

На правах рукописи

Левина Сима Гершивна

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ  $^{90}\text{Sr}$  И  $^{137}\text{Cs}$  В ОЗЕРНЫХ  
ЭКОСИСТЕМАХ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО  
РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА В ОТДАЛЕННЫЕ СРОКИ  
ПОСЛЕ АВАРИИ

03.00.01–03 – радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук

Москва – 2007

**Работа выполнена в ФГУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России и ГОУ ВПО «Челябинский государственный педагогический университет» Федерального агентства по образованию**

**Научный консультант:**

доктор медицинских наук, профессор,

Заслуженный деятель науки РФ

Аклеев Александр Васильевич

**Официальные оппоненты:**

доктор биологических наук

Мамихин Сергей Витальевич,

ведущий научный сотрудник кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

доктор биологических наук

Булгаков Николай Гурьевич,

ведущий научный сотрудник кафедры общей экологии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

доктор биологических наук, профессор

Гераськин Станислав Алексеевич,

зав. лабораторией экотоксикологии растений ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, Обнинск

**Ведущая организация:**

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

Защита состоится «28» «февраля» 2008 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д501.001.65 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, биологический факультет, ауд. \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Автореферат разослан «   » «                  » 2008 года

**Ученый секретарь**

**диссертационного совета**

кандидат биологических наук

Т.В. Веселова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Поступление искусственных радионуклидов в природные экосистемы происходит за счет глобальных выпадений при испытании ядерного оружия, в результате текущих и аварийных выбросов работающих предприятий. Формирование доз облучения после радиационных аварий и испытаний ядерного оружия в основном осуществлялось за счет краткосрочных выпадений короткоживущих радионуклидов (Effects of Ionizing ..., 1976). Существует также проблема хранения радиоактивных отходов, связанная с угрозой загрязнения окружающей среды долгоживущими радионуклидами, которые являются наиболее опасными. В настоящее время такими радионуклидами в России загрязнены несколько регионов (Уральский регион, территории, пострадавшие от аварии на Чернобыльской АЭС, Алтайский край, Оренбургская область и др.).

Ионизирующая радиация является постоянно действующим фактором внешней среды (Woodhead D.S., 1974; Myers D.K., 1989; Effects of ionizing ..., 1992), значимость которого возрастает, что требует изучения процессов взаимодействия живых организмов друг с другом и со средой их обитания в условиях радиоактивного загрязнения и повышенного радиационного фона. Для современной радиоэкологии данная проблема сохраняет свою актуальность (Тимофеев – Ресовский Н.В., 1957; Кузин А.М., Передельский А.А., 1956; Одум Е.П., 1958; Клечковский В.М. и др., 1973; Поликарпов Г.Г., 1981; Алексахин Р.М., 1982). Одной из важнейших проблем является радиоэкология пресноводных экосистем (Куликов Н.В. 1971; Куликов Н.В., Молчанова И.В., 1975; Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., 2006). Более того, основные положения современной системы радиационной безопасности предполагают необходимость учета взаимосвязи человека и окружающей среды для достижения устойчивого развития (International Commission ..., 2003; Pentreath R. J, 2006). Недостаточно изучены эффекты сочетанного воздействия радиации и химических поллютантов, которые также поступают в водные экосистемы (Поликарпов Г.Г., 2000).

Исследование взаимодействия живых организмов друг с другом и со средой их обитания приобретает особую актуальность в Уральском регионе, так как он испытывает на себе самые разнообразные по генезису радиационные воздействия. Северная часть региона находится в зоне влияния Новоземельского испытательного полигона, средняя – в зоне воздействия производственного объединения «Маяк» (ПО «Маяк»), где в 1949-1956 гг. было сброшено около 3 млн. Ки радионуклидов в р. Течу, в 1957 г. произошла Кыштымская авария, следствием которой было образование Восточно-Уральского радиоактивного следа, а в 1967 г. произошел радиационный инцидент на оз. Карачай, связанный с ветровой эрозией радиоактивных илов (Итоги изучения ..., 1990; Заключение комиссии ..., 1991; Никипелов Б.В. и др., 1990; Christensen G.C. et al., 1997; Уткин В.И и др., 2000). Кроме того, высокий уровень техногенной нагрузки в Уральском регионе обуславливает значительное содержание тяжелых металлов в природных экосистемах, превышающее ПДК в десятки и сотни раз. Микро- и макроэлементы обладают способностью влиять на накопление радионуклидов в отдельных компонентах данных систем (Радиоэкологическое исследование ..., 1992).

Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) площадью 23 тыс. км<sup>2</sup> с численностью населения около 300 тыс. человек образовался в пределах Челябинской, Свердловской и Тюменской областей в результате выброса в атмосферу  $7,4 \cdot 10^5$  ТБк (20 МКи) радиоактивности (Романов Г.Н. и др., 1990; Экологические и медицинские последствия..., 2001; Коготков А.Я., Осипов В.Г., 2002). Загрязнению подверглись различные экосистемы, в том числе и озера данных территорий.

В настоящее время основной вклад в радиоактивное загрязнение территории ВУРСа вносят долгоживущие <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs. Современный характер загрязнения ВУРСа и его отдельных экосистем обусловлен не только первичной поверхностной неравномерностью загрязнения территории, но и разнообразными физико-химическими и биологическими процессами, определяющими особенности распределения дозообразующих радионуклидов <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в различных объектах окружающей среды, в том числе в основных компонентах озерных экосистем. Существенное влияние на распределение <sup>90</sup>Sr и

$^{137}\text{Cs}$  в экосистеме могли оказать мероприятия защитного характера, которые проводились на различных этапах в поставарийный период.

По прошествии 50 лет после аварии и формирования ВУРСа встает объективная проблема возврата в хозяйственное использование ранее загрязненных территорий ВУРСа, включая озерные экосистемы (около 30 озер), что требует комплексного исследования и обоснования возможности их использования в различных целях с позиции радиационной безопасности. Более того, озера можно рассматривать как модельные системы радиоэкологического благополучия местности (территории), так как в силу присущих им особенностей они способны аккумулировать радионуклиды.

**Целью работы** являлось комплексное радиоэкологическое исследование закономерностей миграции, накопления и распределения  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , макро- и микроэлементов по основным компонентам озерных экосистем (почва водосборных территорий – вода – донные отложения – биота), расположенных на территории ВУРСа в пределах Челябинской области в отдаленном поставарийном периоде.

**Основные задачи исследования:**

1) оценить влияние гидрологических характеристик озерных экосистем (озера Урускль, Б. Игиш, М. Игиш, Травяное, Куяныш, Шаблиш, которые находятся от 20 до 80 км от источника взрыва, а также контрольные водоемы Б. Боляш и Мисяш, расположенные вне зоны действия ПО «Маяк») на особенности процессов накопления и миграции радионуклидов;

2) исследовать закономерности процессов аккумуляции, распределения и миграции, а также формы нахождения радионуклидов, стабильных макроаналогов и микроэлементов в воде, донных отложениях озерных экосистем и почвах их водосборных территорий;

3) выявить особенности накопления радионуклидов, стабильных макроаналогов и микроэлементов в высшей водной растительности и ихтиофауне;

4) дать математическое описание динамики изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде озер территории ВУРСа и сделать прогностические расчеты удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде и донных отложениях по 2017 г.;

5) оценить запасы  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в основных компонентах озерных экосистем для обоснования возможности возврата водоемов Следа в хозяйственную деятельность.

### **Научная новизна**

Впервые проведено комплексное изучение закономерностей миграции и перераспределения техногенных радионуклидов и микроэлементов в основных компонентах естественных озерных биоценозов ВУРСа. Получены новые данные о радиоэкологическом состоянии оз. М. Игиш.

В работе впервые исследованы состав и структура донных осадков озер Следа и контрольных водоемов, что позволяет реконструировать основные периоды развития озерных экосистем, восстановить этапы антропогенного (техногенного) воздействия, определить направленность происходящих в них изменений. Представлена общая сравнительная характеристика поведения радионуклидов и вскрыты конкретные физико-химические механизмы, регулирующие подвижность  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, донных отложениях и доступность их высшим водным растениям. Установлено, что подвижность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях озер и почвах их водосборных территорий зависит от содержания органического вещества и форм нахождения радионуклидов в данных компонентах озерных экосистем. Выявлено, что на поведение  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в грунтах влияет также минерализация водоема, а на миграцию радионуклидов в почве – особенности элементов ландшафта (супераквальный или элювиальный).

В естественных условиях изучены процессы накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  биотой, а также впервые определены референтные высшие водные растения озер ВУРСа, концентрирующие данные радионуклиды.

Показано, что расчет запасов радионуклидов в водных экосистемах является количественной оценкой барьерной функции гидробиоценозов по отношению к переносу нуклидов за пределы данной экосистемы. На основе математического описания динамики изменения удельной активности впервые выполнены прогностические расчеты запасов  $^{90}\text{Sr}$  в воде и донных отложениях до 2017 г., что позволяет существенно расширить временной интервал для оценки радиоэкологических изменений гидробиоценозов территории ВУРСа и верифицировать данное математическое описание.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Основные закономерности поведения радионуклидов в водной массе озерных экосистем обусловлены исходной физико-химической формой радионуклидов выпавшей смеси, начальным уровнем загрязнения, географическим положением водоема относительно источника взрыва, минерализацией озера и физико-химическими свойствами донных отложений.

Аккумуляция, распределение и вертикальная миграция  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и микроэлементов в илах пресноводных экосистем замедленного водообмена определяются характером формирования грунтов, формами нахождения радионуклидов и тяжелых металлов в донных отложениях и являются основой прогноза радиоэкологической ситуации на период до 2017 г.

2. Процессы аккумуляции, распределения и миграции  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , микроэлементов в почвах супераквальных и элювиальных элементов ландшафта зависят от удаленности водоема относительно источника взрыва, физико-химических свойств почв (наличия в среде изотопных и неизотопных носителей и органического вещества, влажности, щелочно-кислотных условий), форм нахождения радионуклидов и тяжелых металлов в почве, особенностей ландшафта водосборных территорий пресноводных гидробиоценозов.
3. Уровень накопления  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , стабильных макроаналогов и микроэлементов высшими водными растениями и ихтиофауной определяется гидрохимическими особенностями озерной экосистемы, морфофизиологическими особенностями макрофитов и рыбы. На накопление  $^{90}\text{Sr}$  высшими водными растениями влияют концентрация  $\text{Ca}^{2+}$  в воде исследованных озер, а также общая минерализация водоема.

## **Теоретическая значимость**

Впервые дана комплексная характеристика озерной экосистемы М. Игиш. Выявлено, что гипсометрическое положение водоемов, находящихся на одинаковом расстоянии от источника взрыва, влияет на содержание

$^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде озер. Установлено, что миграция радионуклидов в супераквальных и элювиальных позициях зависит от ландшафтных особенностей водосборов исследованных водоемов. Определены формы нахождения  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях и почвах водосборной территории, влияющих на миграцию и их доступность биотической компоненте экосистемы.

К установленным референтным высшим водным растениям, аккумулирующим  $^{90}\text{Sr}$ , относятся рдест блестящий (*Potamogeton lucens*), телорез обыкновенный (*Stratiotes aloides*), элодея канадская (*Elodea canadensis*). Наиболее высокий уровень содержания  $^{137}\text{Cs}$  отмечен у водокраса лягушачьего (*Hydrocharis morsus-ranae*) и урути мутовчатой (*Myriophyllum verticillatum*).

Выявлена обратная зависимость величин коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в тушке карася серебряного (*Carassius auratus gibelio* (Bloch)) от содержания в воде элементов – макроаналогов радионуклидов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{K}^+$ .

Определено, что по содержанию микроэлементов исследованные озера являются фоновыми, техногенное воздействие на них отсутствует.

Проведенные исследования могут служить научной основой для оценки способности пресноводных экосистем замедленного водообмена к самоочищению, деэвтрофикации и восстановлению структурных характеристик в условиях современной техногенной нагрузки.

### **Практическая значимость**

Разработано математическое описание для долгосрочного прогноза поведения  $^{90}\text{Sr}$  в воде озер, которое учитывает динамику изменения удельной активности данного радионуклида с 1957 года. Рассчитаны запасы  $^{90}\text{Sr}$  на период до 2017 г. в водной массе и донных отложениях озер ВУРСа. Установлены современные запасы  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в основных компонентах изученных гидробиоценозов, включая их водосборные территории.

Получены современные комплексные радиоэкологические характеристики озерных экосистем, которые могут служить основой для возврата водоемов в хозяйственный оборот.

Показано, что в настоящее время рыбная ловля и рыборазведение возможны только на озерах Куяныш и Травяное. По содержанию  $^{90}\text{Sr}$  в тушке рыбы этих озер превышение нормы не отмечено.



Выявленные референтные водные растения пресноводных экосистем замедленного водообмена, аккумулирующие  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , могут быть использованы в целях биомониторинга гидробиоценозов в качестве маркеров радиоактивного загрязнения.

Установленные концентрации и формы нахождения тяжелых металлов в воде, донных отложениях и почвах изученных гидробиоценозов используются как фоновые при исследовании озер Челябинской области.

Материалы диссертации вошли в соответствующие разделы лекционных курсов радиоэкологии, введения в радиобиологию, химии окружающей среды, читаемых студентам старших курсов Челябинского государственного университета и Челябинского государственного педагогического университета.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ-Урал 04-05-96-057 (2004 - 2006 гг.), Министерства образования и науки Челябинской области, областной целевой программы «Развитие инновационной деятельности в Челябинской области по направлению «Развитие фундаментальных научных исследований», 2006 г., № 876.

#### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Региональной научно-практической конференции «ВУРС-45», Озерск, 2002 г.; конференции по итогам научно-исследовательских работ преподавателей и научных сотрудников ЧГПУ за 2002 - 2006 гг.; VI региональной научно-практической конференции «Проблемы экологии, экологического образования и просвещения в Челябинской области», Челябинск, 18 апреля 2002 г.; XIII Международном симпозиуме «Международный год воды – 2003», Австрия, 29 марта – 05 апреля 2003 г.; XV Международном симпозиуме «Медико-экологическая безопасность, реабилитация и защита населения», Италия, 20-27 марта 2004 г.; Региональной научно-практической конференции «Проблемы географии Урала и сопредельных территорий», Челябинск, 6-8 апреля 2004 г.; II международной научно-практической конференции «Теоретическая и экспериментальная химия», Караганда, 16-17 сентября 2004 г.; Всероссийской научной конференции «Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды», Челябинск,

11-15 октября 2004 г.; Всероссийской научной школе «Актуальные проблемы регионального экологического мониторинга: теория, методика, практика», Киров, 16-18 ноября 2004 г.; VII региональной научно-практической конференции «Проблемы экологии, экологического образования и просвещения в Челябинской области», Челябинск, 9 декабря 2004 г.; XI международном экологическом симпозиуме «Урал атомный, Урал промышленный», Екатеринбург, 2005.; II международной научно-практической конференции «Экология и научно-технический прогресс», Пермь, 2005 г.; Всероссийской конференции «Современные аспекты экологии и экологического образования», Казань, 19-23 сентября 2005 г.; III Международном симпозиуме «Хроническое радиационное воздействие: медико-биологические эффекты», Челябинск, 24-26 октября 2005 г.; Межрегиональной научно-практической конференции «Экологическая политика в обеспечении устойчивого развития Челябинской области», Челябинск, 7-8 декабря 2005 г.; V съезде по радиационным исследованиям «Радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность», Москва, 10-14 апреля 2006 г.; I Международной научно-практической конференции «Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды», Челябинск, 9-11 октября 2006 г.; Международной научной конференции «Проблемы биологии, экологии и образования: история и современность», Санкт-Петербург, 22-24 мая 2006 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 33 работы, из них 7 статей издано в журналах, рекомендуемых ВАК.

### **Личный вклад диссертанта в исследования**

Постановка цели и основных задач диссертационной работы, формирование методических подходов, теоретические разработки и практическое приложение выполнены диссертантом самостоятельно. Диссертант принимал непосредственное участие в сборе, обработке и анализе полевых материалов. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты диссертации, осуществлялась самостоятельно или при участии соавторов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, выводов, списка использованных источников и 40 приложений. Общий объем

диссертации составляет 317 страниц, включая 69 рисунков и 35 таблиц. Список использованных литературных источников состоит из 333 наименований, из них 69 на иностранных языках.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Материалы и методы исследований

Объектами исследований служили 6 водоемов территории ВУРСа в Челябинской области и 2 контрольных озера (озера сравнения), не подвергшиеся загрязнению в результате аварии 1957 г. По месту расположения к источнику взрыва водоемы были классифицированы следующим образом: оз. Урукуль – ближняя зона (20 км от источника взрыва); озера Б. Игиш и М. Игиш – средняя или центральная зона (60 км от источника взрыва); озера Травяное, Куяныш, Шаблиш – дальняя (периферийная) зона, 80 км от источника взрыва. Два фоновых озера, Б. Боляш и Мисяш, находятся в одной лимнологической провинции с исследованными озерами.

Материалом для настоящего исследования служили вода, представители высшей водной растительности и ихтиофауны, донные отложения и почва водосборных территорий изученных водоемов. Пробы отбирались с 2001 по 2006 годы.

Донные отложения представлены в исследовании двумя типами: илистые сапропели и торфяные грунты (сфагновые). Почвы водосборных территорий озер лежат в области преимущественного распространения луговых и серых лесных почв.

Отбор проб воды и донного грунта производился дважды в год, в одни и те же гидрологические сезоны: конец подледного периода (март-апрель) и период конца биологического лета (август-сентябрь), для которых характерно экстремальное состояние экосистем уральских озер, отражающее их годовое развитие при минимально возможном запасе кислорода зимой и максимально возможной степени развития синезеленых водорослей летом. Отбор почвенного грунта проводили раз в год, в конце биологического лета.

Основные требования, лежащие в основе отбора проб на радиохимический анализ (МУ 2.6.1. 715-98 и МУК 2.6.1. 016-99), определяются необходимостью полной оценки распределения радионуклидов, а также чувствительностью используемых физических и радиохимических способов их определения. Обработка и подготовка к соответствующему анализу отобранных проб производилась по стандартным общепринятым методикам (Сборник рекомендуемых методик..., 1997).

Отбор проб воды проводился с поверхностных (0,2 – 0,5 м от поверхности) и придонных горизонтов (0,5 м от дна) батометром Молчанова ГР-18 в трех повторностях на каждую точку: по 20 л на повторность на радиохимический анализ, по 1,5 – 2 л на гидрохимический анализ (ГОСТ 17.1.5.05. – 85 и ГОСТ Р 51592 – 2000).

Отбор проб донных отложений осуществлялся с использованием стандартного гидрологического оборудования, позволяющего получать образцы с ненарушенной стратификацией. Колонки донных отложений на исследованных озерах отбирались до подстилающих пород, также неоднократно производился отбор колонок грунтов глубиной до 30, в отдельных случаях до 65 см с необходимым шагом (1 см, 2 см, 5 см). Для отбора колонок донных отложений в конце гидрологической зимы применялась поршневая трубка Ливингстона в модификации Д.А. Субетто. Также для отбора стратифицированных проб использовались коробчатые дночерпатели (в частности, Экмана-Берджи) или цилиндрические гравитационного типа с нижней диафрагмой (Общие закономерности ..., 1986; Дерягин В.В., 1999).

Определение места закладки почвенных разрезов основывалось на исследовании особенностей ландшафтных катен (Глазовская М.А., 1981) и вычленении в них элювиальных и супераквальных элементов. Почву из почвенных разрезов вынимали слоями по 1 и 5 см с учетом генетических горизонтов и площади отбора проб до глубины 30 – 65 см, высушивали, растирали и просеивали через сито с ячейками в 1 мм.

Из зарегистрированных на озерах 23 видов высших водных растений (ВВР) в анализ были включены 13, относящиеся к четырем экологическим группам: воздушно-водные, свободно-плавающие, укореняющиеся погруженные и укореняющиеся погруженные с плавающими листьями. К первой

группе относятся тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), камыш озерный (*Scirpus lacustris* L.), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.), рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.); ко второй – водокрас лягушачий (*Hydrocharis morsus-ranae* L.), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.); к третьей – телорез обыкновенный (*Stratiotes aloides* L.), рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.), рдест нитчатый (*Potamogeton filiformis* L.), уруть мутовчатая (*Myriophyllum verticillatum* L.), элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.); к четвертой – рдест плавающий (*Potamogeton natans* L.), горец земноводный (*Persicaria amphibia* (L.) S. F. Gray).

Ихтиологическим материалом для настоящей работы служил карась серебряный (*Carassius auratus gibelio* (Bloch)).

Отбор водной флоры и ихтиологического материала проводился раз в год, в конце биологического лета. Сбор макрофитов осуществлялся согласно стандартным методикам (Катанская В.М., 1981). Вес сырой пробы каждого вида высшей водной растительности и рыбы составлял от 3 до 5 кг. Исследуемый материал был отобран в трех повторностях. Образцы растений промывали водой, высушивали при комнатной температуре до постоянной массы и измельчали. Для дальнейших исследований пробы макрофитов озоляли при температуре 500° С в течение 5 часов.

Пойманную рыбу взвешивали, промеряли в соответствии с имеющимися схемами промеров, изложенными в «Руководстве по изучению рыб» (Правдин И.Ф., 1966). После ихтиологических исследований отдельно готовили пробы кости, мышц и тушки без внутренних органов, которые высушивали при 105° С, затем озоляли при температуре 450° С.

Определение морфометрических параметров озер проводилось согласно стандартным гидрологическим методикам (Давыдов Л.К., 1973; Богословский Б.Б., 1974). Анализ гидрохимических параметров водоемов осуществлялся также по стандартным методикам, с учетом предусмотренных руководящими документами погрешностей (РД 52.24; Руководство..., 1977; Алекин О.А., 1973).

Определение  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях проводили  $\gamma$ -спектрометрическим методом на полупроводниковых детекторах типа ДГДК-100.

Относительная погрешность измерения не превышала 20 % («Методика выполнения измерений удельной активности гамма-излучающих ...», 2002).

Удельную активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде («Методика выполнения измерений удельной активности цезия-137 и стронция-90 в природных ...», 2002), в почвенных и донных образцах («Методика выполнения измерений удельной активности цезия-137 и стронция-90 в почвах ...», 2002), в пробах биологического и растительного происхождения («Методика выполнения измерений удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах ...», 2002) определяли радиохимическим методом. Определение  $^{90}\text{Sr}$  основано на экстракции  $^{90}\text{Y}$  моноизооктилметиловым эфиром фосфоновой кислоты. Анализ  $^{137}\text{Cs}$  проводили концентрированием радионуклида на ферроцианиде никеля и выделении его в виде сурьмяноидидной соли. Измерение бета-активности выделенных радионуклидов проводилось на малофоновых установках УМФ-1500 и УМФ-2000. Относительная погрешность измерения не превышала 20 %.

Определение содержания макро- и микроэлементов производилось на атомно-абсорбционных спектрометрах (ААС) с пламенным и электротермическим режимом атомизации ("Perkin - Elmer 3110"). Для контроля в каждую партию проб включался международный стандарт JLK-1 (lake sediments) или CRM 141R (calcareous loam soil). Норма погрешности соответствовала ГОСТ 27384-87.

Для определения форм нахождения радионуклидов использовалась методика Павлоцкой Ф.И. (1974, 1998) в модификации УНПЦ РМ (Методика определения ..., 1989) и Института экологии растений и животных УрО РАН (Молчанова И.В. и др., 2006). Методика определения включала 4 стадии. Определение форм нахождения радионуклидов и микроэлементов по Тессье (Tessier A., 1979) состояло из пяти стадий. Анализ форм нахождения радионуклидов и макро- и микроэлементов в образцах почв по методикам Павлоцкой или Тессье предварялся приготовлением водной вытяжки и определением содержания в ней радионуклидов и микроэлементов.

Для определения минерального состава донных отложений был выполнен рентгенофазовый анализ на дифрактометре ДРОН-2.0 Идентификация

основных базальных отражений производилась по международной картотеке рентгеновских данных JCPDS.

Химические свойства почв определялись согласно стандартным методикам (Аринушкина Е.В., 1970).

Подготовленные пробы анализировались в лицензированных научных центрах (лабораториях), имеющих аттестаты аккредитации.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась общепринятыми методами с использованием пакета документов, представляемых стандартными программами Microsoft Excel, Sigma Plot v. 12.0, Statistica – 5.1. Различия считались достоверными при  $p < 0,05$ .

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

### **Современные гидрологические параметры озерных экосистем ВУР-Са**

На территории ВУРСа расположены озера, имеющие общее происхождение, с отдельными особенностями строения котловин, различающиеся морфометрическими параметрами (табл. 1), условиями формирования гидрохимического состава стока с водосборов. Все эти характеристики в совокупности определяют условия накопления донных отложений и особенности внутреннего водообмена в озерах. Из представленных озер по сумме ионов и типу минерализации выделяются Урускуль и М. Игиш, по коэффициенту открытости – Шаблиш (табл. 1).

Содержание взвешенных веществ в озерах связано также с морфометрическим показателем открытости, особенно ярко эта зависимость прослеживается у солоноватых неглубоких озер Урускуль и Мисяш. Однако для озер Куяныш, Шаблиш и некоторых других водоемов, имеющих значительный показатель открытости, отмечены невысокие значения взвесей в воде, что, по всей вероятности, обусловлено интенсивным развитием погруженной и плавающей высшей водной растительности.

Таблица 1

## Гидрологические характеристики озер ВУРСа

Озеро	Расстояние от источника взрыва, км	Площадь зеркала (S), км <sup>2</sup>	Объем водной массы (V), млн. м <sup>3</sup>	Коэффициент открытости S/Нср	Среднее знач. $\sum$ ионов, г/л	Тип минерализации
Урускуль	20	5,0	15,0	1,67	3,4	С Na/I
М. Игиш	60	0,68	1,8	0,26	0,1	С Ca/I
Б. Игиш	60	1,6	3,6	0,6	0,3	С Ca/I
Куяныш	80	6,68	15,4	2,9	0,4	С Mg/I
Травяное	80	2,6	3,4	2,0	0,44	С Ca, Mg/I
Шаблиш	90	38,0	106,0	13,6	0,46	С Mg/I
Мисяш	*	4,4	11,0	1,76	1,3	С Na, Mg/I
Б. Боляш	*	0,95	1,7	0,53	0,4	С Mg/I

Примечание: \* - водоем сравнения, вне зоны ВУРСа

В целом ветровое взмучивание для изученных озер нехарактерно, концентрации взвешенных веществ находятся в пределах 5,0 – 17,5 мг/л.

По величине среднегодовой рН озерной воды исследованные озера подразделяются следующим образом:

- рН 6 – 7 (оз. М. Игиш);
- рН 7 – 8 (озера Б. Игиш, Травяное);
- рН 8 – 9,5 (озера Шаблиш, Куяныш, Урускуль, Мисяш, Б. Боляш).

Озера Мисяш и Урускуль имеют слабощелочные солоноватые воды (общая минерализация 1,5 – 4,3 г/л). Значения рН воды озера Б. Игиш и Травяное тяготеют к промежуточным значениям. Озеро Травяное – зарастающий водоем с разобщенными плесами, процессы заболачивания отмечены также и на озерах Б. и М. Игиш, что отразилось на величине рН.

По сравнению с периодом 1956 – 1970 гг. (Черняева Л.Е. и др., 1977) в последние годы наблюдается общее распреснение исследованных водоемов, как следствие водных 1999 – 2006 гг.



Исследование современного состояния изученных озер позволяет подразделить водоемы на 3 типа: солоноватые (Урускуль), ультрапресные (впервые изученный М. Игиш), пресные (Б. Игиш, Куяныш, Травяное, Шаблиш). Воды данных озер относятся к гидрокарбонатному классу, характерен содовый (I) тип; в катионной группе доминирует двухвалентный кальций (Б. Игиш, М. Игиш), двухвалентный магний (Куяныш, Травяное, Шаблиш, Б. Боляш, Мисяш). Все озера, включая фоновые, относятся к эвтрофному типу.

### **Аккумуляция и миграция радионуклидов, микроэлементов в воде и донных отложениях загрязненных озерных экосистем ВУРСа**

Исследование радиоэкологической ситуации на изученных озерах проводилось через 44-49 лет после аварии и загрязнения озер. К настоящему времени состояние загрязненных водоемов изменилось в результате естественного распада радионуклидов и перераспределения их по основным компонентам озерной экосистемы: вода – донные отложения – высшая водная растительность – ихтиофауна. Основную значимость в озерных экосистемах ВУРСа приобрели долгоживущие радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Современные значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде озер представлены на рис. 1 и 2.

В качестве уровня фона по Уральскому региону приведены средние величины удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде контрольного оз. Мисяш. Отмечено, что фоновые значения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  по России, обусловленные их содержанием после глобальных выпадений, практически совпадают со средними значениями удельной активности радионуклидов в воде оз. Мисяш.

Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде оз. М. Игиш отличается от аналогичных значений для оз. Б. Игиш, хотя их географическое положение относительно источника выпадений одинаково. Это связано с различным первоначальным уровнем загрязнения и гипсометрическим положением данных озер (рис. 1 и 2).

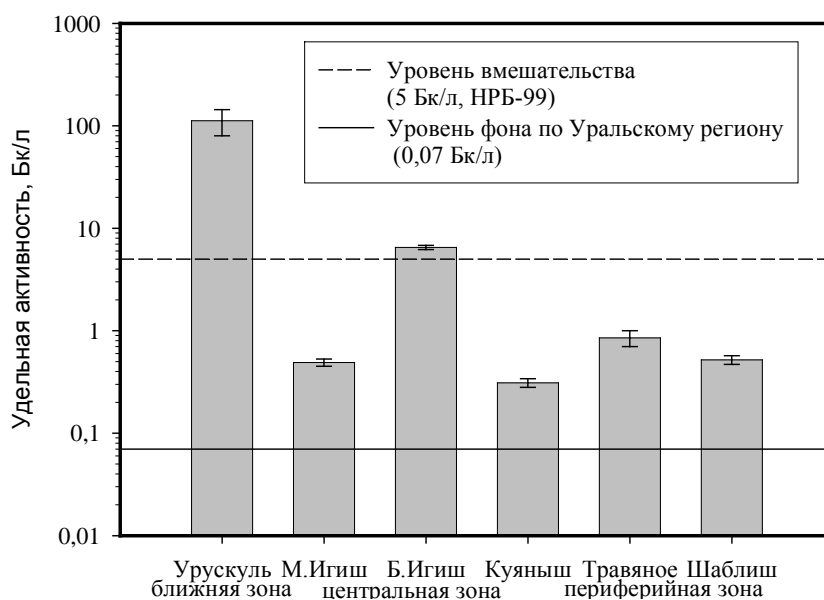


Рис. 1. Средние значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде озер (2003 – 2005 гг.) в сравнении с фоновыми значениями по Уральскому региону и уровнем вмешательства (НРБ-99)

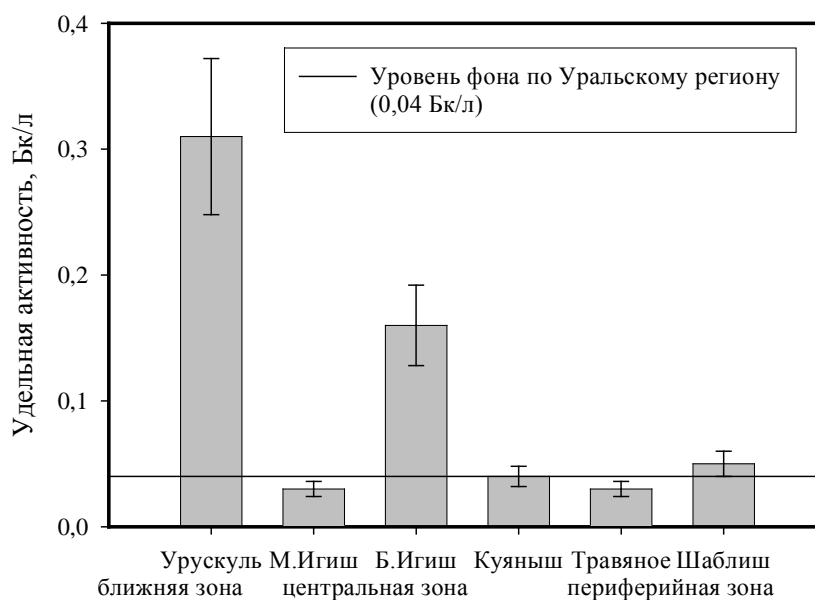


Рис. 2. Средние значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в воде озер (2003 – 2005 гг.) в сравнении с фоновыми значениями по Уральскому региону и уровнем вмешательства (НРБ-99)

По загрязнению тяжелыми металлами исследованные водоемы в настоящее время можно считать фоновыми.

С учетом ранее полученных данных (Ровинский Ф.Я. и др., 1964; Мельников Ю.И. и др., 1964; Анненкова Л.В. и др., 1964; Сафронова Н.Г., 1983; Коготков А.Я. и др., 2002; Экологические и медицинские., 2001) проанализирована динамика изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде озер со времени после аварии 1957 г. Получены экспоненциальные кривые спада активности в воде: для оз. Урускуль динамика изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  описывается суммой трех экспонент, для оз. Б. Игиш, Травяное, Куяныш – суммой двух экспонент. На рис. 3 представлена динамика изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде озера Урускуль с 1957 по 2005 гг. Как видно из рис. 3, скорость очищения водной массы данного водоема существенно замедлилась в отдаленный период времени после загрязнения.

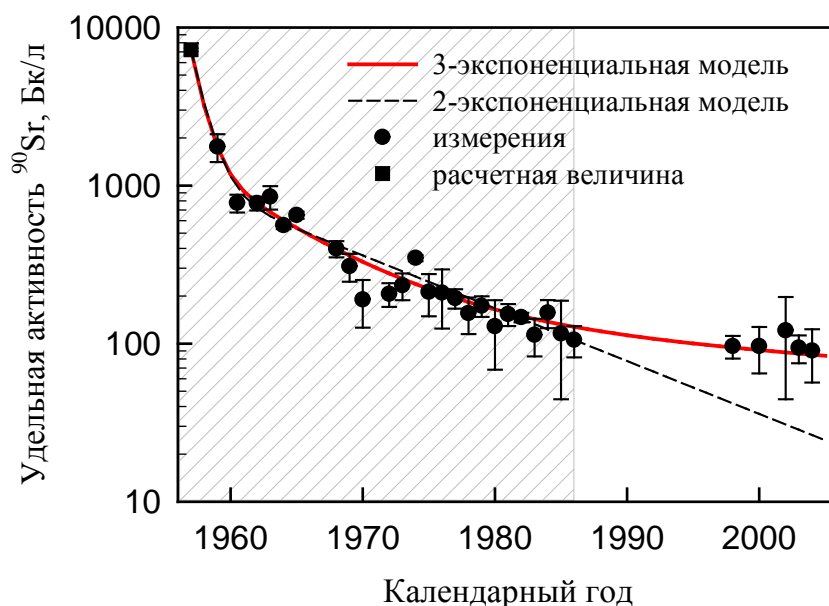


Рис. 3. Динамика изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде оз. Урускуль с 1957 по 2005 гг.

Параметры модели, оцененные на основе измерений, полученных в период 0-30 лет после загрязнения, несколько ниже современных уровней удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде (Сафронова Н.Г., Воробьева М.И., 1988). Аналогичная ситуация наблюдается при описании динамики удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде оз. Урускуль по математической модели, предложенной

С.В. Фесенко и др. (2004). Установлено, что в отдаленный период времени после загрязнения выведение  $^{90}\text{Sr}$  из воды происходит со скоростью не более 5 % в год, что, возможно, связано с насыщением радионуклидом верхних слоев донных отложений, частичной десорбцией и установлением нового равновесия между водой и грунтами.

Динамика удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде озер Травяное и Куяныш, расположенных в периферийной зоне ВУРСа, представлена на рис. 4 и 5.

Анализируя спад удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде изученных озер, можно выделить несколько временных периодов в процессе их самоочищения. В первоначальный период времени после аварии резкое снижение удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде связано с началом перераспределения радионуклида между основными компонентами озерной экосистемы: идут процессы осаждения, активной сорбции донными отложениями, после чего снижение активности воды происходит в основном за счет более прочного закрепления радионуклида в донных отложениях и вертикальной миграции вглубь по профилю (Сафронова Н.Г., Воробьева М.И., 1988; Коготков А.Я., Осипов В.Г., 2002; Фесенко С.В. и др., 2004).

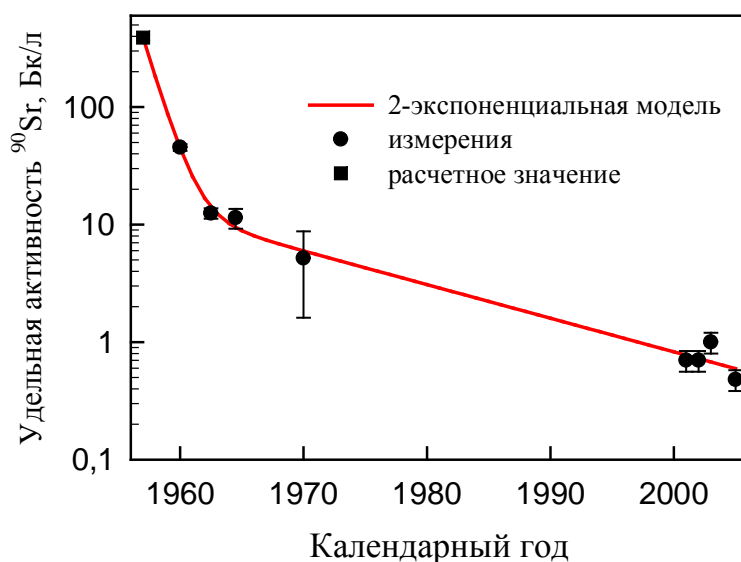


Рис. 4. Динамика изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде оз. Травяное с 1957 по 2005 гг.

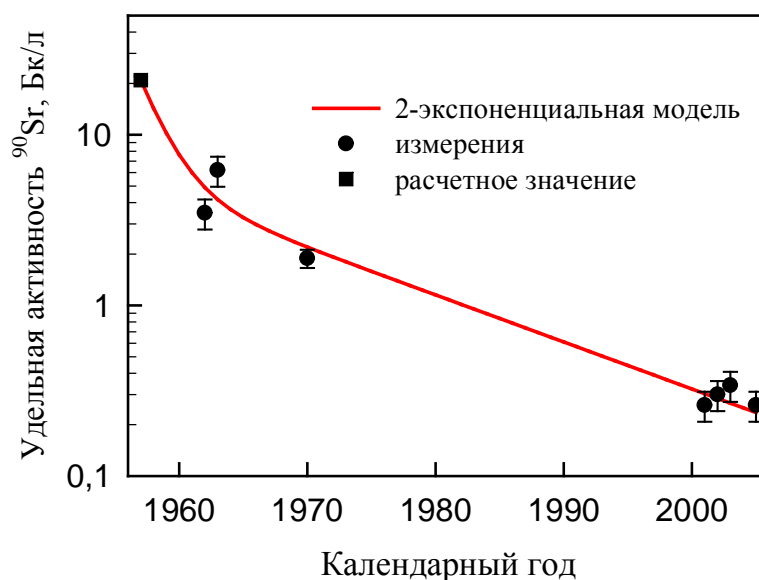


Рис. 5. Динамика изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде оз. Куяныш с 1957 по 2005 гг.

В первые 3-5 лет после аварии снижение удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде за счет этих процессов, включая радиоактивный распад радионуклида, происходило с периодом полуочищения, составляющим 0,3-0,9 лет.

В отдаленный период времени наблюдается более медленное самоочищение воды водоемов, в основном за счет дальнейшей миграции  $^{90}\text{Sr}$  вглубь грунтов, установления динамического равновесия между водной массой и илами, продолжающегося радиоактивного распада  $^{90}\text{Sr}$  (Коготков А.Я., Осипов В.Г., 2002), изменения соотношений между подвижными и малоподвижными формами, частичной десорбции радионуклида.

Установлено, что на процессы самоочищения влияют, в частности, водность года, распределение водоемов, общая минерализация, свойства донных отложений. В целом период полуочищения воды в отдаленные сроки за счет этих процессов составил 12-17 лет.

Если современная динамика очищения воды сохранится, то в следующие 50 лет следует ожидать лишь трехкратного снижения удельной активности воды оз. Урускуль, а в других непроточных водоемах ВУРСа – от 10 до 30 раз.

По рассчитанным значениям кратности очищения водной массы от  $^{90}\text{Sr}$  к 2005 г. (рис. 6) определено, что самая низкая степень очищения (20) наблюдается для оз. Шаблиш, самая высокая (588 и 833) - для озер М. Игиш и Травяное соответственно. По  $^{137}\text{Cs}$  низкие значения кратности очищения (7 и 18) характерны для водоемов Шаблиш и Куяныш соответственно, высокие (1330) – для оз. Травяное. Отмечено, что высокая кратность очищения характерна для озер сильной степени эвтрофности, какими являются озера М. Игиш и Травяное. Немаловажную роль в оценке кратности очищения играет неопределенность исходных уровней загрязнения озер радионуклидами.

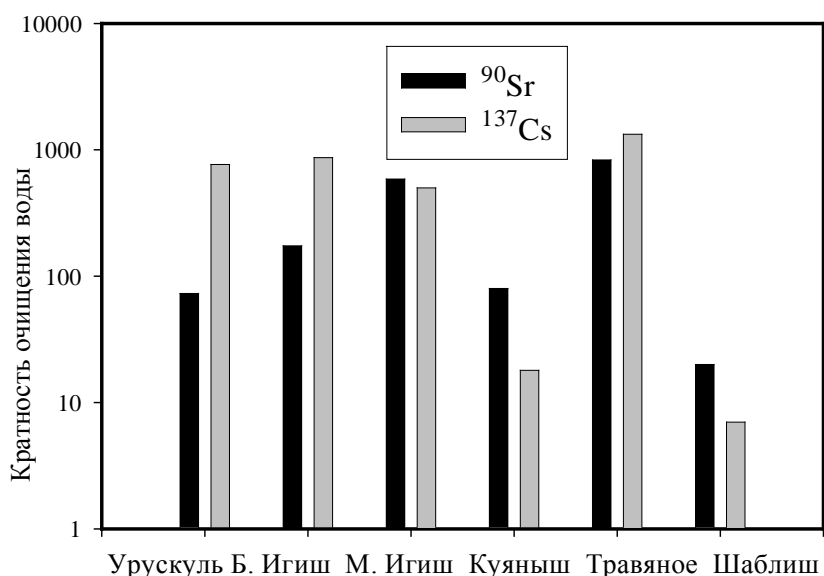


Рис. 6. Кратность очищения водной массы исследованных озер от  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (2005 г.)

Полученные для каждого озера экспоненциальные зависимости снижения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде от времени после аварии позволили рассчитать запасы для любого периода (табл. 2).

Сопоставляя полученные данные, можно отметить хорошую сходимость для реальных и расчетных величин запасов  $^{90}\text{Sr}$ , что позволяет использовать предложенное математическое описание динамики изменения удельной активности для прогноза уровня загрязнения радионуклидом водной массы озер (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные величины запасов  $^{90}\text{Sr}$  в воде исследованных озер (ГБк)

Озеро	1957	1970	2000	2004	2017
Урускуль	108300,0 (108500,0)	4798,0 (2840,0)	1231,0 (1440,0)	1147,0 (1350,0)	939,0
Б. Игиш	3830,0 (3830,0)	89,0 (94,0)	22,7 (23,0)	20,0 (19,0)	12,0
Травяное	1326,0 (1326,0)	23,0 (17,6)	2,9 (2,4)	2,2 (1,6)	1,0
Куяныш	322,0 (322,0)	34,0 (29,0)	4,8 (4,0)	3,8 (4,0)	1,8

Примечание: в скобках даны величины запасов  $^{90}\text{Sr}$ , рассчитанные по измеренным значениям удельной активности с учетом объема водной массы озера

Интегральным выражением взаимовлияния лимнических и водосборных процессов является формирование донных отложений (Страхов Н.М., 1993).

Распределение радионуклидов в верхнем 30-см слое донных отложений оз. Урускуль (рис. 7) позволяет выделить горизонт аварии 1957 г. – 12-14 см, что согласуется с литературными данными (Фесенко С.В. и др., 2004).

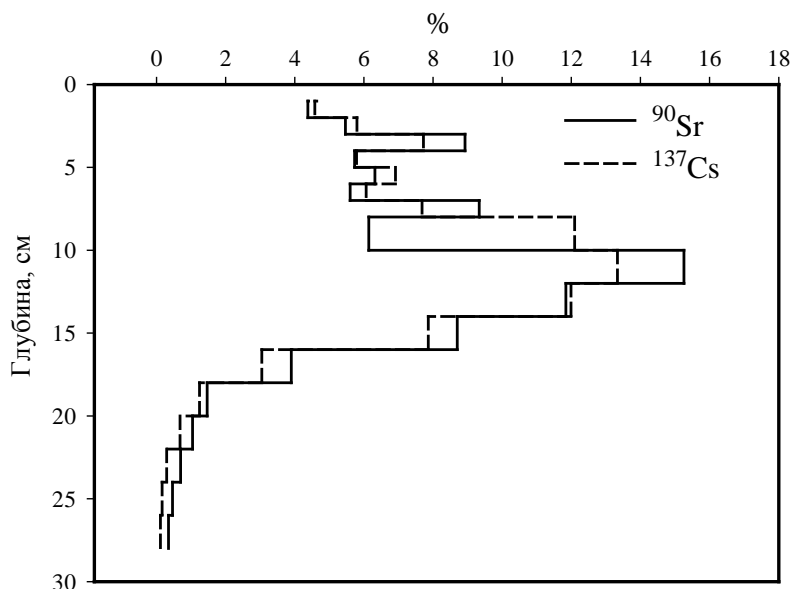


Рис. 7. Распределение  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (%) по колонке донных отложений оз. Урускуль (2004 г.)

В донных отложениях оз. Урускуль содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 30-см слое отражает общее почти для всех озер (кроме Б. Игиш и Травяное) распределение веществ, попавших в озеро при антропогенном воздействии: в верхнем 10-сантиметровом слое сосредоточено до 70 %  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , глубже слоя 17 см содержание радионуклидов составляет доли процента. Незначительная доля содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностных слоях донных отложений (на примере илов оз. Б. Игиш) может быть связана с большой степенью обводненности и наличием крупнозернистых иловых агрегатов, обуславливающих низкую сорбционную способность таких грунтов.

По результатам рентгено-фазового анализа (рис. 8) определено, что поверхностный слой донных отложений этих озер (1-5 см) в основном содержит минералы кальцит, кварц и не содержит листовых и смешанно-слойных минералов, таких как хлориты, монтмориллониты, иллиты и другие, которые обладают наибольшей сорбционной емкостью к радионуклидам.

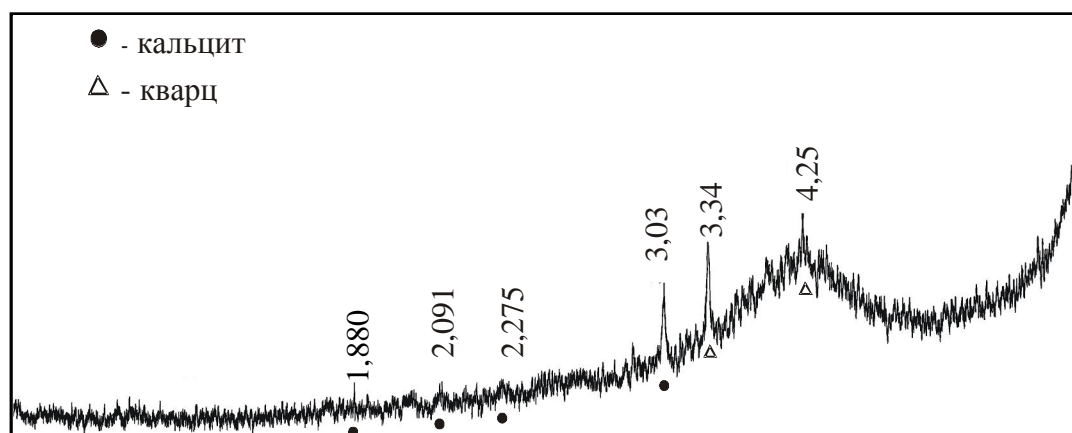


Рис. 8. Дифрактограмма донных отложений слоя 1-5 см оз. Б. Игиш

По вертикальному распределению  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях водоемы можно условно разделить на следующие группы: в первой группе (Б. Игиш, Травяное) около 40 % радионуклидов сосредоточено в верхнем 0-10 см слое илов, тогда как в озерах на периферии Следа (вторая группа) в этом слое (0-10 см) находится от 60 до 90 % от суммарного содержания в исследованной колонке (рис. 9 и 10).



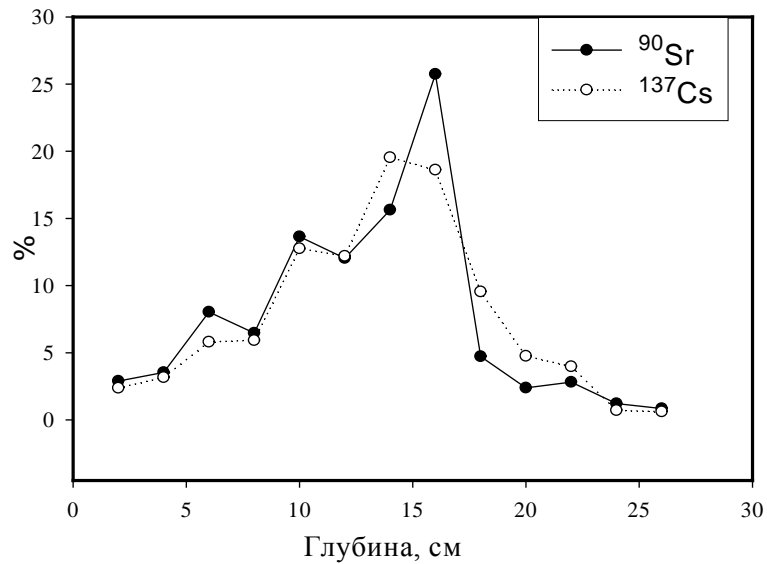


Рис. 9. Распределение  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (%) в донных отложениях оз. Травяное (2003-2005 гг.)

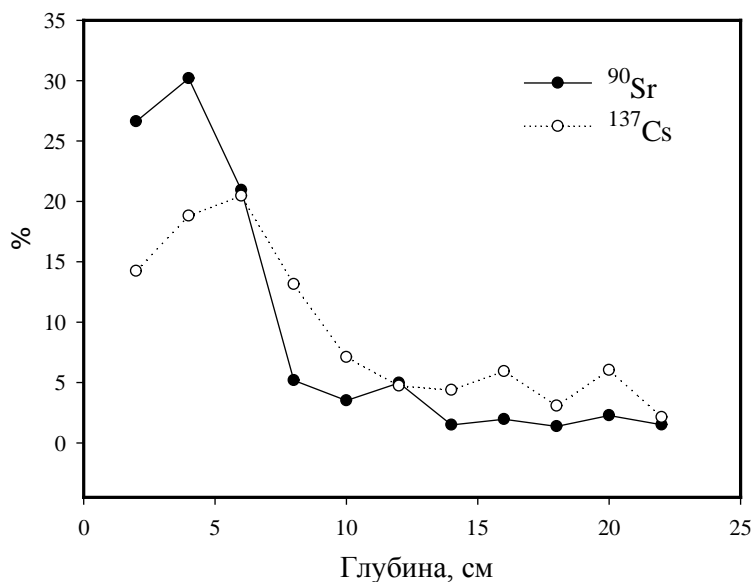


Рис. 10. Распределение  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (%) в донных отложениях оз. Шаблино (2003-2005 гг.)

Возможно, на характер распределения радионуклидов в илах повлияло внесение значительного количества органического вещества (навоза) в озера Травяное и Б. Игиш в ранний поставарийный период. При этом большое значение приобрело его биолого-экологическое воздействие гипертрофного характера, вызвавшее интенсивное размножение фито-, зоо- и бактериопланктона с последующим угнетением и частичным вымиранием nekтона и мак-

рофитов. Резко изменившийся трофический статус способствовал интенсификации осадконакопления, а также связыванию  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в илах в мало-подвижной форме. Это обусловило активизацию процессов самоочищения, что привело к значительному накоплению радионуклидов около горизонта аварии. Постепенный возврат озерной экосистемы к первоначальному трофическому состоянию обусловил уменьшение интенсивности самоочищения и захоронения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях.

Установлено, что основная часть  $^{90}\text{Sr}$  в илах оз. Урускуль (рис. 11) связана с гидроксидами железа и марганца и органической частью грунтов (45 и 37 % соответственно). Малая доля  $^{90}\text{Sr}$  (7 %) содержится в обменной форме и в виде нерастворимого остатка. Формы нахождения  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях иные, чем у  $^{90}\text{Sr}$ : основная часть (88 %) связана с нерастворимым остатком. Исследование форм нахождения  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях оз. Б. Игиш показало аналогичное распределение по фракциям с грунтами оз. Урускуль и повышенную долю подвижных форм  $^{137}\text{Cs}$  в оз. Б. Игиш (рис. 11).

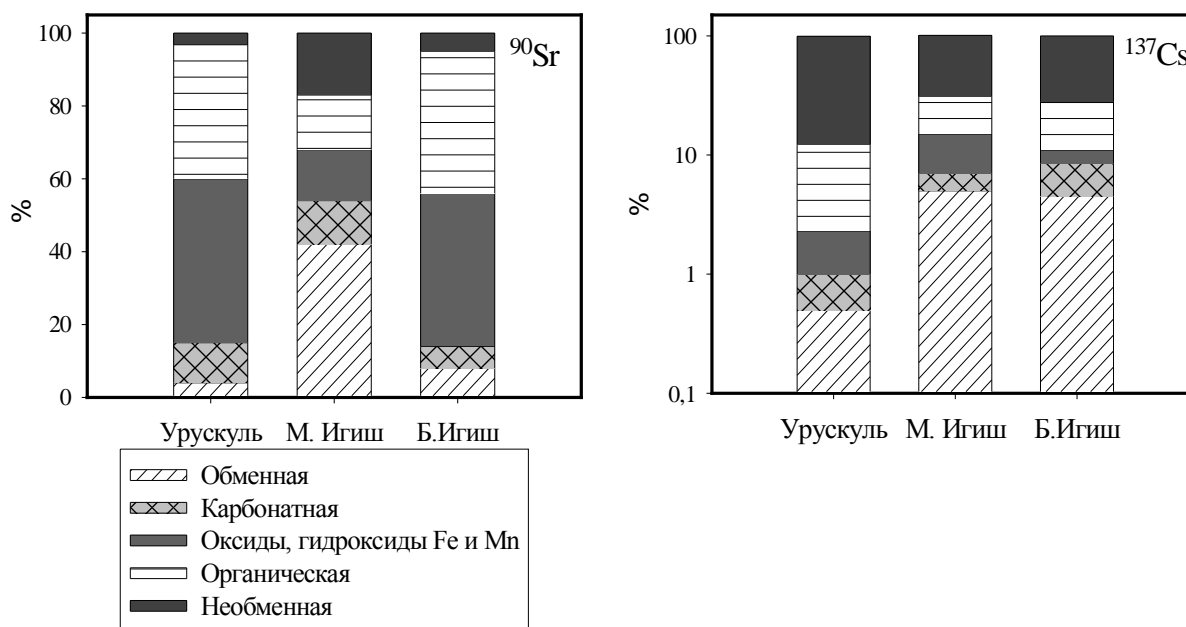


Рис. 11. Распределение физико-химических форм  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях озер Урускуль, Б. и М. Игиш (%)

Исследование форм нахождения  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях двух рядом расположенных озер Б. Игиш и М. Игиш показало, что значительная часть данного радионуклида (до 85 %) связана с гидроксидами железа и марганца и с органической фракцией грунтов Б. Игиша (рис. 11).

Основная часть  $^{90}\text{Sr}$  (42 %) в донных отложениях оз. М. Игиш находится в обменной форме (рис. 11). Преобладающая обменная форма  $^{90}\text{Sr}$  особенно активно мигрирует к поверхностным слоям грунтов данного озера (вероятно, под влиянием биоты). Связь  $^{137}\text{Cs}$  с нерастворимой фазой обуславливает его одинаково малую миграционную способность в донных отложениях как оз. М. Игиш, так и Б. Игиш. Это отражается в накоплении значительной части радионуклида в слое 10-14 см. Таким образом, формы нахождения и вертикальное распределение  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях двух рядом расположенных озер Б. и М. Игиш зависят как от состава воды (солончатое и ультрапресное соответственно), так и от структуры грунтов.

Для озер периферийной зоны ВУРСа (Куяныш, Травяное, Шаблиш) формы нахождения  $^{90}\text{Sr}$  в верхних слоях донных отложений представлены на рис. 12. Можно отметить, что в этих озерах большая часть  $^{90}\text{Sr}$  сорбирована оксидами и гидроксидами марганца и железа (от 48 до 62 %), а также органической частью илов (25 – 32 %). В обменной и карбонатной формах (подвижная форма) находится от 6 до 15 % радионуклида.

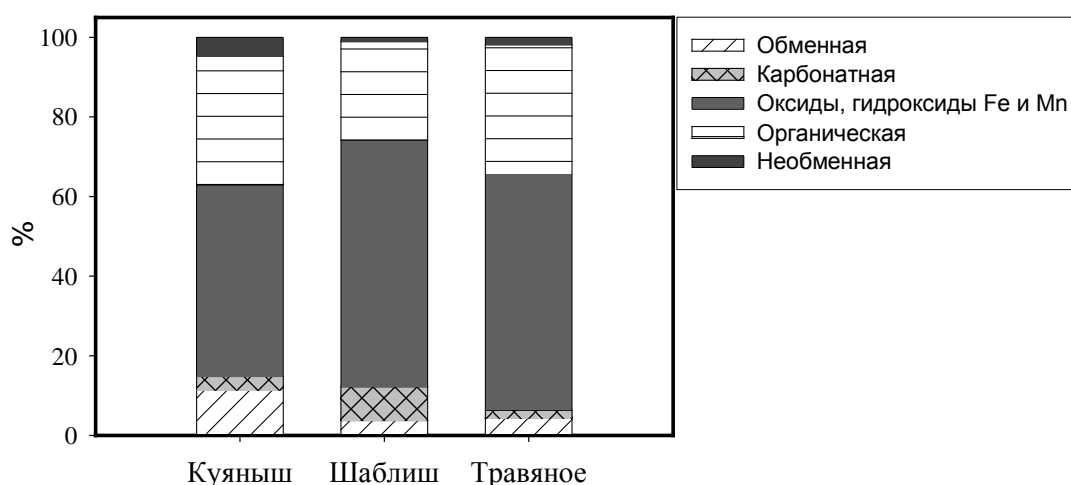


Рис. 12. Распределение физико-химических форм  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях озер Куяныш, Шаблиш, Травяное (%)

Поскольку «поведение»  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в водоеме в значительной мере зависит от содержания в среде их неизотопных макроносителей – соответственно кальция и калия, были оценены степени смещения накопления радионуклида относительно его стабильного макроаналога с помощью коэффициента дискриминации – Кд (табл. 3).

Таблица 3

Значения Кд  $\text{Ca}/^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях озер (глубина до 30 см)

Озеро	Урусуль	Б. Игиш	М. Игиш	Куяныш
Кд $\text{Ca}/^{90}\text{Sr}$	0,42	0,95	5,5	9,6

В некоторых грунтах (торфяной грунт и сапропели) Кд для пары  $\text{Ca}/^{90}\text{Sr}$  составляет меньше единицы. Следовательно, в этих условиях  $^{90}\text{Sr}$  переходит из водной среды в грунт в относительно большем количестве по сравнению с кальцием. В остальных грунтах Кд больше единицы, что свидетельствует о более слабом переходе  $^{90}\text{Sr}$  из водной среды относительно кальция.

Отмечено равномерное распределение значений содержания тяжелых металлов по колонке, что позволяет исключить антропогенное влияние на илы. Для таких биофильных металлов, какими являются Fe и Mn, характерно значительное (до 700-1000 мг/кг) содержание в первых 3 см донных отложений. В основном это те металлы, что включены в круговорот веществ и энергии озерной экосистемы.

Представленные материалы позволяют сделать вывод, что в первоначальный период времени после аварии наблюдалось активное перераспределение радионуклида между основными компонентами озерной экосистемы за счет процессов осаждения, сорбции донными отложениями. Поэтому первые годы после аварии характеризовались максимальным снижением удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде. Отдаленный период времени отличается более медленным самоочищением воды. Это в основном связано с дальнейшей миграцией  $^{90}\text{Sr}$  вглубь грунтов, изменением соотношений между подвижными и малоподвижными формами, частичной десорбцией радионуклида, продолжающимся радиоактивным распадом  $^{90}\text{Sr}$ . Кроме того, на механизмы очищения оказывают влияние водность года, распреснение водоемов, общая минерализация, свойства донных отложений.

Особенности вертикальной миграции радионуклидов в донных отложениях озер обусловлены различием форм их нахождения, первоначальным уровнем загрязнения, составом воды и сорбционной способностью осадков, выстилающих дно водоема.

### Накопление и распределение $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ , стабильных макроаналогов и микроэлементов в биоте на современном этапе развития озерных экосистем

Исследованные озера располагаются в лесостепной зоне Среднего Урала и для них характерна однотипная форма зарастания водоемов – от максимального его развития у побережий с постепенным уменьшением биомассы в средней части акватории и, как правило, до полного отсутствия высших водных растений в центральной части водоема.

Максимальные значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  на исследованных озерах были обнаружены у представителей видов рдест блестящий и телорез обыкновенный (рис. 13). Исключения составляют озера М. Игиш, где накопителем  $^{90}\text{Sr}$  является водокрас лягушачий, второе место по уровню накопления занимает телорез обыкновенный (рис. 14); Куяныш (преимущественный концентратор  $^{90}\text{Sr}$  – элодея канадская, второе место также занимает телорез обыкновенный); Шаблиш (накопитель  $^{90}\text{Sr}$  – элодея канадская, на втором месте – рдест блестящий).



Рис. 13. Значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в макрофитах оз. Б. Игиш

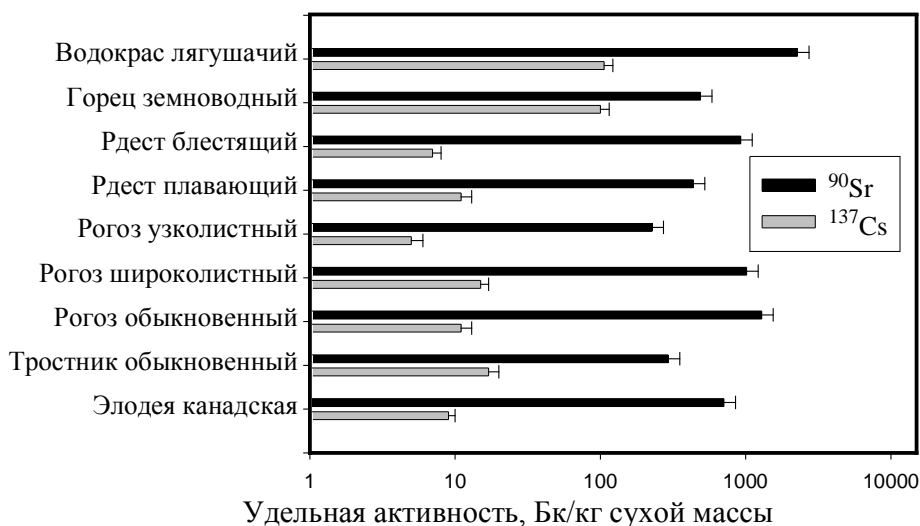


Рис. 14. Значения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в макрофитах оз. М. Игиш

Высокий уровень содержания  $^{137}\text{Cs}$  встречается среди представителей видов водокрас лягушачий, уруть мутовчатая, элодея канадская, горец земноводный, рдест плавающий, роголистник погруженный и телорез обыкновенный (рис. 13 и 14).

На рис. 15 даны значения коэффициента накопления (КН)  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  макрофитов на примере оз. Травяное. При невысоком содержании  $^{137}\text{Cs}$  в воде исследованных озер значения КН  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  высшими водными растениями – величины одного порядка (за исключением рдеста блестящего).

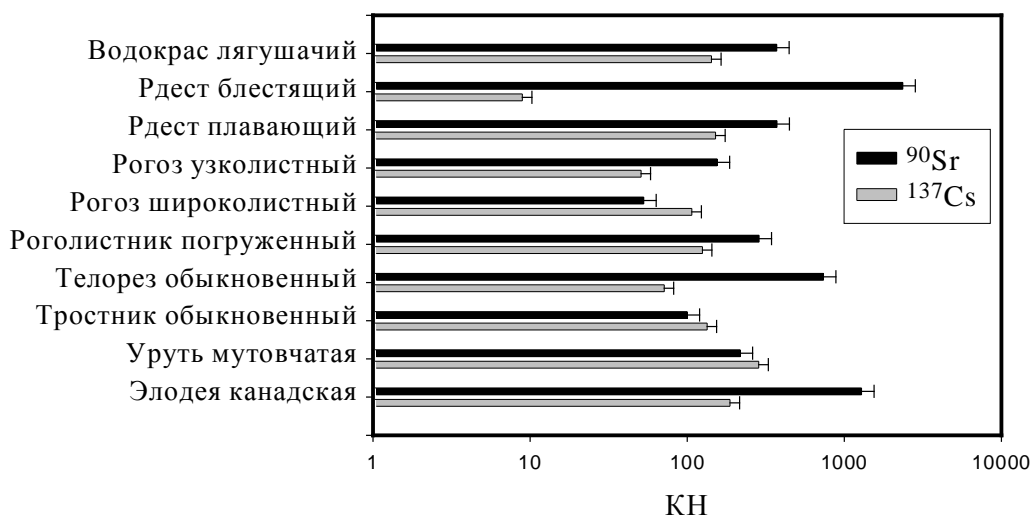


Рис. 15. Значения КН  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  для видов ВВР оз. Травяное

Вероятно, это связано с принадлежностью изученных высших водных растений к калийфильным видам, с преимущественным концентрированием аналога калия – цезия вследствие избирательного минерального питания.

Результаты исследования позволили выявить виды, являющиеся ярко выраженными накопителями  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , которые можно рассматривать в качестве референтных (индикаторов загрязнения радионуклидами) при организации биомониторинга. Наибольшие значения КН  $^{90}\text{Sr}$  отмечены у представителей видов рдест блестящий и телорез обыкновенный. Наибольшие значения КН  $^{137}\text{Cs}$  отмечены у представителей видов водокрас лягушачий, горец земноводный.

Колебания величин коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  для макрофитов связаны с концентрацией  $\text{Ca}^{2+}$  в воде исследованных озер. Так, более низкая концентрация  $\text{Ca}^{2+}$  в воде оз. М. Игиш (10,9 мг/л), по сравнению с оз. Б. Игиш (42 мг/л), обуславливает высокие (на порядок выше) значения КН  $^{90}\text{Sr}$  в высших водных растениях этого водоема (рис. 16).

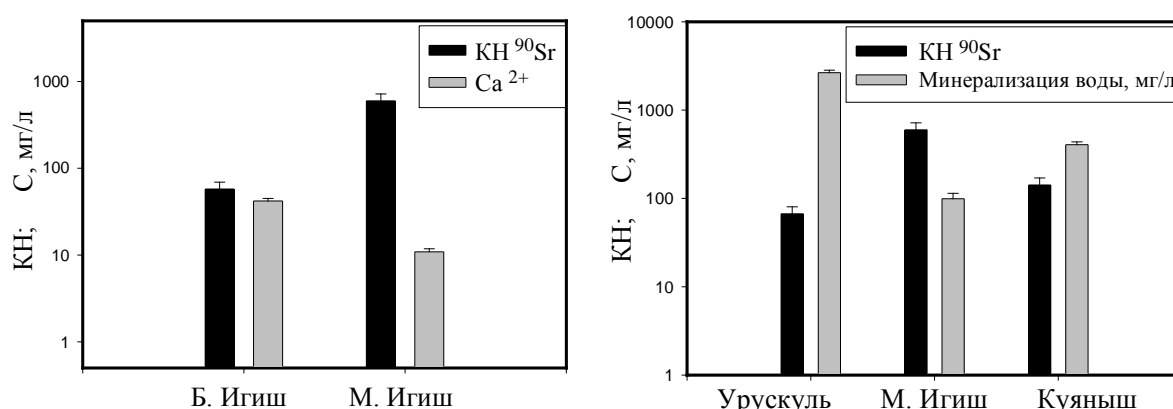


Рис. 16. Влияние гидрохимических параметров водоема на коэффициент накопления  $^{90}\text{Sr}$  тростником обыкновенным

На коэффициент накопления радионуклидов влияет общая минерализация водоема. Например, для группы озер Урускуль, М. Игиш и Куяныш, относящихся к солоноватым, ультрапресным и нормально пресным водоемам соответственно, величины КН  $^{90}\text{Sr}$  для тростника обыкновенного различаются в 3 раза (Урускуль – Куяныш) и в 9 раз (Урускуль – М. Игиш) (рис. 16).

Количество  $^{90}\text{Sr}$ , которое удерживается макрофитами в вегетационный период во всех исследованных растениях, а также запасы радионуклида в донных отложениях и в воде представлены в табл. 4.

Таблица 4

Распределение суммарного запаса (%)  $^{90}\text{Sr}$  в воде, донных отложениях и макрофитах озер (вегетационный период, 2005 г.)

Озеро	Вода	Донные отложения	Макрофиты
Урускуль	25,5	73,7	0,8
Б. Игиш	10,2	76,4	13,4
М. Игиш	8,2	47,6	44,2
Травяное	1,7	81,3	17,0

Показано, что донные отложения содержат наибольшее количество  $^{90}\text{Sr}$ . Макрофиты оз. Травяное накапливают значительную долю радионуклида по сравнению с озерами Урускуль и Б. Игиш. В донных отложениях этих озер содержание  $^{90}\text{Sr}$  практически одинаково, тогда как в воде оз. Травяное аккумулируется незначительная доля радионуклида в отличие от других водоемов. Это связано с высокой степенью эвтрофности оз. Травяное. В оз. М. Игиш распределение радионуклидов между илами и растениями практически одинаковое: водоем ультрапресный.

В совокупности гидробионтов рыбы являются наиболее радиочувствительным звеном (Nelson D.J., 1967; Chipman W.A., 1972). В связи с этим необходимо было выяснить зависимость величины накопления радионуклидов рыбой от общей радиоэкологической ситуации в исследованных водных экосистемах и выявить водоемы, которые характеризуются высоким уровнем радиоактивного загрязнения рыбы.

Значения средней удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в тушке рыб на примере карася серебряного приведены на рис. 17. При анализе результатов определения морфометрических параметров карася серебряного исследованных водоемов аномалий внешнего строения (фенодевиантов) не отмечено. Установлено уменьшение значений удельной активности радионуклидов в тушке карася серебряного от дистальной к периферийной зоне следа.



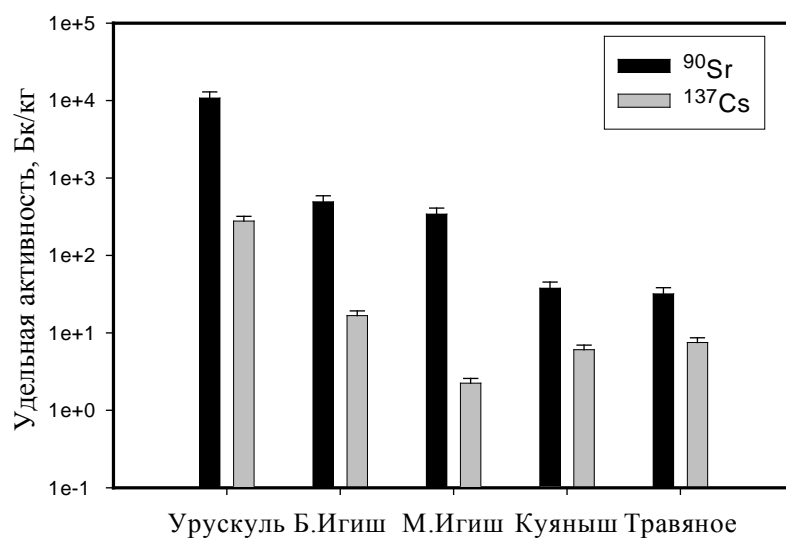


Рис. 17. Значения средней удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  (Бк/кг сырой массы) в тушке карася серебряного

Показано, что для карася серебряного КН  $^{90}\text{Sr}$  является видоспецифичной величиной и мало зависит от колебаний содержания радионуклида в воде водоема (рис. 18).

Озера, имеющие сходные значения минерализации (Б. Игиш, Куяныш), характеризуются близкими величинами КН  $^{90}\text{Sr}$  макрофитов и ихтиофауны. На оз. М. Игиш, относящемся к ультрапресным водоемам, процессы поглощения элементов-аналогов кальция, в том числе и  $^{90}\text{Sr}$  (значение КН в 6 раз выше, чем для других водоемов), протекают более интенсивно.

По радиоэкологическим оценкам (Марей А.Н. и др., 1980; Бакунов Н.А. и др., 1999), водоемы с малой минерализацией вод и низким содержанием в них кальция характеризуются высоким уровнем накопления  $^{90}\text{Sr}$ . Так, в диапазоне исследованных концентраций радионуклидов в воде рассматриваемых водоемов (рис. 18) отмечена обратная зависимость величин коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в тушке карася серебряного от содержания в воде элементов – макроаналогов радионуклидов (коэффициент корреляции Спирмена для пары  $^{90}\text{Sr} - \text{Ca}^{2+}$  равен - 0,5; а для пары  $^{137}\text{Cs} - \text{K}^+$  составляет - 0,6,  $p < 0,05$ ).

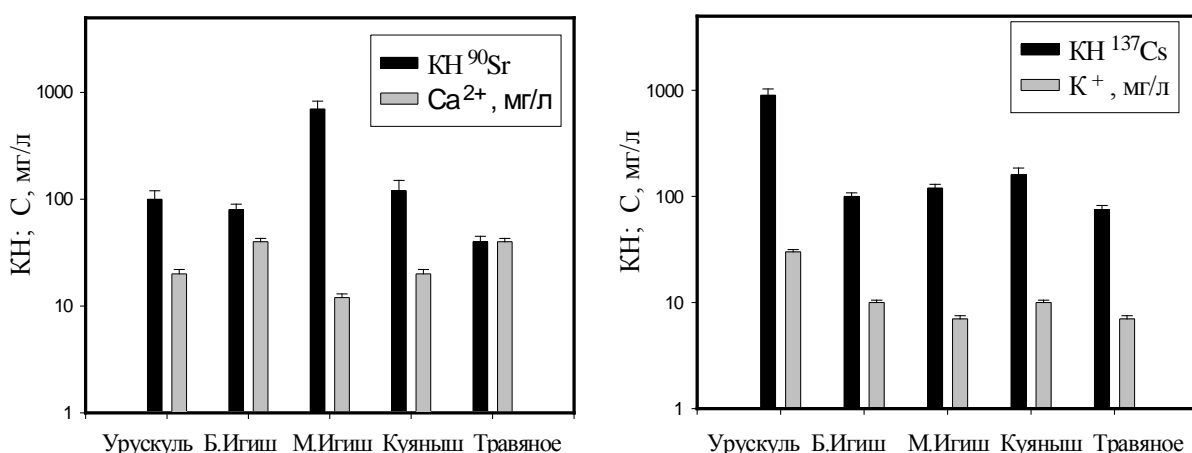


Рис. 18. Влияние содержания в воде макроэлементов – аналогов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) на величины коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  карасем серебряным (тушка, расчет на сырой вес)

Рассчитанные значения коэффициента дискриминации радионуклидов элементами – аналогами при поступлении их из воды в ткани рыб свидетельствуют о преимущественном поглощении рыбами в озерах Урускуль, Б. Игиш, М. Игиш, Куяныш, Травяное кальция и калия (среднее значение Кд Са –  $^{90}\text{Sr}$  составляет  $3,48 \pm 0,47$ ; Кд К –  $^{137}\text{Cs}$  составляет  $6,94 \pm 1,01$ ).

Содержание радионуклидов в тушке, мышцах и кости карася серебряного оценивалось, исходя из норм СанПиН (1999). Допустимый уровень содержания  $^{90}\text{Sr}$  для рыбной продукции составляет 100 Бк/кг сырой массы,  $^{137}\text{Cs}$  – 130 Бк/кг сырой массы. Допустимые уровни содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в пищевых продуктах обеспечивают не превышение предела дозы (ПД) 1мЗв и предела годового поступления (ПГП) при условии, что суточное поступление  $^{90}\text{Sr}$  с пищей не превышает 100 Бк/сут, а  $^{137}\text{Cs}$  – 210 Бк/сут. Для  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  было определено значение отношения (А/Н), где А – удельная активность радионуклида в тушке, мышцах, кости рыбы, Н – нормативное значение. Рыба годна к употреблению в пищу, если сумма (А/Н) содержащихся в тушке, мышцах, кости рыбы радионуклидов  $\leq 1$  (Смагин А.И. и др., 2002). Результаты определения относительных уровней загрязнения рыбы приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значение отношения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в карасе серебряном к допустимому уровню содержания (по СанПиН-99)

	Урускуль	Б. Игиш	М. Игиш	Куяныш	Травяное
Тушка	107,40	5,80	3,43	0,42	0,38
Мышцы	40,70	1,10	1,34	0,10	0,06
Кость	501,50	21,90	8,63	1,92	1,14

На исследованных водоемах ВУРСа рыбная ловля и рыборазведение в настоящее время возможны только на озерах Куяныш и Травяное. По содержанию  $^{90}\text{Sr}$  в тушке превышение нормы для рыбы в этих озерах не отмечено.

Итак, радиоэкологическая роль гидробионтов различных трофических уровней состоит в том, что, с одной стороны, депонирование и перевод радионуклидов ими из растворимого состояния в нерастворимое приводит к очистке воды, а с другой – накопление радионуклидов в гидробионтах, особенно в рыбе, служит источником их поступления к человеку. В связи с этим высшие водные растения и представители ихтиофауны являются важным звеном при осуществлении радиоэкологического мониторинга.

### **Особенности распределения радионуклидов $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ и микроэлементов почвами водосборных территорий на современном этапе развития озерных экосистем ВУРСа**

Важную роль в процессах аккумуляции, распределения и миграции радионуклидов в гидробиоценозах играют почвы водосборных территорий.

Для элювиальных элементов ландшафтов водосборных территорий исследованных озер характерен непромывной или периодически промывной режим. Такие условия могут быть приравнены к плакорам, вынос веществ с которых (в том числе  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ) затруднен.

Повышенное содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  наблюдается в слоях до 6-10 см от поверхности, которые соответствуют слоям наибольшей активности почвенной биоты и наибольшей концентрации гумуса в элювиальных элементах ландшафта (рис. 19). Отмечено, что для оз. Урускуль в слое 0-10 см содержится 77 %  $^{90}\text{Sr}$  и 95 %  $^{137}\text{Cs}$ , для почв водораздела между озерами Б. Игиш –

М. Игиш содержание  $^{90}\text{Sr}$  в данном слое составляет 72 %,  $^{137}\text{Cs}$  – 85 %, для почв элювиального элемента ландшафта оз. Куяныш содержание  $^{90}\text{Sr}$  – 80 %,  $^{137}\text{Cs}$  – 82 %.

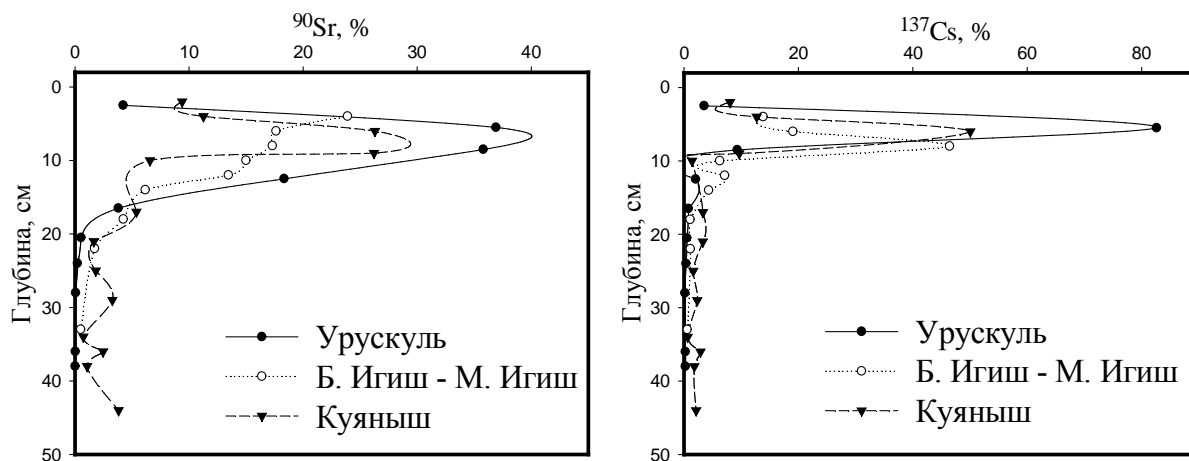


Рис. 19. Распределение (%)  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почве элювиальных ландшафтных элементов водосборов некоторых озер ВУРСа (2004 г.)

Выявленные закономерности распределения и аккумуляции радионуклидов в почвах элювиальных ландшафтных позиций можно считать типичными для однократного импактного загрязнения: максимум концентрации радионуклидов выражен в гумусированных горизонтах, вглубь, к материнской породе (горизонту С) происходит снижение на один или несколько порядков величины.

Для супераквальных элементов ландшафта водосборов исследованных озер характерно повышенное увлажнение. Их почвы имеют более высокий процент гумуса, нежели почвы элювиальных территорий. Сочетание промывного и выпотного режима увлажнения не только влияет на характер распределения радионуклидов по глубине, но и создает возможность их вымывания. Практически во всех почвенных элементах ландшафта наблюдается повышенное содержание  $^{90}\text{Sr}$  элювиальных позиций ландшафта по сравнению с супераквальными (табл. 6). Анализ характера распределения радионуклидов по профилю почвенных разрезов супераквальных позиций ландшафта водосборов озер показал, что пик максимального содержания  $^{90}\text{Sr}$  приходится на гумусовые горизонты почв, преимущественно на  $A_1$  (рис. 20).

Таблица 6

Значения плотности загрязнения участков почв водосборных территорий  
исследованных озер в слое 0-20 см, кБк/м<sup>2</sup> (2005 г.)

Озеро	Почвы супераквальных позиций ландшафта		Почвы элювиальных позиций ландшафта	
	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Урускуль	810,0±40,5	99,0±5,9	2299,1±114,9	69,2±4,2
Б. Игиш	51,0±2,5	8,8±0,5	133,0±6,7	8,3±0,5
М. Игиш	86,6±4,4	10,6±0,6		
Куяныш	2,3±0,1	2,8±0,6	4,3±0,2	4,6±0,2
Травяное	14,7±0,7	1,1±0,1	69,6±3,5	5,2±0,3
Шаблиш	8,6±0,4	2,9±0,2	36,8±1,8	5,1±0,3
Б.Боляш**	н/о*	н/о	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,02
Мисяш**	0,07 ± 0,02	0,03 ± 0,01	н/о	н/о

Примечание: \*н/о – не определено; \*\* - фоновые (контрольные) озера

Установлено, что в почвах супераквальных позиций ландшафта ближней зоны Следа <sup>90</sup>Sr сосредоточен в верхнем 10-сантиметровом слое (85 %).

Для аналогичных позиций почв дальней зоны наблюдается большее проникновение <sup>90</sup>Sr по профилю: более 80 % радионуклида находится в слое 0-20 см (рис. 20).

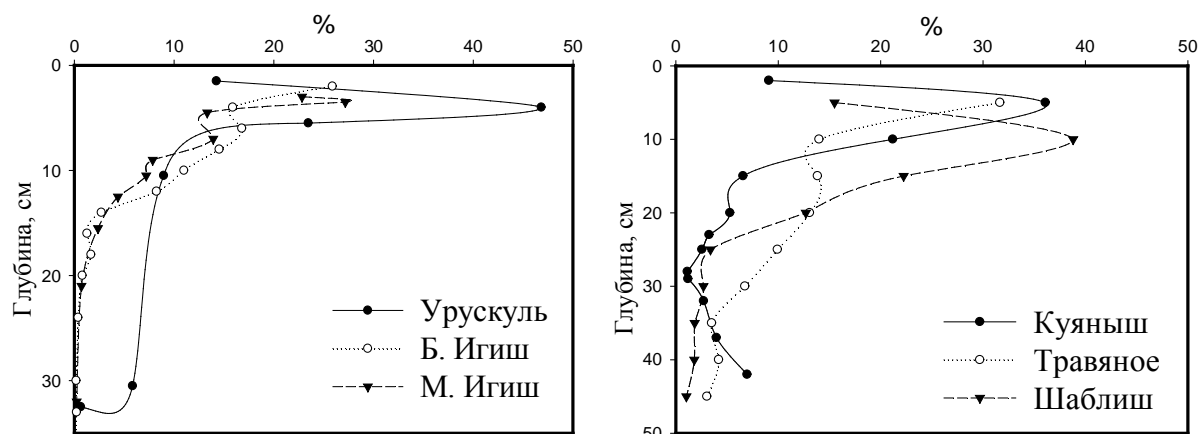


Рис. 20. Распределение (%) <sup>90</sup>Sr в почве супераквальных ландшафтных позиций (2004 г.)

Распределение радионуклидов в почве зависит от многих факторов, в частности, от их физико-химических форм. В качестве примера рассмотрены физико-химические формы нахождения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах супераквальных ландшафтных позиций водосборов озер Б. Игиш, М. Игиш и Урускуль (рис. 21). В почвах водосборной территории оз. Урускуль  $^{90}\text{Sr}$  находится в обменной форме в большем количестве (около 80 %), чем аналогичная форма для почв оз. Б. Игиш (59 %). В почвах оз. М. Игиш обменная форма  $^{90}\text{Sr}$  составляет 74 %. Изучение форм нахождения  $^{137}\text{Cs}$  показало, что значительная часть данного радионуклида находится в составе нерастворимого остатка (95 % для оз. Б. Игиш, 75 % для оз. Урускуль), а для оз. М. Игиш в составе органической фракции (59 %).

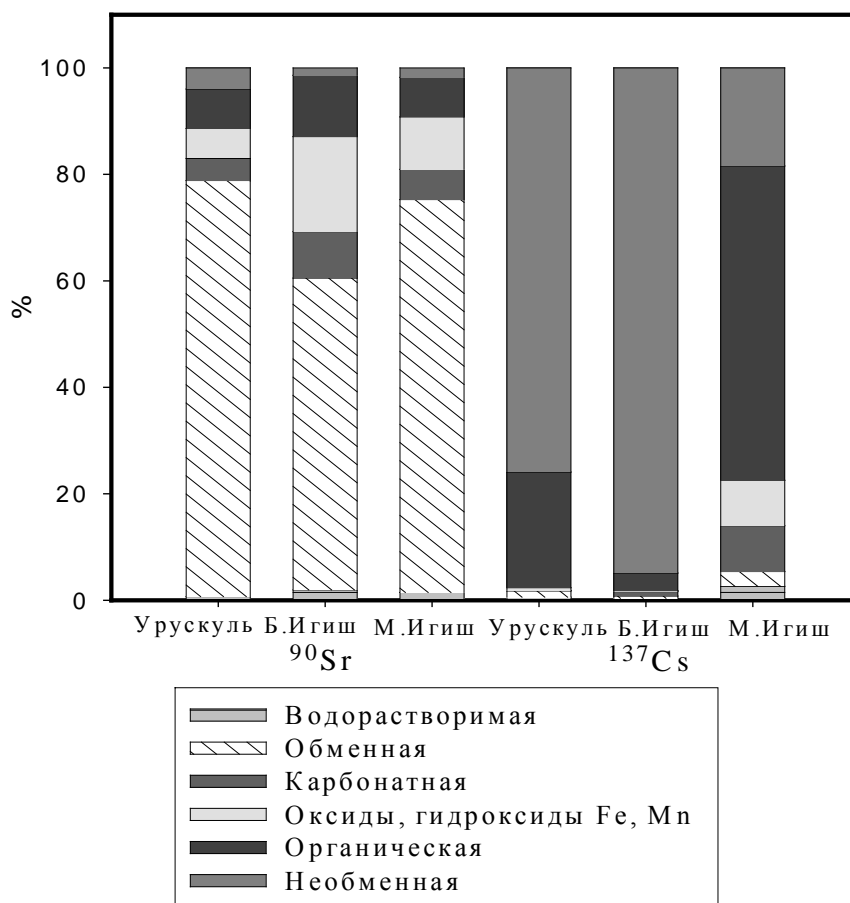


Рис. 21. Формы нахождения радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почвах супераквальной ландшафтной позиции водосбора озер Урускуль, Б. Игиш и М. Игиш

Определено, что величина соотношения  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в воде, донных отложениях, почве супераквальных и элювиальных элементов ландшафта водосборных территорий исследованных озерных экосистем снижается по мере удаления от источника взрыва (табл. 7). Это обусловлено обогащением выпавшей смеси  $^{137}\text{Cs}$  в результате фракционирования, дополнительным переносом радионуклида с оз. Карачай в 1967 г., физико-химическими свойствами радионуклидов, а также особенностями самоочищения рассматриваемых озер ВУРСа.

Рассчитанные значения соотношения  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  практически одного порядка для почв и донных отложений исследованных озер. Исключение составляет оз. М. Игиш, в котором  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в донных грунтах находится в пределах 1-2, а, например, в почве супераквальной позиции –  $18,9 \pm 4,4$ . Плотность загрязнения донных отложений оз. М. Игиша не превышает  $7,4 \text{ кБк/м}^2$ , что совпадает с аналогичными величинами в озерах Куяныш и Шаблиш. Таким образом, первоначальный уровень загрязнения данного водоема был небольшим, кроме того, оз. М. Игиш – ультрапресное озеро. Исключение составляет также оз. Травяное, что связано с его большой эвтрофностью.

Таблица 7

Соотношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в воде, илах и почве водосборных территорий

Озеро	Вода	Донные отложения	Почва	
			супераквальная позиция	элювиальная позиция
Урускуль	$321,9 \pm 48,2$	$31,0 \pm 3,7$	$43,8 \pm 27,1$	$110,8 \pm 43,8$
Б. Игиш	$152,5 \pm 22,8$	$10,0 \pm 1,9$	$7,9 \pm 0,4$	$28,1 \pm 5,8$
М. Игиш	$25,5 \pm 3,6$	$1,5 \pm 0,2$	$18,9 \pm 4,4$	
Куяныш	$6,5 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,5$
Травяное	$48,0 \pm 6,7$	$7,0 \pm 0,8$	$17,5 \pm 5,9$	$17,6 \pm 4,7$
Шаблиш	$11,0 \pm 2,0$	$1,5 \pm 0,2$	$3,3 \pm 0,6$	$12,0 \pm 2,9$

Исследованные почвы по содержанию тяжелых металлов не относятся к токсичным. По результатам определения форм нахождения меди, цинка и

кадмия в супераквальных элементах ландшафта водосборов озер Урускуль, Б. Игиш и Шаблиш выявлено, что данные металлы играют незначительную роль в техногенном загрязнении территории.

На основе данного исследования определено, что практически во всех почвенных элементах ландшафта (за исключением территории водосбора оз. Травяное), наблюдается большее обогащение  $^{90}\text{Sr}$  элювиальных позиций ландшафта по сравнению с супераквальными.

## ВЫВОДЫ

1. Общие закономерности процессов миграции и аккумуляции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в исследованных озерных экосистемах ВУРСа (Урускуль, Б. Игиш, М. Игиш, Куяныш, Травяное, Шаблиш) определяются гидрологическими особенностями исследованных гидробиоценозов: геоморфологическими особенностями котловин озер и водосборной территории; гипсометрическим положением; соотношением площадей зеркала озера и водосбора; минерализацией водной массы; степенью трофности водоема; физико-химическими свойствами и формами нахождения радионуклидов.
2. Зависимость снижения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде со времени после аварии 1957 г. носит экспоненциальный характер. Период полураспада воды в отдаленный поставарийный период составил 12-17 лет. Кратность очищения воды от  $^{90}\text{Sr}$  для оз. Шаблиш с 1957 по 2005 гг. составила 20, для озер М. Игиш и Травяное – 588 и 833. Величина кратности очищения по  $^{137}\text{Cs}$  для озер Шаблиш, Куяныш и Травяное – 7, 18 и 1330. Высокие значения кратности очищения установлены для водоемов сильной степени эвтрофности, какими являются озера Травяное и М. Игиш. Немаловажную роль играет также неопределенность исходных уровней загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  воды озерных экосистем.
3. Плотность загрязнения донных отложений позволяет подразделить исследованные водоемы на две группы: озера со средней плотностью по  $^{90}\text{Sr}$  60 кБк/м<sup>2</sup> (1,5 Ки/км<sup>2</sup>) и озера со средней плотностью загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  7 кБк/м<sup>2</sup> (0,2 Ки/км<sup>2</sup>). Плотность загрязнения дон-



ных отложений  $^{137}\text{Cs}$  в данных озерах практически одинакова и не превышает  $7 \text{ кБк/м}^2$  ( $0,2 \text{ Ки/км}^2$ ).

В верхнем слое илов (0-10 см) озер Б. Игиш, Травяное сосредоточено около 40 % радионуклидов, тогда как в водоемах Шаблиш и Куяныш в том же слое находится от 60 до 90 % суммарной активности в исследованной колонке, что обусловлено внесением органического вещества в ранний поставарийный период (Б. Игиш, Травяное), а также различными соотношениями форм нахождения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

4. Низкое содержание микроэлементов (Fe, Ni, Cd, Pb, Mn, Co, Cu, Zn) в водной массе и донных отложениях исследованных озер, включая контрольные водоемы, свидетельствует об отсутствии антропогенного загрязнения этими элементами.
5. Соотношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в воде, донных отложениях и почвах водосборных территорий уменьшается с увеличением расстояния от места взрыва, что обусловлено обогащением выпавшей смеси  $^{137}\text{Cs}$  по мере удаления от источника взрыва, дополнительным переносом радионуклида с оз. Карачай в 1967 г., физико-химическими формами радионуклидов, а также особенностями самоочищения исследованных озер ВУРСа.
6. Максимальные значения удельной активности и КН  $^{90}\text{Sr}$  характерны для рдеста блестящего и телореза обыкновенного большинства исследованных озер. Высокий уровень содержания  $^{137}\text{Cs}$  отмечен у водокраса лягушачьего ( $106 \pm 16 \text{ Бк/кг}$  сухого веса) и урути мутовчатой ( $108 \pm 16 \text{ Бк/кг}$  сухого веса). Наибольшие значения КН  $^{137}\text{Cs}$  выявлены у водокраса лягушачьего и горца земноводного, что позволяет рассматривать их в качестве референтных при организации радиационного биомониторинга.
7. Выявлено, что озера, характеризующиеся сходными значениями минерализации (Б. Игиш, Куяныш), обладают близкими величинами КН  $^{90}\text{Sr}$  макрофитов и ихтиофауны. На оз. М. Игиш, относящемся к ультрапресным водоемам, интенсифицируются процессы поглощения элементов-аналогов кальция, в том числе  $^{90}\text{Sr}$ . Выявлено обратное влияние содержания в воде элементов – макроаналогов ( $\text{Ca}^{2+}$  и

K<sup>+</sup>) на величины коэффициента накопления <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в тушке карася серебряного.

8. Установлено, что <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в почвенных разрезах сосредоточены в основном в слое 0-10 см от поверхности, который соответствует наибольшей активности почвенной биоты и наибольшей концентрации гумуса в элювиальных элементах ландшафта водосборных территорий исследованных озер.

В почвенных элементах ландшафта наблюдается большее обогащение <sup>90</sup>Sr участков элювиальных позиций по сравнению с супераквальными.

Определено, что обменные формы <sup>90</sup>Sr в супераквальных позициях водосборных территорий озер Урускуль, Б. Игиш и М. Игиш составляют 60-80 %, тогда как значительное количество <sup>137</sup>Cs (75-95 %) находится в прочносвязанной форме.

9. Определены современные запасы <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в основных компонентах изученных озерных экосистем ВУРСа в пределах Челябинской области. Показано, что наибольшее количество радионуклидов содержится в донных отложениях водоемов, кроме озер Травяное и М. Игиш. Водные растения оз. Травяное накапливают значительное количество радионуклидов, так как данный водоем является озером сильной степени эвтрофности. Современные запасы <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в илах и макрофитах ультрапресного оз. М. Игиш практически одинаковые.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, рекомендуемых ВАК РФ

1. **Левина С.Г.**, Попова И.Я., Захаров С.Г., Удачин В.Н., Шибкова Д.З., Трапезников А.В., Дерягин В.В., Трапезникова В.Н. Гидрохимические особенности распределения <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в озерных геосистемах осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Российский химический журнал (Журнал российского химического

- общества им. Д.И. Менделеева). – 2004. – т. XLVIII. – № 2. – С. 94 – 98.
2. **Левина С.Г.**, Попова И.Я., Захаров С.Г., Дерягин В.В., Шибкова Д.З. Современное радиационное состояние экосистемы озера Большой Игиш, расположенного на осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2005. – т.45. – № 1. – С. 96 – 99.
  3. **Левина С.Г.**, Земерова З.П. Распределение радионуклидов по основным компонентам пресноводных экосистем // Вестник ЧГПУ. Серия 4. Естественные науки. – Челябинск: Изд-во ЧГПУ. – 2005. – №7. – С. 31 – 66.
  4. **Левина С.Г.**, Шибкова Д.З., Дерягин В.В., Захаров С.Г., Попова И.Я. Современное радиоэкологическое состояние озера Малый Игиш, расположенного на осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – т. 46. – № 1. – С. 111 – 116.
  5. **Левина С.Г.**, Земерова З.П., Шибкова Д.З., Дерягин В.В., Попова И.Я.  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в высших водных растениях некоторых водоемов Восточно-Уральского радиоактивного следа: видоспецифичность концентрирования // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – т. 46. – №5. – С. 597 – 604.
  6. Дерягин В.В., **Левина С.Г.**, Шибкова Д.З., Попова И.Я., Захаров С.Г. Особенности миграции и формы нахождения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях некоторых озерных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – т. 46. – №5. – С. 533 – 539.
  7. **Левина С.Г.**, Аклеев А.В., Дерягин В.В., Попова И.Я., Лихачев С.Ф., Шибкова Д.З., Захаров С.Г., Сутягин А.А., Корман Г.Г. Содержание и распределение долгоживущих радионуклидов в донных отложениях озер Большой и Малый Игиш, расположенных в средней части ВУРСа // Вопросы радиационной безопасности. – 2007. – Спец. выпуск. – С. 20-31.

### Статьи в других научных журналах и сборниках

8. Zakharov S.G., Zemerova Z.P., **Levina S.G.**, Deryagin V.V., Shibkova D.Z. Components of the East-Ural radioactive trace // South-Russian Bulletin of geology, geography and global energy/ Scientific and technical journal. – 2004. – №3 (9). – vol. 2. – P. 231 – 234.
9. **Левина С.Г.**, Шибкова Д.З., Земерова З.П., Дерягин В.В., Попова И.Я. Состояние компонентов биоты озер Восточно-Уральского радиоактивного следа (на примере озер М. Игиш, Б. Игиш и Куяныш) // Проблемы радиэкологии и пограничных дисциплин. – Екатеринбург. – 2006. – Вып.8. – С. 309 – 323.
10. **Левина С.Г.**, Попова И.Я., Захаров С.Г., Удачин В.Н., Дерягин В.В. Радиэкологические и гидрохимические аспекты поведения искусственных радионуклидов в водных экосистемах на примере озер Восточно-Уральского радиоактивного следа (озера Урускуль, Б. Игиш, Б. Сунгуль) // Проблемы радиэкологии и пограничных дисциплин. – Екатеринбург. – 2005. – Вып. 6. – С. 375 – 392.
11. Захаров С.Г., Дерягин В.В., **Левина С.Г.** Формирование гидрохимического режима озер переходной зоны Зауральского пенеблена Среднего Урала (на примере озер Травяное, Червяное, Б. Сунгуль) // Проблемы радиэкологии и пограничных дисциплин. – Екатеринбург. – 2005. – Вып.7. – С. 332 – 344.
12. Костюченко В.А., Голдырев С.Б., Попова И.Я., Перемыслова Л.М., Аклеев А.В., Пряхин Е.А., Дерябина Л.В., **Левина С.Г.** Радиэкологическое состояние озер, расположенных на периферии Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вопросы радиационной безопасности, ВУРС-45. – Озерск. – 2002. – С. 39 – 49.
13. Захаров С.Г., Дерягин В.В., **Левина С.Г.** Пространственное распределение радионуклидов аварии 1957 г. в компонентах озерных геосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа // Геоэкология и природопользование / Труды XII съезда Русского географического общества. – СПб. – Т.4. – 2005. – С. 193 – 197.

### Материалы научных конференций

14. **Левина С.Г., Захаров С.Г., Дерягин В.В., Аклеев А.В., Шибкова Д.З.** Современное радиоэкологическое состояние некоторых озер ВУРСа Среднего Урала // XIII Международный симпозиум «Международный год воды-2003» (Австрия, 29 марта – 05 апреля 2003 г.): Тезисы докладов. – М. – 2003. – С.116 – 119.
15. **Левина С.Г., Захаров С.Г., Дерягин В.В., Шибкова Д.З.** Медико-экологические аспекты хозяйственного использования озер, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Медико-экологическая безопасность, реабилитация и защита населения (XV Международный симпозиум, Италия 20-27 марта 2004 г.). Тезисы докладов. – М.: Комитет по экологии Гос. Думы РФ РАЕН РАМН, Академия мед. наук Украины. – 2004. – С. 71 – 74.
16. **Levina S.G., Zemerova Z.P., Oberemok T.A., Shibkova D.Z.** Contents of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in higher aquatic plants of the EURT zone // Chronic radiation exposure: Biological and health effects, Book of abstracts, the III International Symposium, October 24-26, 2005. – Chelyabinsk. – 2005. – P. 122 – 123.
17. **Deryagin V.V., Levina S.G., Popova I.Y., Shibkova D.Z., Zakharov S.G.** Distribution and physical-chemical forms of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  observed in the components of a number of lake ecosystemson the East-Urals radioactive trace// Chronic radiation exposure: Biological and health effects, Book of abstracts, the III International Symposium, October 24-26, 2005. – Chelyabinsk. – 2005. – P. 117 – 118.
18. **Дерягин В.В., Шибкова Д.З., Левина С.Г., Захаров С.Г., Попова И.Я.** Донные отложения озер Большой и Малый Игиш, расположенных в зоне ВУРСа // XI международный экологический симпозиум «Урал атомный, Урал промышленный». Труды симпозиума на русском и английском языках. – Екатеринбург. – 2005. – С. 32 – 33.
19. **Левина С.Г., Земерова З.П., Дерягин В.В., Захаров С.Г.** Содержание некоторых токсикантов в экосистемах озер Б. Игиш, Шаблиш, Куяныш Челябинской области // Адаптация биологических систем к ес-

- тественным и экстремальным факторам среды: материалы I Международной научно-практической конференции 9-11 октября 2006 г. / науч. ред. Д.З. Шибкова. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та. – 2006. – С. 160 – 164.
20. **Левина С.Г.**, Шибкова Д.З., Дерягин В.В., Захаров С.Г., Земерова З.П., Попова И.Я. Радиоэкологическое исследование некоторых озер осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа на территории Челябинской области // Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды: материалы I Международной научно-практической конференции 9-11 октября 2006 г. / науч. ред. Д.З. Шибкова. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та. – 2006. – С. 34 – 38.
21. **Левина С.Г.**, Шибкова Д.З., Аклеев А.В., Дерягин В.В., Удачин В.Н., Захаров С.Г., Земерова З.П. Радиоэкологические и гидрохимические аспекты поведения искусственных радионуклидов в водных экосистемах на примере озер Восточно-Уральского радиоактивного следа (озера Урускуль, Б. Игиш, М. Игиш) // Тезисы докладов V съезда по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность), Москва, 10-14 апреля 2006 г. – Москва: Фотон век. – 2006. – т. II. – С. 117.
22. **Левина С.Г.**, Земерова З.П. Современная оценка химического состава воды озера Б. Игиш, расположенного в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа // Теоретическая и экспериментальная химия. Материалы II международной научно-практической конференции 16-17 сентября 2004 г. – Караганда. – 2004. – С. 6 – 9.
23. Захаров С.Г., Дерягин В.В., **Левина С.Г.**, Шибкова Д.З., Земерова З.П., Оберемок Т.А. Географические аспекты распределения радионуклидов в озерах Восточно-Уральского радиоактивного следа // Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды: Материалы Всероссийской научной конференции 11-15 октября 2004 г. – Челябинск: Изд-во ЧГПУ. – 2004. – С. 272-279.

24. **Левина С.Г.**, Попова И.Я., Дерягин В.В., Захаров С.Г. Характеристика некоторых озерных геосистем осевой части ВУРСа по концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  // Актуальные проблемы регионального экологического мониторинга: теория, методика, практика: Сб. материалов Всероссийской научной школы (г. Киров, 16-18 ноября 2004 г.). – Киров. – 2004. – Вып. 2 – С. 170 – 171.
25. **Левина С.Г.**, Земерова З.П., Шибкова Д.З., Оберемок Т.А. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в высших водных растениях водоемов зоны Кыштымской радиационной аварии 1957 г. // Современные аспекты экологии и экологического образования. Материалы Всероссийской конференции. 19-23 сентября 2005 г. – Казань. – 2005. – С. 248–250.
26. **Левина С.Г.**, Земерова З.П., Попова И.Я., Шибкова Д.З. Оценка уровня загрязнения радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  некоторых компонентов озерных экосистем Травяное, Куяныш, Шаблиш // Проблемы экологии, экологического образования и просвещения в Челябинской области. Материалы докладов по итогам VI региональной научно-практической конференции 18 апреля 2002 г. – Челябинск. – 2004. – С. 34 – 35.
27. Шибкова Д.З., Андреева О.Г., Ефимова Н.В., **Левина С.Г.** Гигиенические, дозиметрические и медико-биологические аспекты отдаленных эффектов хронического облучения // Труды и материалы юбилейной научной конференции (Южно-Уральский институт биофизики), апрель 2003 г. – Озерск. – 2003. – С. 181 – 182.
28. Захаров С.Г., **Левина С.Г.**, Дерягин В.В. Динамика изменения удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде озер Восточно-Уральского радиоактивного следа // Проблемы экологии, экологического образования и просвещения в Челябинской области: Тезисы VII регион. науч.-практ. конф. 9 декабря 2004 г. – Челябинск: Изд-во ГОУ ВПО «ЧГПУ» – 2004. – С. 29 – 31.
29. Захаров С.Г., Дерягин В.В., **Левина С.Г.** Современное радиоэкологическое состояние озер Большой и Малый Игиш // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: Материалы региональ-

- ной науч.-практ. конф. (6-8 апр. 2004). – Челябинск. – 2004. – С. 77 – 81.
30. Шибкова Д.З., **Левина С.Г.**, Дерягин В.В., Захаров С.Г., Земерова З.П. Динамика содержания стронция-90 в компонентах некоторых водоемов дальней зоны ВУРСа // Экологическая политика в обеспечении устойчивого развития Челябинской области: Материалы Межрегион. науч.-практ. конференция, Челябинск, 7-8 дек. 2005 г. – Челябинск: ЧелГУ. – 2005. – С. 170 – 172.
31. Земерова З.П., **Левина С.Г.**, Шибкова Д.З. Радиозэкологическое состояние озер Травяное, Куяныш, Шаблиш (территория Восточно-Уральского радиоактивного следа) // Экология и научно-технический прогресс: материалы III международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь. – 2005. – С. 55 – 59.
32. Земерова З.П., Шибкова Д.З., **Левина С.Г.** Накопление радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  гидробионтами озер Б. Игиш, М. Игиш, Куяныш (Восточно-Уральский радиоактивный след) // Материалы международной научной конференции «Проблемы биологии, экологии и образования: история и современность» 22-24 мая 2006 г. – СПб. – 2006. – С. 163 – 165.
33. Захаров С.Г., Дерягин В.В., **Левина С.Г.** Формирование геосистемы озера Малый Игиш // Материалы конференции по итогам научно-исследовательских работ преподавателей и научных сотрудников ЧГПУ за 2002 г. – Челябинск: Изд-во ЧГПУ. – 2003. – С. 171 – 173.