

Российская академия наук  
Уральское отделение  
Институт экологии растений и животных  
Уральская академия сельскохозяйственных наук  
Уральский научно-исследовательский ветеринарный институт

А.В. Трапезников

$^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$   
в пресноводных  
экосистемах

Екатеринбург  
2010

Российская академия наук  
Уральское отделение  
Институт экологии растений и животных  
Российская академия сельскохозяйственных наук  
Уральский научно-исследовательский ветеринарный институт

А.В.Трапезников

**$^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$   
в пресноводных экосистемах**

ЕКАТЕРИНБУРГ  
Издательство «АкадемНаука»  
2010

УДК 574.58; 577.346  
ББК 28.08

Ответственный редактор академик РАСХН,  
доктор биологических наук, профессор **И.М.Донник**

Рецензенты  
профессор, доктор биологических наук **Б.В.Тестов**,  
профессор, доктор физико-математических наук **П.В.Волобуев**

**А.В.Трапезников**

$^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$  в пресноводных экосистемах. – Екатеринбург:  
Изд-во «АкадемНаука», 2010. – 510 с.

ISBN 978-5-904196-10-3

Обобщен 35-летний опыт радиоэкологических исследований крупных пресноводных экосистем Урала и Западной Сибири, подверженных воздействию предприятий ядерного топливного цикла. Изучены закономерности миграции, накопления и распределения по основным компонентам пресноводных биогеоценозов техногенных радионуклидов –  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ . Показана специфичность поведения радионуклидов в озерных экосистемах (на примере водоемов, расположенных на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа), речных (реки Теча, Исеть, Тура, Иртыш и Обь, относящиеся к Обь-Иртышской речной системе, загрязненной радиоактивными веществами различного генезиса и, прежде всего, в результате деятельности ПО «Маяк» на Южном Урале), а также в искусственных водных экосистемах (на примере Белоярского водохранилища – водоема-охладителя Белоярской АЭС). Рассмотрены особенности барьерной роли различных пресноводных экосистем на пути рассеяния радионуклидов во внешней среде. В проведенных исследованиях широко использован метод математического моделирования. Показано, что радиоэкология пресноводных экосистем является самостоятельной научной дисциплиной; дана ее детальная структура и рассмотрены основные задачи.

Таблиц – 98, рисунков – 89, библиография – 494 названия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-516), интеграционного проекта с Сибирским отделением РАН № 09-С-4-1019 и гранта № 10-4-01-ЯЦ по линии ориентированных фундаментальных проектов Президиума Уральского отделения РАН

УДК 574.58; 577.346  
ББК 28.08

© А.В.Трапезников, 2010  
© Институт экологии растений и животных  
УрО РАН, 2010  
© Уральский научно-исследовательский  
ветеринарный институт, 2010

ISBN 978-5-904196-10-3

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| <b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....   | 3  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....  | 4  |
| <b>ГЛАВА I. РАДИОЭКОЛОГИЯ ПРЭСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ КАК НАУЧНАЯ ДИСЦИПЛИНА</b> .....  | 8  |
| 1.1. Теоретический фундамент радиоэкологии .....   | 8  |
| 1.2. Место радиоэкологии пресноводных экосистем в ряду других научных дисциплин .....  | 9  |
| 1.3. Барьерная роль пресноводных экосистем по отношению к миграции радиоактивных веществ .....   | 11 |
| <i>1.3.1. Распределение радионуклидов по основным компонентам пресноводных экосистем</i> .....   | 12 |
| 1.3.2. Радиационная емкость пресноводных экосистем .....   | 12 |
| 1.4. Превращение пресноводной экосистемы в источник радиоактивного загрязнения окружающей среды .....                                    | 14 |
| <i>1.4.1. Транспортная функция водных экосистем - вынос радионуклидов из проточных водохранилищ и перенос их речными экосистемами</i> .. | 14 |
| 1.4.2. Вторичное загрязнение речных систем радионуклидами через пойменные участки в период паводков .....                                | 18 |

|   |    |
|---|----|
| 1.4.3. Поступление радионуклидов из пресноводной экосистемы в пищевые цепочки представителей других экосистем ..... | 18 |
| 1.5. Экологические факторы, влияющие на аккумуляцию радионуклидов компонентами пресноводных экосистем .....         | 20 |
| 1.5.1. Макро- и микроконцентрации химических элементов в водной среде .....   | 20 |
| 1.5.2. Концентрация в водной среде изотопных и неизотопных носителей .....  | 21 |
| 1.5.3. Физико-химическое состояние радионуклидов в воде и рН водной среды .....                                     | 21 |
| 1.5.4. Температура водной среды .....   | 24 |
| 1.5.5. Световой фактор .....  | 26 |
| 1.5.6. Сезонная динамика накопления радионуклидов гидробионтами .....   | 28 |
| 1.5.7. Трофность водоема как экологический фактор .....   | 29 |
| 1.5.8. Накопление радионуклидов макрофитами в зависимости от экологической группы растений .....                    | 29 |
| 1.6. Биоиндикация радиоактивного загрязнения .....  | 30 |

|  |           |
|--|-----------|
| 1.7. Исследование изотопных отношений радионуклидов как метод идентификации источников радиоактивного загрязнения водных экосистем ..... | 31        |
| 1.8. Специфичность радиоэкологической ситуации в Уральском регионе .....   | 32        |
| <b>ГЛАВА II. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ.....</b>   | <b>37</b> |
| 2.1. Материал исследования пресноводных экосистем...   | 37        |
| 2.2. Методика исследований.....  | 43        |
| 2.2.1. Методика отбора природного материала в пресноводных экосистемах и предварительная подготовка его для анализов .....               | 43        |
| 2.2.2. Методика проведения лабораторных опытов с гидробионтами и донными отложениями.....  | 45        |
| 2.3. Методы определения содержания радионуклидов в компонентах пресноводных и наземных экосистем.  | 47        |
| 2.3.1. Методика гамма-спектрометрического анализа.....   | 47        |
| 2.3.2. Радиохимические методы.....   | 49        |
| 2.4. Методика нейтронно-активационного анализа.....  | 63        |

|   |    |
|---|----|
| 2.5. Статистическая обработка полученных результатов..... | 65 |
|---|----|

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ГЛАВА III. НАКОПЛЕНИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В СЛАБОПРОТОЧНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ (на примере Белоярского водохранилища).....</b> | <b>67</b> |
|--|-----------|

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Общая характеристика Белоярского водохранилища – водоема-охладителя Белоярской атомной станции..... | 67 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| 3.2. Содержание $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде Белоярского водохранилища..... | 74 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| 3.2.1. Динамика концентрации $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде в разные годы ..... | 75 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| 3.2.2. Динамика концентрации $^{60}\text{Co}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде по сезонам года ..... | 82 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| 3.2.3. Распределение $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в водной фазе по центральной части акватории водохранилища ..... | 84 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| 3.2.4. Вертикальное распределение $^{60}\text{Co}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде водохранилища ..... | 86 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| 3.2.5. Расчет выноса $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ за пределы водохранилища ..... | 89 |
|---|----|

|  |     |
|--|-----|
| 3.2.6. Распределение $^{60}\text{Co}$ и $^{137}\text{Cs}$ в экспериментальной системе вода-лед .....   | 90  |
| 3.3. Накопление и распределение $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в грунтах Белоярского водохранилища .....  | 92  |
| 3.3.1. Распределение $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в грунтах различных зон водоема-охладителя Белоярской АЭС .....                                     | 93  |
| 3.3.2. Накопление $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в грунтах пресноводного водохранилища .....  | 98  |
| 3.3.3. Влияние температуры водной среды на накопление $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ донными отложениями в природных и экспериментальных условиях ..... | 100 |
| 3.3.4. Сравнительная характеристика накопления $^{60}\text{Co}$ и стабильного изотопа $^{59}\text{Co}$ затопленной почвой пресноводного водохранилища ...                        | 104 |
| 3.4. Уровни содержания и накопление $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в гидробионтах Белоярского водохранилища .....                                       | 106 |
| 3.4.1. Накопление $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ макрофитами пресноводного водохранилища .....  | 108 |
| 3.4.2. Сезонная динамика накопления $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ пресноводными растениями .....   | 115 |



|  |     |
|--|-----|
| 3.4.3. Влияние температуры водной среды на накопление $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ пресноводными растениями .....       | 119 |
| 3.4.4. Содержание $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в водных растениях различных зон водоема-охладителя Белоярской АЭС ..... | 126 |
| 3.4.5. Исследование путей поступления кобальта в пресноводные растения .....   | 130 |
| 3.4.6. Накопление $^{60}\text{Co}$ и $^{137}\text{Cs}$ в иктофауне Белоярского водохранилища.....  | 133 |
| 3.4.7. Накопление стабильного изотопа $^{59}\text{Co}$ в рыбе..  | 141 |
| 3.4.8. Влияние температуры водной среды на накопление $^{60}\text{Co}$ и $^{137}\text{Cs}$ рыбой .....   | 143 |
| 3.5. Расчет запасов $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ , содержащихся в основных компонентах Белоярского водохранилища .....  | 144 |
| 3.5.1. Расчет запасов $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ , содержащихся в воде водохранилища .....                            | 146 |
| 3.5.2. Расчет запасов $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ , содержащихся в донных отложениях водохранилища .....               | 149 |
| 3.5.3. Расчет запасов $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ , содержащихся в макрофитах водохранилища .....                      | 156 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.5.4. Соотношение запасов $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ , содержащихся в основных компонентах водохранилища .....   | 159        |
| 3.6. Специфика накопления радионуклидов в водохранилищах.....  | 164        |
| <b>ГЛАВА IV. НАКОПЛЕНИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ (на примере озер, расположенных на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа).....</b> | <b>166</b> |
| 4.1. Общая характеристика озер Тыгиш, Большой Сунгуль и Червяное, расположенных на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа.....  | 166        |
| 4.2. Содержание $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде озер Тыгиш, Большой Сунгуль и Червяное .....   | 177        |
| 4.2.1. Содержание $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде озера Тыгиш..  | 177        |
| 4.2.2. Содержание $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде озера Большой Сунгуль .....  | 180        |
| 4.2.3. Содержание $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде озера Червяное .....   | 183        |
| 4.3. Уровни содержания и распределение $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в донных отложениях озер Тыгиш, Большой Сунгуль, Червяное и Щучье.....   | 187        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.3.1. Уровни содержания и распределение $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в донных отложениях озера Тыгиш .....                  | 187 |
| 4.3.2 Уровни содержания и распределение $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в донных отложениях озера Большой Сунгуль .....         | 197 |
| 4.3.3. Уровни содержания и распределение $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в донных отложениях озера Червяное...                  | 202 |
| 4.3.4. Уровни содержания и распределение $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ в донных отложениях озера Щучье .....                  | 207 |
| 4.4. Уровни содержания и накопление $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в гидробионтах озер Тыгиш, Большой Сунгуль и Червяное ..... | 209 |
| 4.4.1. Уровни содержания и накопление $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в макрофитах озер Тыгиш, Большой Сунгуль и Червяное ..... | 210 |
| 4.4.2. Уровни содержания и накопление $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в ихтиофауне озер Тыгиш и Большой Сунгуль .....           | 212 |
| 4.5. Расчет запасов $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в озерах Тыгиш, Большой Сунгуль и Червяное .....                            | 222 |
| 4.5.1. Расчет запасов $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в озере Тыгиш ...   | 223 |
| 4.5.2. Расчет запасов $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в озере Большой Сунгуль .....   | 237 |

|  |            |
|--|------------|
| 4.5.3. Расчет запасов $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в озере Червяное .....  | 241        |
| 4.6. Специфика накопления радионуклидов в озерных экосистемах .....  | 254        |
| <b>ГЛАВА V. НАКОПЛЕНИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ВКЛЮЧАЯ ИХ ПОЙМУ (на примере рек Обь-Иртышской речной системы) .....</b>                           | <b>256</b> |
| 5.1. Общая характеристика рек Течи и Исети, подверженных воздействию предприятия ядерного топливного цикла «Маяк» .....  | 256        |
| 5.2. Содержание $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{239,240}\text{Pu}$ в воде рек Теча и Исеть .....   | 267        |
| 5.2.1. Содержание $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{239,240}\text{Pu}$ в воде реки Течи .....  | 267        |
| 5.2.2. Содержание $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде реки Исеть ...   | 277        |
| 5.3. Накопление и распределение $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях рек Теча, Исеть и в их пойме..  | 282        |
| 5.3.1. Содержание и распределение $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{239,240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ и $^{99}\text{Tc}$ в донных отложениях реки Течи и в ее затопленной пойме ..... | 282        |

|  |     |
|--|-----|
| 5.3.2. Содержание и распределение $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях реки Исети и в ее затопленной пойме ..... | 299 |
| 5.4. Уровни содержания и накопление $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ в гидробионтах рек Течи и Исети .....                       | 316 |
| 5.4.1. Уровни содержания и накопление $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ в гидробионтах реки Течи.....                             | 316 |
| 5.4.2. Уровни содержания и накопление $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в водных растениях рек Исети, Миасса и Тобола .....                               | 321 |
| 5.5. Расчет запасов $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ в реках Тече и Исети и их пойме .....                                       | 324 |
| 5.5.1. Расчет запасов $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ в реке Тече и ее пойме .....  | 324 |
| 5.5.2. Расчет запасов $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и $^{239,240}\text{Pu}$ в реке Исети и ее пойме .....   | 327 |
| 5.6. Определение возраста донных отложений .....   | 334 |
| 5.7. Идентификация радиоактивного загрязнения рек Течи и Исети с помощью анализа изотопных отношений в донных отложениях пойменных водоемов .....            | 337 |
| 5.8. Накопление, распределение и миграция $^{137}\text{Cs}$ в реке Туре и в ее пойменных водоемах.....   | 341 |
| 5.8.1. Общая характеристика реки Туры.....   | 341 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.8.2. Вертикальное распределение $^{137}\text{Cs}$ в донных отложениях пойменных водоемов реки Туры...   | 346 |
| 5.8.3. Расчет запасов $^{137}\text{Cs}$ в пойме реки Туры в границах Тюменской области.....   | 347 |
| 5.8.4. Расчет годового поступления и выноса $^{137}\text{Cs}$ с водой реки Туры в границах Тюменской области .....  | 356 |
| 5.9. Накопление, распределение и миграция $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и тяжелых металлов в реках Иртыш, Обь и в их пойме .....                                 | 362 |
| 5.9.1. Общая характеристика рек Иртыш и Обь...  | 362 |
| 5.9.2. Оценка уровней содержания и запасов $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в воде рек Иртыш и Обь в границах Ханты-Мансийского автономного округа....              | 368 |
| 5.9.3. Оценка уровней содержания и запасов $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ в пойменных почвах рек Иртыш и Обь в границах Ханты-Мансийского автономного округа..... | 378 |
| 5.9.4. Оценка уровней содержания и накопление $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ ихтиофауной рек Иртыш и Обь.....   | 389 |
| 5.9.5. Сравнительный анализ радиоактивного загрязнения реки Енисей и рек Теча и Исеть, подверженных воздействию предприятий ядерного топливного цикла.....              | 391 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.9.6. <i>Содержание тяжелых металлов и органических токсикантов в воде рек Иртыш и Обь в границах Ханты-Мансийского автономного округа</i> .....              | 403 |
| 5.9.7. <i>Содержание тяжелых металлов и органических токсикантов в донных отложениях рек Иртыш и Обь в границах Ханты-Мансийского автономного округа</i> ..... | 421 |
| 5.10. Специфика накопления радионуклидов в речных экосистемах.....   | 423 |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....  | 425 |
| <b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....  | 432 |