаты многолетних исследований особенностей формирования радиоэкологической ситуации в озерных экосистемах представлены в главе 4. На территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, образовавшегося в результате аварийного взрыва на производственном объединении «Маяк» в 1957 г., расположена группа озер с практически идентичными морфологическими показателями, но с различным химическим составом водных масс — от пресных до солоноватых. Анализируя радиоэкологическую ситуацию в этих озерах, авторы использовали уникальную возможность изучить влияние одного из важнейших факторов формирования радиоак-

тивного загрязнения водных экосистем — химического состава водных масс — на особенности поведения радионуклидов в водоемах. Следует подчеркнуть важность многочисленных данных, характеризующих динамику радионуклидного загрязнения компонентов озерных экосистем за 40-летний период, на основании которых построены математические модели, описывающие изменения концентрации радионуклидов в воде. При этом в 1967—1968 гг. авторы зарегистрировали влияние ветрового переноса ^{137}Cs из оз. Карачай, обусловившее повышение концентрации радионуклида в воде. Исходя из результатов моделирования, дан прогноз концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде, а также запасов в донных отложениях на 100-летний период, начиная с 1957 г.

Представлен обширный материал, отражающий специфику поведения радионуклидов в донных отложениях озерных экосистем. Показано, что стратиграфически донные отложения состоят из двух основных зон. В верхней происходят активные биогеохимические процессы, а нижняя представляет собой депо ранее накопленного материала, куда поступают вещества из верхней зоны, причем масштабы этой миграции достаточно велики. Исходя из того, что первичное распределение и последующее перераспределение радионуклидов в основных компонентах водоемов отражают процессы миграции материала биогенного и абиогенного происхождения и образования донных отложений, авторы убедительно доказывают возможность использования ^{90}Sr и ^{137}Cs в качестве трассеров процессов миграции вещества и формирования донных отложений в озерах. Ценными являются данные, характеризующие содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs у представителей биоты разных трофических уровней — водных растений и рыб. Авторами отмечена интересная закономерность — повышенное содержание суммы ионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ в воде исследованных озер приводит к уменьшению коэффициента накопления ^{137}Cs у рыб и практически не влияет на величину коэффициента накопления у макрофитов.

В 5-й главе на примере исследований рек Обь-Иртышской речной системы рассмотрены особенности и закономерности накопления, распределения и миграции техногенных радионуклидов в речных экосистемах. Изучена мобильность ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в речных экосистемах и установлено, что наибольшая миграционная способность характерна для ^{90}Sr . Авторы считают принципиально важным тот факт, что $^{239,240}\text{Pu}$ при миграции в речной экосистеме также более мобилен, чем ^{137}Cs . Ценным является обобщение многочисленных данных по изучению накопления радионуклидов не только в донных отложениях рек, но и в грунтах поймы. При этом авторы проанализировали поведение достаточно широкого спектра изотопов — ^{90}Sr , ^{99}Te , ^{137}Cs , ^{210}Po , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am . Было показано, что зависимость концентрации радионуклидов в верхнем 10-сантиметровом слое донных отложений от расстояния от источника загрязнения описывается степенной функцией. При этом прогнозируемые моделью оценки с высокой степенью вероятности совпадают с измеренными величинами. Вертикальное распределение радионуклидов в грунтовых и почвенных профилях описывается экспоненциальной зависимостью. Распространение нуклидов по ширине поймы также описывается экспоненциальным уравнением, уменьшаясь с увеличением расстояния от русла реки. Авторы убедительно доказывают, что опира-

ясь на информацию о датировке возраста донных отложений и используя ряд изотопных отношений $^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$, $^{241}\text{Am}/^{239,240}\text{Pu}$, $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, можно идентифицировать основные источники радиоактивного загрязнения речных экосистем. Расчеты по оценке запасов радионуклидов в основных компонентах исследуемых рек и оценка интегрального содержания радионуклидов в пойменной зоне позволили прийти к выводу о том, что пойма рек является основным депо радионуклидов и выполняет барьерную функцию по отношению к рассеянию в окружающей среде. В главе также приведены результаты исследований содержания хрома, свинца, железа, алюминия, марганца, никеля, цинка, меди, кадмия, ванадия, ртути и нефтепродуктов в донных отложениях рек Иртыш и Обь. Наблюдалось повышенное содержание никеля — 9,4 ПДК, цинка — 1,1 ПДК, меди — 27,7 ПДК. Установлено также высокое содержание железа, алюминия и ртути. Авторы акцентируют внимание на том, что во всех исследуемых пробах обнаружено наличие нефтепродуктов в разных концентрациях.

В заключительной части первого тома монографии отмечено, что динамика изменения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в 2004—2006 гг. указывает на устойчивый рост содержания данных радионуклидов в воде исследованных рек. Относительно значений, зарегистрированных в 2004 г., в 2006 г. величины объемной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs возросли в несколько десятков раз. Авторы подчеркивают необходимость создания постоянной системы радиоэкологического мониторинга Обь-Иртышской речной системы, находящейся под угрозой крупномасштабного загрязнения радиоактивными веществами.

Во втором томе монографии представлены результаты исследований наземных экосистем. В 6-й главе кратко изложена история становления и развития радиоэкологии наземных экосистем, обсуждаются предмет и задачи исследований. Авторы подчеркивают, что только после Чернобыльской катастрофы произошло фактическое рассекречивание радиационной ситуации на Урале, создавшейся в связи с авариями на производственном объединении «Маяк». Опыт специалистов-радиоэкологов, накопленный ранее, был востребован в процессе оценки последствий этой катастрофы и решения проблем, возникших в связи с аварией. Глобальный характер Чернобыльской катастрофы обусловил беспрецедентную открытость радиоэкологических исследований и масштабность международного сотрудничества. Комплексные исследования специалистов из разных стран внесли весомый вклад в фундаментальную радиоэкологию и позволили выйти на новый уровень оценки проблем радиационного воздействия на окружающую среду.

В условиях возрастающей антропогенной нагрузки на биосферу роль первого и основного депо, из которого техногенные загрязнители включаются в глобальные миграционные процессы, выполняет почвенно-растительный покров. Для радиоактивного загрязнения характерен ряд специфических свойств: присутствие радионуклидов в природных средах определяется их периодом полураспада, а поведение — ультранизкими весовыми концентрациями. Последнее определяет прочную сорбцию радионуклидов твердой фазой почвы и обеспечивает длительное их пребывание в верхнем корнеобитаемом слое. Результаты углубленных исследований влияния ком-

плекса физико-химических и экологических факторов на поведение радионуклидов в почвенно-растительном покрове модельных и природных экосистем представлены в 7-й главе монографии.

Важной проблемой радиоэкологии наземных экосистем остается изучение поведения радионуклидов глобальных выпадений в почвенно-растительном покрове природных биогеоценозов. Этому вопросу посвящена глава 8, где проанализированы результаты исследований особенностей миграции ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвенно-растительном покрове Северного, Среднего и Южного Урала и Якутии. Следует подчеркнуть важность того, что работы проводились как в период интенсивных глобальных выпадений, так и в период стабилизации глобальных выпадений. Авторы отмечают, что только на территории Якутии содержание радионуклидов в почвах соответствуют глобальному уровню, а в почвах Уральского региона зарегистрировано более высокое, по сравнению с глобальным, содержание ^{137}Cs .

В 9-й главе монографии рассматривается очень актуальный вопрос современной радиоэкологии — поведение радионуклидов в почвенно-растительном покрове зон воздействия предприятий на разных этапах ядерного топливного цикла. Кроме того, дана оценка современной радиоэкологической ситуации на территориях, подвергшихся массивному радиоактивному загрязнению вследствие несовершенства ядерных технологий в период становления атомной промышленности.

В загрязнение природных экосистем, помимо глобальных выпадений из атмосферы, штатных выбросов предприятий ЯТЦ, значительный вклад вносят ядерные аварии и инциденты. В 10-й главе монографии представлены результаты радиоэкологических обследований территорий, оказавшихся под воздействием Тоцкого ядерного взрыва в 1954 г., аварий на производственном объединении «Маяк» в 1957 и 1967 гг. и на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Авторы делятся опытом разработки методологических подходов к радиоэкологическому обследованию загрязненных территорий и их ранжированию по уровню загрязнения.

В 11-й главе результаты оценки уровней содержания радионуклидов в почвенно-растительном покрове дополнены определением физико-химических форм поллютантов, характеризующихся разной прочностью связи с почвой. Особый интерес для специалистов представляют результаты исследований изменений физико-химического состояния ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвенном покрове, обусловленных изменениями плотности выпадений радионуклидов. При этом авторы акцентируют внимание на особенностях физико-химического состояния радионуклидов в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа и аварийной зоны Чернобыльской АЭС.

В последней главе монографии представлен обширный материал, позволивший оценить накопительную способность древесных, травянистых и мхово-лишайниковых групп растений и определить роль растительного покрова в процессах миграции и перераспределения радионуклидов. Следует подчеркнуть важность вывода о том, что в условиях широкого диапазона плотностей радионуклидного загрязнения почвы наиболее информативным

показателем накопительной способности растений является коэффициент перехода.

В заключительной части монографии обоснована необходимость и значимость системных радиоэкологических исследований природных экосистем. Более чем полувековая история радиоэкологических исследований показала, что ионизирующее излучение антропогенной природы остается глобальным экологическим фактором, а методы радиоэкологии, основанные на количественной оценке воздействующих факторов и ответной реакции экосистем на эти воздействия, могут быть успешно использованы для изучения экологических последствий любых антропогенных загрязнений. Нельзя не согласиться с авторами — радиоэкология является междисциплинарной областью науки, методология и фактический материал которой представляют общеэкологический интерес. Именно радиоэкология сыграла существенную роль в решении проблем использования ядерного оружия, указав на губительность его применения для биосферы, и внесла вклад в разработку вопросов обеспечения радиационной безопасности окружающей среды и человека при применении ядерной энергии в мирных целях.

В целом, монография А. Н. Трапезникова, И. В. Молчановой, Е. Н. Караваевой и В. Н. Трапезниковой является уникальным обобщением многолетних радиоэкологических исследований, основу которых составляют классические положения факториальной радиоэкологии. Ценность рецензируемой работы состоит в том, что на основании анализа экспериментальных данных и многочисленных результатах изучения поведения техногенных радионуклидов разного происхождения в наземных и водных экосистемах авторами определены основные закономерности и взаимообусловленные процессы миграции радиоактивных веществ в окружающей среде. Монография, несомненно, является выдающимся вкладом не только в развитие континентальной радиоэкологии, но и экологии в целом.

Е. Н. Волкова
Д. И. Гудков
М. И. Кузьменко

Поступила 19.03.09