

*На правах рукописи*

Усягина Ирина Сергеевна

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПУТИ МИГРАЦИЙ ИСКУССТВЕННЫХ  
РАДИОНУКЛИДОВ В ЭКОСИСТЕМЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Специальность 25.00.28 - Океанология

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Мурманск - 2012

Работа выполнена  
в Федеральном государственном учреждении науки  
Мурманском морском биологическом институте  
Кольского научного центра Российской академии наук (ММБИ КНЦ РАН)

|                                   |                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Научный<br/>руководитель:</b>  | <b>Матишов Дмитрий Геннадьевич</b><br>доктор географических наук,<br>член-корреспондент РАН                                                          |
| <b>Официальные<br/>оппоненты:</b> | <b>Бердников Сергей Владимирович</b><br>доктор географических наук, профессор<br><br><b>Никитин Александр Иванович</b><br>доктор географических наук |
| <b>Ведущая<br/>организация:</b>   | ФГУП НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»                                                                                                        |

Защита состоится 12 декабря 2012 г. в 10:30  
на заседании диссертационного совета Д 002.140.01 при ММБИ КНЦ РАН, по  
адресу: 183010 г. Мурманск, ул. Владимирская, 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ММБИ КНЦ РАН.

Автореферат разослан 12 ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук

Е.Э. Кириллова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Баренцево море оказалось одним из центров применения атомных технологий во второй половине XX века. Испытания ядерного оружия, захоронения жидких и твердых радиоактивных отходов российским атомным флотом были основными факторами, повлиявшими на содержание радионуклидов в водоеме в 1950-х - 1960-х гг. (Aarkrog, 1994; Факты и проблемы..., 1993; Сивинцев и др., 2005; Кваша и др., 2001). С 1970-х г. главными причинами загрязнения стали глобальные атмосферные выпадения (АМАП, 1998; Strand et al., 1997; Gao et. al., 2004; Bossew et. al., 2007; Радиационная..., 2009), трансокеанический перенос сброшенных в Ирландское море отходов западноевропейских радиохимических предприятий (Preston et al., 1978; Kaut-sky, Murray, 1981; Kershaw, Baxter, 1995; Cross-Boder..., 1995; Arctic..., 2009) и вынос искусственных радионуклидов с речным стоком (Chumichov, 1995; Радиационная..., 1995; Bakunov et. al., 2002).

Основные радиоэкологические наблюдения в Баренцевом море в 1950-е - 1970-е годы проводились Полярным научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича (ПИНРО), Мурманским Управлением Гидрометеослужбы, НПО "Тайфун", Радиевым институтом им. В. Г. Хлопина, НИЦ «Курчатовский институт». Однако в научной литературе того времени встречаются немногочисленные данные о воздействии влияния слабых радиоактивных загрязнений на морские биообъекты Баренцева моря (Федоров и др., 1964; Килеженко, Подымахин, 1964; Влияние ионизирующей радиации..., 1971).

В 1982 г. НПО «Тайфун» был собран обширный материал о содержании искусственных радионуклидов в водах и донных отложениях морей Евро-Арктического региона (Вакуловский и др., 1985; Katrich, 1993). Начиная с 1991 г., после появления в научной печати рассекреченных и систематизированных данных о сбросах и захоронении радиоактивных отходов в арктических и дальневосточных морях (Факты и проблемы..., 1993) было проведено большое количество отечественных и зарубежных радиоэкологических экспедиций, результатами которых стали многочисленные публикации (Матишов и др., 1995; Strand et al., 1992; Szczypa et al., 1992; Carroll et al., 1996; Nies et al., 1998; Rissanen et al., 1998; Stepanets et al., 1999 и др.). Произведены оценки возможных последствий различных сценариев аварий, связанных с выходом искусственных радионуклидов от захороненных объектов в морскую среду (A Survey..., 1992; Radioactive..., 1994; Kryshev, Sasykina, 1995; Dumping..., 1996; Намятов, 1998).

В 1990-х гг. ММБИ совместно с польскими (Люблинский университет) и финскими (Агентство по радиационной и ядерной безопасности, STUK) коллегами изучали морские и наземные экосистемы Баренцево-Карского региона (Матишов Г.Г. и др., 1994). Проведены радиоэкологические наблюдения мест захоронений в Новоземельском желобе (Ivanov, 1995). ММБИ

и коллегами из норвежских исследовательских институтов NIVA и Akvaplan-Niva и NRPA выполнено детальное описание загрязнения донных отложений Печорского моря и оценены примерные даты поступления антропогенных изотопов в бассейн (Smith et al., 1995). Изучено содержание плутония в донных отложениях, рыбах и водорослях Баренцева моря (Ikaheimonen et al., 1995; Rissanen et al., 1997). Подобные работы проводились ПИНРО (Плотицина, 1997) и Бергенским институтом морских исследований, Норвегия (Foyn et al., 1995). Итоги радиоэкологических исследований Баренцева моря подведены в монографии (Матишов, Матишов, 2001). В ней дана оценка радиационного загрязнения компонентов экосистем арктических морей от начала испытаний ядерного оружия до 2000 г.

В 2000-х гг. российские и зарубежные ученые (Степанец и др., 2005; Иванов, 2006; Никитин, 2009; Матишов и др., 2009, 2011; Brown et al., 2002; Haldal et al., 2003; Zaborska et al., 2007, 2010; Gwynn et al., 2012 и др.) повсеместно обнаруживали низкие концентрации долгоживущих радиоизотопов в среде Баренцева моря. После периода интенсивного загрязнения водоема становятся актуальными исследования формирования современного фона и круговорота радионуклидов в Баренцевом море.

#### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования выбрано Баренцево море, выделяющееся среди морей Западной Арктики наиболее высоким рыбопромышленным потенциалом. Воды бассейна загрязняются радиоактивными элементами с начала испытаний атомного оружия по настоящее время. Накопление и миграция радионуклидов в компонентах морской экосистемы представляет интерес при изучении угроз для морской биоты и рисков для населения при использовании рыбных ресурсов. В соответствии с этим предмет исследований - динамика активности долгоживущих радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , характеристики баланса и модель их миграции в баренцевоморской экосистеме.

#### **Степень разработанности проблемы**

Большинство радиоэкологических наблюдений в Баренцевом море выполнено в 1990-х гг. В настоящее время количество исследований сократилось. Изучено содержание антропогенных радионуклидов в компонентах экосистемы, оценивались потоки на отдельных участках Баренцева моря, однако оценка общего баланса для моря в целом не проводилась. В последние десятилетия с усовершенствованием приборной базы и накоплением информации происходит сближение оценок радиоэкологического состояния баренцевоморской экосистемы, данных разными авторами. Это позволяет выявить современные тенденции и закономерности изменения содержания радионуклидов в водоеме.

#### **Цель и задачи работы**

**Цель:** охарактеризовать современные уровни содержания и закономерности распределения радионуклидов в среде и биоте Баренцева моря

и изучить тенденции изменений потоков  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в экосистеме с 1960 по 2009 гг.

**Для реализации поставленной цели необходимо выполнение ряда задач:**

1. оценить концентрации антропогенных радионуклидов в воде, донных отложениях и гидробионтах побережья и открытых частей Баренцева моря с 2000 по 2010 гг.;
2. дать обзор многолетней изменчивости загрязненности искусственными радионуклидами среды и биоты изучаемой акватории;
3. реконструировать удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в массовых видах гидробионтов с начала испытаний ядерного оружия (1960-е г.) по настоящее время (2009 г.);
4. на основе анализа имеющейся информации по радиоактивному загрязнению

Баренцева моря реконструировать многолетние абиогенные и биогенные миграционные потоки  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в баренцевоморской экосистеме.

#### **Методическая база исследований**

**Для определения концентраций радионуклидов в пробах использованы:**

- $\gamma$ -спектрометрический метод измерения  $^{137}\text{Cs}$  в пробах среды и биоты;
- методика выполнения измерений  $^{90}\text{Sr}$  (по методу Черенкова с радиохимическим концентрированием дочернего радионуклида  $^{90}\text{Y}$ );
- методика исследования адсорбции  $^{90}\text{Sr}$  на взвеси.

**Для расчета миграционных потоков  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  использованы методы математического моделирования:**

- годовые балансы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  рассчитывались в соответствии с данными о водообмене Баренцева моря (Потанин, Турчанинов, 1983);
- расчет концентраций радионуклидов в гидробионтах Баренцева моря выполнен с помощью математической модели миграции радионуклидов по пищевым цепям (Бердников, 2004).

**Теоретическая база исследования** основана на работах отечественных и зарубежных авторов в следующих областях:

- общая физико-географическая характеристика баренцевоморской экосистемы (Добровольский А.Д., Залогин Б.С., Матишов Г.Г., Дженюк В.В., Денисов В.В. и др.)
- биотическая структура экосистемы (Долгов А.В.; Дробышева В.М.; Зенкевич Л.А., Камшилов М.М., Коржев В.А.; Матишов Г.Г.; Ярагина Н.А.; Blanchard J. и др.)
- формирование радиационного фона в море (Айбулатов А.С.; Вакуловский В.М.; Виноградов А.П.; Егоров В.И.; Израэль Ю.А., Кузнецов Ю. В., Матишов Г.Г.; Матишов Д.Г.; Никитин А.И.; Поликарпов Г.Г.; Сивинцев Ю. В.; Цыбань А.В.; Яблоков А.В. и др.)
- особенности радиоактивного загрязнения биоты Баренцева моря (Матишов Г.Г.; Матишов Д.Г.; Крышев А.В.; Кузнецов Ю.В.; Aarkrog A.;

Andersen S.S.; Brown M.; Brungot A.; Carroll J.; Fisher, N.S.; Heldal, H.E.; Kautsky N.; Kumblad L.; Rissanen K. и др.)

**Эмпирическая база исследования.** В основу диссертации положены результаты комплексных радиоэкологических исследований экосистемы Баренцева моря, полученные в ходе экспедиционной деятельности Мурманского морского биологического института в период 2000-2011 гг. и данные литературных источников.

**Личный вклад автора.** Автор участвовал в экспедиционном сборе проб и проводил  $\gamma$ -спектрометрический анализ материалов исследований. Произвел систематизацию и обобщение полученных и литературных данных. Раздел работы по математическому моделированию реконструкции уровней содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в среде и морских организмах выполнен в соавторстве с сотрудниками Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН.

**Научная новизна.**

- выполнена оценка состояния фона искусственных радионуклидов в Баренцевом море в 2000-2010 гг.
- произведена реконструкция уровней содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в рыбах (мойва, сельдь, сайка, окунь, камбалы, зубатки, пикша, палтус, треска, сайда) и донных организмах (амфиподы, иглокожие) экосистемы Баренцева моря с 1962 по 2009 гг.;
- впервые на основании систематизации многолетних данных наблюдений восстановлена структура потоков  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцевом море с атмосферными осадками и водными массами с 1960 по 2009 гг.;
- рассчитан баланс и определен объем накопления радионуклидов в компонентах экосистемы Баренцева моря за период с начала испытаний ядерного оружия по настоящее время.

**Теоретическая и практическая значимость.** Сведения, полученные в ходе исследований, являются вкладом в изучение закономерностей изменчивости радиоактивного загрязнения Баренцева моря в период с 1960-го по 2010-й год.

На основании материала многолетних исследований впервые получено целостное представление о составляющих радиоизотопного баланса  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в экосистеме Баренцева моря. Определено, что основными океанологическими факторами формирования фона радионуклидов в среде являются атмосферный перенос и циркуляция водных масс.

На практике полученные данные о распределении радионуклидов в компонентах баренцевоморской экосистемы могут использоваться при организации радиационного мониторинга морей Евро-арктического региона, проведении эколого-географических экспертиз, планировании и управлении программами устойчивого развития регионов. Математическая модель баланса радионуклидов в Баренцевом море позволяет прогнозировать последствия аварийного поступления изотопов в водоем.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационное исследование соответствует п. 8. «Закономерности переноса вещества и энергии в океане»; п. 11. «Антропогенные воздействия на экосистемы Мирового океана» паспорта специальности 25.00.28 — «Океанология».

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях: молодых ученых Мурманского морского биологического института (Мурманск, 2002–2006 гг.); программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» (г. Москва, 2004 г); V съезде по радиационным исследованиям (г. Москва, 2006 г.); «Большие морские экосистемы России в эпоху глобальных изменений (климат, ресурсы, управление)» (г. Ростов-на-Дону, 2007); International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (Norway, Bergen, 2008); «Природа шельфа и архипелагов Европейской Арктики» (г. Мурманск, 2010); «Природа морской Арктики: современные вызовы и роль науки», (г. Мурманск, 2010); «Радіобіологічні та радіоекологічні аспекти Чорнобильської катастрофи» (г. Славутич, 2011).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 - в изданиях по списку ВАК и 3 - в коллективных монографиях.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация изложена на 210 стр. машинописного текста, содержит 25 таблиц, 43 рисунка. Работа состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, 2-х глав собственных исследований, заключения, приложения и списка литературы, который включает 262 наименования, из них 99 иностранных.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность за помощь и ценные советы при подготовке диссертации научному руководителю чл.-корр. РАН Д.Г. Матишову, директору ММБИ КНЦ РАН академику Г.Г. Матишову, сотрудникам лабораторий и коллегам за помощь в сборе и обработке материала: к.г.н. Г.В. Ильину, к.г.н. Д.В. Моисееву, к.х.н. Н.Е. Касаткиной, Е.В. Павельской, Е.В. Расхожевой.

### **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

1. Исследование современного спектра и активности радионуклидов в абиотической и биотической составляющих экосистемы свидетельствует об устойчивой тенденции к снижению уровня радиоактивного загрязнения Баренцева моря в начале XXI века.
2. В Баренцевом море главными факторами, формирующими радиационный фон, являются атмосферный перенос (в 1950-1960 гг. и 1986 г.) и адвекция с течениями через западные границы моря (1970-2009 гг.).
3. С 1950 по 2009 гг. из различных источников в Баренцево море поступило  $37.4 \cdot 10^3$  ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и  $24.8 \cdot 10^3$  ТБк  $^{90}\text{Sr}$ . Вынесено с водными массами

преимущественно через северные и северо-восточные границы  $26.3 \cdot 10^3$  ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и  $19.6 \cdot 10^3$  ТБк  $^{90}\text{Sr}$ .

4. Основное количество  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцевом море содержится в абиотической компоненте.

### **III. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** приведена общая физико-географическая характеристика объекта исследования, включая описание биотической структуры баренцевоморской экосистемы, а также анализ основных факторов, формирующих фон и миграции искусственных радионуклидов в среде.

В описание Баренцева моря включены общие морфологические и гидрологические особенности, схема циркуляции вод в Баренцевом море, отражающая накопленный опыт различных исследователей (Матишов и др., 2010), характеристика геологической среды. Границы объекта исследования рассмотрены как с географической точки зрения (Атлас океанов, 1980; Добровольский, Залогин, 1982; Гидрометеорология, 1990), так и с современных позиций теории Больших морских экосистем (Комплексные, 2011). Приведены пространственно-временные характеристики изменчивости температуры и солености, особенности формирования пресноводного стока и классификация водных масс Баренцева моря.

В подразделе 1.2 «**Биотическая структура экосистемы**» анализируются отечественные и зарубежные исследования трофической структуры Баренцева моря (Кормовые..., 1990; Эволюция..., 1994; Коржев., Долгов, 1999; Blanchard et al, 2002; Wassmann et al, 2006; Yaragina, Dolgov, 2009; Комплексные..., 2011) для использования в целях радиоэкологического моделирования.

В подразделе 1.3 «**Главные факторы формирования фона и миграций искусственных радионуклидов в среде**» рассмотрены оценки поступления изотопов от источников в разные периоды истории радиоактивного загрязнения Баренцева моря. Приводятся особенности миграции радионуклидов в водоеме. Дана характеристика особенностей поглощения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  взвесью и морскими осадками, в зависимости от их минералогического состава. Рассмотрено значение процессов адсорбции в перераспределении активности изотопов в море. Описаны закономерности аккумуляции радионуклидов гидробионтами, учитывающие их передачу по пищевой цепи. Лишь в немногих публикациях, посвященных исследованию накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  морскими гидробионтами, учитываются изменения концентраций радионуклидов на разных трофических уровнях пищевых цепей (Матишов, Матишов, 2001; Carroll et al., 2002; Haldal et al., 2003). Выполнен обзор моделей передачи радионуклидов по пищевым цепям в морских экосистемах (Haldal et al., 2001; Kumbad, Kautsky, 2006; Brown et al., 2006; Крышев, 2008).

**Во второй главе** приводятся методики отбора, подготовки проб и измерения активности радионуклидов в счетном образце, статистическая оценка погрешностей измерений и расчетов. Измерения активности

выполнены в лаборатории ММБИ, имеющей аттестат аккредитации № САРК. RU.0001.442096.

Материалы получены в ходе экспедиций Мурманского морского биологического института в открытые части Баренцева моря на НИС «Дальние Зеленцы» (2000 г., 2006-2011 гг.), ледоколах «Капитан Николаев» (2007-2008 гг.), «Россия» (2009 г.) и «Ямал» (2011 г.), и в прибрежные зоны в рамках ежегодных береговых исследований губ и заливов Кольского полуострова (2005-2011 гг.).

Количество проб компонентов экосистемы Баренцева моря, используемых в настоящей работе (2000-2011 гг.): поверхностных морских вод - 139; донных отложений - 261; биоты - 260; аэрозолей - 4.

В подразделе 2.3 «**Методы исследователей**» приводятся основные принципы отбора, подготовки проб и измерения активности у-излучающих радионуклидов и  $^{90}\text{Sr}$  в пробах среды и биоты.

**Измерения активности  $\gamma$ -излучающих радионуклидов** проводили на сертифицированной  $\gamma$ -спектрометрической установке фирмы Canberra. В состав установки входят полупроводниковый детектор из чистого германия, портативный криостат, цифровой многоканальный анализатор InSpector-2000, свинцовая защита. Для обработки спектров использовано базовое спектрометрическое программное обеспечение Genie-2000. Измерение активности радионуклидов в счетных образцах с энергией  $\gamma$ -квантов от 50 до 3000 кэВ проводилось по аттестованной методике.

**Предварительную пробоподготовку и измерение  $^{90}\text{Sr}$**  проводили по аттестованной методике радиохимического анализа почв, донных осадков растительности, водорослей, донных животных. Радиохимическая подготовка проб основана на кислотном выщелачивании с последующим многостадийным осаждением для получения раствора содержащего  $^{90}\text{Sr}$  без примесей радионуклидов. Удельная активность радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в пробе определялась посредством измерения активности дочернего  $^{90}\text{Y}$  с помощью  $\beta$ -радиометра «LS-6500» фирмы Wesman Coulter по методу Черенкова.

**Процессы адсорбции  $^{90}\text{Sr}$  на взвеси** Баренцева моря исследовали в соответствии с объемным методом адсорбционных измерений (Лопаткин, 1983). В результате опытов получили коэффициенты распределения ( $K_d$ )  $^{90}\text{Sr}$  (отношение активности взвеси Бк/г к активности раствора Бк/см<sup>3</sup>) в зависимости от времени адсорбции и солености воды.

**В третьей главе** раскрыты результаты предшествующих в историческом плане и современных исследований содержания радионуклидов в среде и биоте Баренцева моря.

В подразделе 3.1 «**Многолетняя характеристика фона радионуклидов**» обсуждаются закономерности многолетних изменений содержания радионуклидов в компонентах экосистемы Баренцева моря.

Изменения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в водах Баренцева моря (рис. 1) с периода максимального загрязнения (1979 г.), обусловленного выбросами

западноевропейских радиохимических заводов, по настоящее время (2009 г.), описываются экспоненциальными кривыми (для  $^{137}\text{Cs}$   $y = 49.823e^{-0.115x}$ ,  $R^2 = 0.9362$ ; для  $^{90}\text{Sr}$   $y = 12.758e^{-0.0578x}$ ,  $R^2 = 0.7832$ ), где  $x$  - количество лет, прошедших после максимума загрязнения. Время, за которое происходит уменьшение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в 2 раза, в Баренцевом море составляет 6 лет.

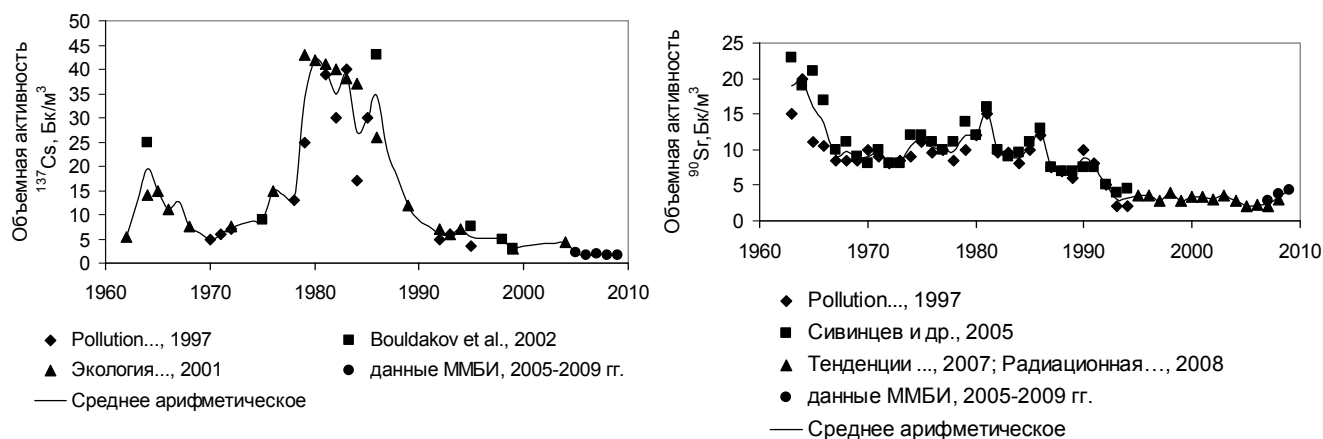


Рис.1. Многолетняя динамика среднегодовых концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в водах Баренцева моря

Полученное значение хорошо согласуется с данными по Черному морю после аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.). В среднем, с 1987 г. по 1995 г. в открытых водах и с 1987 г. по 2000 г. в прибрежных водах Черного моря уменьшение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в два раза осуществлялось за 5.6 и 5.9 лет соответственно (Егоров et al, 1999; Егоров и др., 2000). Для сравнения отметим, что данная величина для вод открытой части Азовского моря с 1986 г. по 2000 г. составляла 2.7 года (Среда..., 2001; Структура..., 2004).

Период времени, за которое происходит уменьшение в два раза концентраций  $^{90}\text{Sr}$  в водах Баренцева моря, составляет 12.0 лет, что в 2.5 - 3 раза выше этого показателя в 1987 - 2000 гг. в Черном (4.0 года) и Азовском (4.8 лет) морях (Егоров и др., 2000; Среда..., 2001; Структура..., 2004).

Изотопный состав и удельная активность искусственных радионуклидов в *донных отложениях* Баренцева моря стали предметом изучения в 1980-1990 гг.. Особенности миграции и накопления  $^{137}\text{Cs}$  определяются минералогическим составом осадков. Изменение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в осадках с 1982 г. по 2009 г. удовлетворительно описывается экспоненциальной кривой ( $y=8.1211e^{-0.078x}$ ,  $R^2=0.575$ ). Количество многолетних данных об удельных активностях  $^{90}\text{Sr}$  в осадках ограничены, по имеющимся данным за 2006-2009 гг. концентрации оставались на одном уровне.

Динамику содержания радионуклидов в рыбах прослеживали по треске. Изменения концентраций изотопов в треске с периода максимального загрязнения ихтиофауны (1981 г.) по настоящее время (2011 г.) описываются экспоненциальными кривыми (для  $^{137}\text{Cs}$   $y = 2.7909e^{-0.1004x}$ ,  $R^2=0.8859$ ; для  $^{90}\text{Sr}$   $y = 12.758e^{-0.0578x}$ ,  $R^2=0.7832$ ).

$= 2.525e^{-0.0857x}$ ,  $R^2=0.7998$ ). Периоды уменьшения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в два раза - 6.9 и 8.1 лет, соответственно.

Изменения средних годовых активностей радионуклидов в *фукусовых водорослях* в 1990-2010 гг., описываются экспоненциальными кривыми (для  $^{137}\text{Cs}$   $y = 0.957e^{-0.1158x}$ ,  $R^2=0.7752$ ; для  $^{90}\text{Sr}$   $y = 0.5821e^{-0.1324x}$ ,  $R^2=0.9821$ ). Периоды снижения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в два раза в макрофитах сем. *Fucaceae* составляют 6.0 и 5.2 лет. Полученные результаты согласуются с данными по черноморской водоросли *Cystoseira crinita* в период с 1987 по 2000 гг. Время уменьшения удельных активностей в два раза для *Cystoseira crinita* составляли 4.4 года для  $^{137}\text{Cs}$  и 4.0 лет для  $^{90}\text{Sr}$  (Егоров и др., 2000)

В подразделе 3.2 «Современная радиационная обстановка в Баренцевом море» приводится характеристика загрязнения экосистемы долгоживущими радионуклидами, выполненная по результатам морских и береговых экспедиций в период с 2000 по 2010 г. Обсуждаются особенности распределения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в водах, донных отложениях и биоте Баренцева моря.

В морской воде  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  встречаются практически повсюду. Объемные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  составляли, Бк/м<sup>3</sup>: на границе Баренцева моря с Норвежским 1.2 и 5.1; по линии разреза мыс Святой нос - мыс Канин нос 2.0 и 6.5; в районе Новоземельских проливов 2.0 и 3.0; в водах по линии разреза арх. Шпицберген - Земля Франца-Иосифа 1.0-2.1 и 2.4; по линии разреза арх. Земля Франца-Иосифа - Новая Земля 1.5 - 2.8 и 1.5.

Выпадения радионуклидов с атмосферными осадками оценивали по радиоактивному загрязнению снежного покрова. Интегральные за зимний период пробы снега отбирались в весенний период в районах прибрежных поселков Лиинахамари и Мишуково. Объемная активность  $^{137}\text{Cs}$  в атмосферных осадках составляла около 0.2 Бк/м<sup>3</sup>,  $^{90}\text{Sr}$  - 0.8 Бк/м<sup>3</sup>.

В донных отложениях Баренцева моря  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  распространены повсеместно. Концентрации радионуклидов зависят от гранулометрического состава осадков, топографии дна и гидродинамического режима. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в районах возвышенностей и банок шельфа варьирует в диапазоне 0.2 -1.8 Бк/кг, желобов и впадин - до 6 Бк/кг. В глинистых отложениях, покрывающих дно Центральной впадины (глубина 300-380 м), присутствует около 9 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$  и 0.8 Бк/кг  $^{90}\text{Sr}$ . Очаги более высокого загрязнения осадков  $^{137}\text{Cs}$  обнаружены в некоторых небольших участках побережья Кольского залива: акватории Мурманского порта (14.9-26.5 Бк/м<sup>3</sup>) и губе Оленья (12.9 Бк/м<sup>3</sup>).

Динамика накопления изотопов в рыбах отражает историю поступления радиоактивных веществ в водную среду. Промысловые виды рыб, выловленные в районе Мурманского мелководья в 2000-2001 гг. содержали  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  0.2-и 0.01-2.5 Бк/кг. В 2006-2010 гг. уровни загрязнения мышечной ткани  $^{137}\text{Cs}$  и костной ткани  $^{90}\text{Sr}$  в промысловых рыбах Баренцева моря составляли 0.1-0.9 Бк/кг, что значительно ниже допустимых в Российской Федерации величин содержания этих радионуклидов в рыбе для  $^{137}\text{Cs}$  - 130 Бк/кг, для  $^{90}\text{Sr}$  - 100

Бк/кг (СанПиН 2.3.2.1078-01). Полученные данные сопоставимы с результатами работ зарубежных исследователей, которые обнаружили менее 1 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$  в рыбах из Норвежского и Баренцева (западная часть) морей (Norway's ..., 2006).

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани рыб изменялось в последовательности: морской окунь > камбала-ерш > зубатка полосатая > пикша > треска. Виды рыб, жизнедеятельность которых связана с морским дном, имеют более высокие уровни содержания радиоактивного цезия.

Последовательность изменения концентраций  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани рыб имеет вид: треска > пикша > камбала-ерш > морской окунь > зубатка полосатая. Всеядные виды накапливают больше радионуклида по сравнению с остальными.

В период 2000 - 2010 гг. удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в водорослях сем. Fucaceae варьировала в диапазоне 0.04-0.84,  $^{90}\text{Sr}$  — 0.01 - 0.4 Бк/кг. Радиоактивное загрязнение водорослей сем. Laminariaceae было выше - 0.3 - 2.3 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$  и 0.4 - 1.5 Бк/кг  $^{90}\text{Sr}$ .

Исследование радиоактивного загрязнения одного из массовых видов **бентосных организмов** побережья - моллюска *Mytilus edulis* показало, что удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мягких тканях и раковинах мидий из разных районов побережья (Кольский залив, губы Печенга, Зеленецкая и Ура) независимо от размера, а соответственно и возраста особей была ниже минимально детектируемой активности (МДА). Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в раковинах также была низкой (0.3-1.9 Бк/кг сухой массы). Сезонных изменений содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мягких тканях и в раковинах и  $^{90}\text{Sr}$  в раковинах мидий не обнаружено.

В подразделе 3.3 «**Формирование современных экологических угроз для морских экосистем Евро-Арктического бассейна**» рассмотрены данные по распространению радиоактивных примесей в аэрозолях после аварии на АЭС «Фукусима-1». Предпосылкой проведения работ было обнаружение в марте-апреле 2011 г. в высокоширотных областях Европы (арх. Шпицберген, Кольский п-ов) изотопов, типичных для выбросов японской АЭС. Сравнение данных 2000-х гг. с 2011 г. показало, что изотопный состав проб среды и биоты и активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в побережье и открытых частях Баренцева моря остаются в пределах показателей устойчивого фона, формируемого глобальным круговоротом радионуклидов. Радионуклиды, по которым можно было бы надежно идентифицировать «след» аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1», в исследованных пробах отсутствовали.

В четвертой главе «**Реконструкция поступления и миграции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в экосистеме Баренцева моря в период 1960-х - 2000-х годов**» описываются:

- радиоизотопный баланс;
- оценки концентраций радионуклидов в гидробионтах Баренцева моря;
- динамика содержания радионуклидов в основных компонентах баренцевоморской экосистемы.

В подразделе 4.1 «Радиоизотопный баланс» с помощью построения балансовой математической модели обобщен большой объем накопленной информации о пространственно-временном распределении радионуклидов в Баренцевом море.

**Модель радиоизотопного баланса.** Основные элементы годового баланса радионуклидов рассчитывались как произведение средних арифметических значений концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , обнаруженных в районе границ Баренцева моря с сопредельными районами, на величины результирующего водообмена через эту границу.

В оценках водного баланса Баренцева моря до настоящего времени существует большая неопределенность. Водообмен на западной границе, где результирующий перенос направлен из Норвежского моря в Баренцево, рассчитанный в разные годы с использованием динамического метода В.К. Агеноровым, В.П. Новицким, Н.С. Ураловым, В.П. Кудло, В.Н. Морецким, С.И. Степановым и другими авторами, может составлять от 49 до 74 тыс. км<sup>3</sup>/год. В.Н. Морецкий и С.И. Степанов отмечали слабую сезонную и довольно значительную межгодовую изменчивость объема переноса вод на разрезе м. Нордкап - о-в Шпицберген. Результирующий поток, направленный из Белого моря в Баренцево, достоверно оценен В.М. Альтшулером и другими авторами в 230 км<sup>3</sup>/год, что соответствует пресноводному балансу Белого моря. Слабо изучены количественные оценки водообмена на северной и северо-восточной границах моря. В.П. Новицкий (Новицкий, 1961) выявил очень небольшие значения приходной и расходной составляющих в слое 0-200 м на разрезах м. Желания - о-в Сальм и о-в Виктория - о-в Земля Александры (5-10 тыс. км<sup>3</sup> в год). Из-за малого количества натурных данных водообмен через северные проливы оценен как ориентировочный (Гидрометеорология, 1990).

Наиболее полная информация о водообмене Баренцева моря с сопредельными акваториями представлена В.А. Потаниным с соавторами (Потанин, Турчанинов, 1983), где приближенный водный баланс рассчитан по скоростям течений на пограничных и внутренних разрезах моря с использованием многолетних данных океанологических наблюдений.

Таким образом, из-за большой изменчивости расходов воды на пограничных разрезах и несинхронности учитываемых в балансовых расчетах периодов наблюдений добиться абсолютной сбалансированности бюджета «вход» и «выход» из бассейна не представляется возможным. Разницу между суммой прихода и расхода объема воды, составляющую 1.9 % от общего поступления вод в Баренцево море, следует признать весьма строгой оценкой, пригодной для оценки баланса радионуклидов.

Уравнение радиоизотопного баланса  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцевом море может быть записано следующим образом:

$$\Delta q = q_{\text{атм}} + q_{\text{Норв}} + q_{\text{Бел}} + q_{\text{реки}} + q_{\text{ЖРО}} - q_{\text{прол}} - q_{\text{Шп-ЗФИ}} - q_{\text{ЗФИ-НЗ}} - q_{\text{расп}} \quad (1)$$

где  $\Delta q$  – изменение запаса радионуклидов в море;  $q_{\text{атм}}$  – количество радионуклидов, поступающих с атмосферными осадками;  $q_{\text{реки}}$  – количество

радионуклидов, поступающих с речными водами (р. Печора, реки Кольского полуострова и Норвегии);  $q_{Норв}$ ,  $q_{Бел}$  – количества радионуклидов, поступающих из смежных водоемов: из Норвежского моря (граница мыс Нордкап – мыс Зюйдкап) и Белого морей (граница мыс Святой Нос – мыс Канин Нос), соответственно;  $q_{ЖРО}$  – количество радионуклидов, поступающих при сливе жидких радиоактивных отходов (ЖРО);  $q_{прол}$ ,  $q_{Шп-ЗФИ}$ ,  $q_{ЗФИ-НЗ}$  – количества радионуклидов, вытекающих в смежные водоемы: через Новоземельские проливы (Карские ворота, Югорский Шар, Маточкин Шар), через водные границы Шпицберген – Земля Франца-Иосифа и Земля Франца-Иосифа – Новая Земля;  $q_{расп}$  – количество радионуклидов, подвергшихся радиоактивному распаду.

В данных расчетах в качестве доминирующего процесса переноса радионуклидов рассматривается только перенос водными массами.

Для решения уравнения (1) необходимы ежегодные данные о составляющих водного баланса Баренцева моря с 1950 г. и значения средних концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  во всех его составляющих. Недостаточная обеспеченность данными не позволяет рассчитать баланс за каждый год, поэтому рассчитывали годовой баланс по данным, осредненным за десятилетний период. Отдельно рассчитан годовой баланс для 1986 г.

Водообмен Баренцева моря с сопредельными районами принят постоянным: поступление через границу мыс Нордкап-остров Шпицберген -  $53131 \text{ км}^3/\text{год}$ ; через границу мыс Святой Нос-мыс Канин Нос -  $231 \text{ км}^3/\text{год}$ ; речной сток -  $189 \text{ км}^3/\text{год}$ ; сток через Новоземельские проливы -  $22205 \text{ км}^3/\text{год}$ ; сток через границу Шпицберген-Земля Франца-Иосифа -  $13218 \text{ км}^3/\text{год}$  и сток через границу Земля Франца-Иосифа-Новая Земля -  $17130 \text{ км}^3/\text{год}$  (Потанин, Турчанинов, 1983).

Значения средних концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на границах Баренцева моря в период 1960-2009 гг. получены на основе обобщения и осреднения данных литературы (Матишов, Матишов, 2001; Сивинцев и др., 2005; Aliev et. al., 2007; Wedekind et al., 1997), а также результатов радиоэкологических исследований ММБИ (2000-2009 гг.). Используемые в расчетах концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в водных массах Баренцева моря представлены на рис. 2; динамика поступления радионуклидов из атмосферы - в табл. 1.

Оценка поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцево море с речными водами основана на имеющихся данных о концентрациях радионуклида в реках европейской территории России (Радиационная..., 1994; Bakunov et. al., 2002; Радиационная..., 2009). При отсутствии в литературе измеренных значений  $^{137}\text{Cs}$  в реках его концентрации рассчитывали исходя из известного для речных вод соотношения  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ , составляющего 10 (Бочков, 1983).

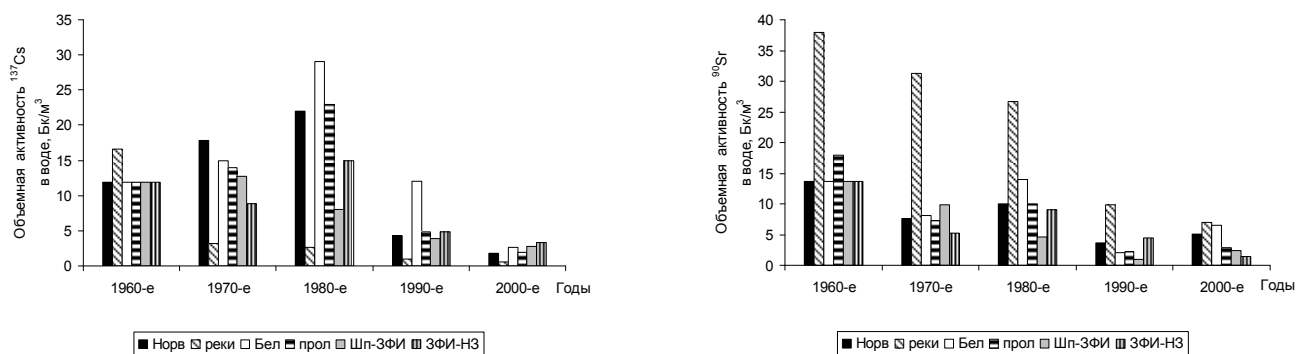


Рис. 2 Средние годовые концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в воде на границах Баренцева моря в 1960-2009 гг.

Таблица 1

Динамика годового поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на поверхность Баренцева моря из атмосферы, Бк/(м<sup>2</sup>·год)

| Годы              | 1950–<br>1959 | 1960–<br>1969 | 1970–<br>1979 | 1980–<br>1989* | 1986* | 1990–<br>1999 | 2000–<br>2009 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------|---------------|---------------|
| $^{137}\text{Cs}$ | 111.5         | 207.3         | 28.1          | 3.8            | 702.3 | 1             | 0.1           |
| $^{90}\text{Sr}$  | 68.1          | 124.1         | 12.4          | 3.6            | 9.6   | 0.3           | 0.1           |

\* Данные для этого периода рассчитаны без учета 1986 г.

Потоки искусственных радионуклидов из атмосферы рассчитывали как произведение годового количества осадков, выпавших на площадь зеркала Баренцева моря 1438.4 тыс. км<sup>2</sup> (Добровольский, Залогин, 1982) на плотность выпадений (Бк/(м<sup>2</sup>·год)  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (Gao et. al., 2004; Сивинцев и др., 2005; Радиационная..., 2009) с учетом того, что количество выпадающих осадков уменьшается по мере удаления от материка.

Оценки поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из ЖРО выполнены на основе данных о ежегодных (1959-1992 гг.) сбросах отходов в Баренцево море (Сивинцев и др., 2005). При этом считали, что на момент затопления активность отходов соответствует «типовой» смеси радионуклидов: 50 %  $^{60}\text{Co}$ , 25 %  $^{90}\text{Sr}$ , 25 %  $^{137}\text{Cs}$  (Кваша и др., 2001).

Результаты расчетов годового баланса  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцевом море приведены в табл. 2. Выполнить достоверную оценку баланса радионуклидов в 1950-е гг. не представляется возможным. Для этого периода оценено только поступление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с атмосферными выпадениями и выведение за счет радиоактивного распада.

*Атмосферные выпадения.* Максимумы выпадений искусственных радионуклидов на площадь Баренцева моря наблюдались в 1960-е гг. и 1986 г. (табл. 2) как следствие испытаний ядерного оружия и аварии на Чернобыльской АЭС.

В 1963 г. выпадения  $^{137}\text{Cs}$  с атмосферными осадками достигали 1050 ТБк,  $^{90}\text{Sr}$  - 630 ТБк. В 1986 г. зафиксированы значительные выпадения  $^{137}\text{Cs}$ , достигающие 1010 ТБк/год. С 1950-х гг. до 1986 г. отношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в осадках, выпавших на акваторию Баренцева моря, составляло 0.4-0.6, что характерно для

выпадений, обусловленных ядерными испытаниями (Bossew et al, 2007) Отношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в 1986 г. уменьшилось до 0.014. С 1987 по настоящее время атмосферный поток радионуклидов постоянно снижается. К 1990-м гг. отношение  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  в осадках повысилось до 0.3. В 2000-е гг. атмосферный поток  $^{90}\text{Sr}$  превышает  $^{137}\text{Cs}$  в 2 раза.

*Речной сток.* Средние концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в реках Севера Европейской части Российской Федерации снизились с 38 Бк/м<sup>3</sup> в 1960-е гг. до 8 Бк/м<sup>3</sup> в настоящее время, а  $^{137}\text{Cs}$  с 17 Бк/м<sup>3</sup> до 0.6 Бк/м<sup>3</sup>. В 1960-2009 гг. вклад речного стока (%) в общее поступление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцево море был незначительным и варьировал в диапазоне 0.02 - 0.3 и 0.5 - 1.3, соответственно. В 2000-2009 гг. этот показатель составлял 0.1 % для  $^{137}\text{Cs}$  и 0.5 % для  $^{90}\text{Sr}$ .

*Поступление из Норвежского моря.* Несмотря на множество ядерных испытаний, проведенных в 1950-1960-х гг. разными странами, объемная активность вод Баренцева моря была невысокой. Повышение активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  происходило в 1975 г. и в 1980 г., что было обусловлено сбросами западноевропейских заводов по переработке ядерных материалов. Большая часть радионуклидов, сброшенных в Ирландское море заводом Селлафильда (например, около 1200 ТБк в 1970 г. и 5230 ТБк в 1975 г.) приносилась с Нордкапским течением в Баренцево море через 4-5 лет (Kershaw, Baxter, 1995). С 1990-х гг. по настоящее время выбросы рассматриваемых радионуклидов заводом в Селлафильде значительно сократились (Arctic..., 2009).

Поступление из Норвежского моря с 1970-х по 2000-е гг. остается основным источником искусственных радионуклидов в Баренцево море (табл. 2). До 1990-х гг. поступление  $^{137}\text{Cs}$  через западную границу моря превышало поступление  $^{90}\text{Sr}$ , в 2000-х гг. наблюдается обратный процесс.

*Сливы ЖРО.* Во второй половине XX века сливы ЖРО в Баренцево море осуществлялись в пределах пяти специально выделенных районов, дополнительно некоторое количество ЖРО попало в морскую среду в результате аварийных ситуаций. По последним оценкам (Сивинцев и др., 2005), всего в Баренцево море сброшено ЖРО общей активностью около 650 ТБк. В целом, вклад этого источника загрязнения по сравнению с поступлением из Норвежского моря в общий приход радионуклидов незначителен (табл. 2).

Согласно результатам расчетов основные расходные потоки радионуклидов направлены из Баренцева моря в Карское. В разные периоды через проливы Маточкин шар, Югорский шар и Карские ворота вместе с водными массами в Карское море поступало от 44.4-510.7 ТБк/год  $^{137}\text{Cs}$  и 50.0-399.7 ТБк/год  $^{90}\text{Sr}$ . До 1990-х гг. в годовом балансе  $^{137}\text{Cs}$  приход превышал расход, с 1990-х по настоящее время наблюдается обратный процесс. С 1960-х гг. по настоящее время в балансе  $^{90}\text{Sr}$  приход превышал расход. В последнее десятилетие годовой приходный поток  $^{90}\text{Sr}$  превышает расходный примерно вдвое.

Таблица 2

Среднегодовые балансы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в процессе водного обмена  
в Баренцевом море, ТБк/год

| Годы              | Приход    |            |           |            |           | Расход     |              |              |            | $\Delta q$ |
|-------------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|--------------|--------------|------------|------------|
|                   | $q_{атм}$ | $q_{Норв}$ | $q_{Бел}$ | $q_{реки}$ | $q_{ЖРО}$ | $q_{прол}$ | $q_{Шт-ЗФИ}$ | $q_{ЗФИ-НЗ}$ | $q_{расп}$ |            |
| $^{137}\text{Cs}$ |           |            |           |            |           |            |              |              |            |            |
| 1950–1959         | 160.4     | —          | —         | —          | —         | —          | —            | —            | 3.6        | 156.8      |
| 1960–1969         | 298.2     | 630.9      | 2.7       | 3.1        | 2.0       | 263.7      | 157.0        | 203.4        | 21.3       | 291.7      |
| 1970–1979         | 40.4      | 944.6      | 3.5       | 0.6        | 12.0      | 311.2      | 168.5        | 150.7        | 22.7       | 347.7      |
| 1980–1989*        | 5.5       | 1171.2     | 6.7       | 0.5        | 10.8      | 510.7      | 105.7        | 257.0        | 27.1       | 293.1      |
| 1986              | 1010.1    | 1370.8     | 6.7       | 0.5        | 1.1       | 510.7      | 105.7        | 257.0        | 54.3       | 1461.5     |
| 1990–1999         | 1.5       | 229.8      | 2.8       | 0.2        | 0.3       | 107.3      | 51.2         | 83.1         | 5.3        | -12.3      |
| 2000–2009         | 0.1       | 98.3       | 0.6       | 0.1        | 0.0       | 44.4       | 36.1         | 57.7         | 2.3        | -41.4      |
| $^{90}\text{Sr}$  |           |            |           |            |           |            |              |              |            |            |
| 1950–1959         | 98.0      | —          | —         | —          | —         | —          | —            | —            | 2.3        | 95.7       |
| 1960–1969         | 178.5     | 728.7      | 3.2       | 7.2        | 2.0       | 399.7      | 181.3        | 234.9        | 21.7       | 81.9       |
| 1970–1979         | 17.9      | 400.6      | 1.9       | 5.9        | 12.0      | 161.1      | 130.5        | 89.1         | 10.3       | 47.1       |
| 1980–1989*        | 5.1       | 531.3      | 3.2       | 5.0        | 10.8      | 222.1      | 60.3         | 154.2        | 13.1       | 105.9      |
| 1986              | 13.7      | 531.3      | 3.2       | 5.2        | 1.1       | 222.1      | 60.3         | 154.2        | 13.1       | 104.9      |
| 1990–1999         | 0.4       | 193.9      | 0.5       | 1.9        | 0.3       | 50.0       | 13.2         | 76.3         | 4.7        | 52.9       |
| 2000–2009         | 0.2       | 271.0      | 1.5       | 1.3        | 0.0       | 64.4       | 31.7         | 25.7         | 6.5        | 145.7      |

Потоки  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , адсорбированных на взвеси в пределах водных границ Баренцева моря были рассчитаны с учетом: концентраций взвеси (Айбулатов, 2000); объемов вод (Потанин, Турчанинов, 1983); коэффициентов распределения ( $K_d$ ) для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ ; удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностных водах (табл. 3).

Таблица 3

Количество взвеси в водах на границах Баренцева моря

| Элементы годовых балансов                               | Объем воды, тыс. км <sup>3</sup> /год | Концентрация взвеси, мг/л | Рассчитанное количество взвеси в водах, млн. т/год |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| Поступление через границу м. Нордкап - о-в Шпицберген*  | 53                                    | 0.5*                      | 26.6                                               |
| Речной транспорт**                                      | 0.19                                  | 1.0**                     | 0.2                                                |
| Поступление через границу м. Святой нос - м. Канин Нос* | 0.23                                  | 0.6*                      | 0.1                                                |
| Сток через Новоземельские проливы                       | 22                                    | 0.4*                      | 8.9                                                |

|                                                                 |    |      |     |
|-----------------------------------------------------------------|----|------|-----|
| (Маточкин Шар, Карские ворота. Югорский Шар)*                   |    |      |     |
| Сток через границу о-в Шпицберген - о-ва Земли Франца-Иосифа*   | 13 | 0.1* | 1.3 |
| Сток через границу о-ва Земли Франца-Иосифа - о-ва Новая Земля* | 17 | 0.1* | 1.7 |

Айбулатов, 2000; \*\* Герасимова, 2004 г.

Коэффициент распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  между взвесью и морской водой был рассчитан по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  во взвеси, отобранной из ловушки, установленной в прибрежной зоне Баренцева моря (губа Зеленецкая, Дальний пляж) в период с октября 2007 г. по июль 2008 г..  $K_d$   $^{137}\text{Cs}$  для морской воды составляет  $4 \cdot 10^3$  при  $A(^{137}\text{Cs})$  взвеси = 4 Бк/кг и  $A(^{137}\text{Cs})$  морской воды = 1 Бк/м<sup>3</sup>, для пресной -  $2 \cdot 10^4$  при значении  $A(^{137}\text{Cs})$  пресной воды = 0.02 Бк/м<sup>3</sup>. Полученные результаты согласуются с данными (Sediment..., 2004).

$K_d$  ( $^{90}\text{Sr}$ ) между взвесью и морской водой получен экспериментальным путем, так как масса пробы взвеси, отобранной из ловушки не достаточна для радиохимического анализа.  $K_d$  ( $^{90}\text{Sr}$ ) составил 4 для морской воды (34‰) и 348 для пресной (0‰), что согласуется с литературными данными (Sediment..., 2004).

С помощью  $K_d$  и содержания изотопов в воде (рис. 2) были оценены концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в минеральной взвеси на границах Баренцева моря. Потоки рассчитывали, как произведение концентраций изотопов на количество взвеси на границах моря (табл. 4).

Таблица 4

Годовые балансы радионуклидов, адсорбированных на минеральной взвеси, в Баренцевом море, ТБк/год

| Годы              | $q_{Норв}$ | $q_{Бел}$ | $q_{реки}$ | $q_{прол}$ | $q_{Шп-ЗФИ}$ | $q_{ЗФИ-НЗ}$ | $\Delta q$ |
|-------------------|------------|-----------|------------|------------|--------------|--------------|------------|
| $^{137}\text{Cs}$ |            |           |            |            |              |              |            |
| 1960–1969         | 1.3        | 0.1       | 0.01       | 0.4        | 0.1          | 0.1          | 0.8        |
| 1970–1979         | 1.9        | 0.01      | 0.01       | 0.5        | 0.1          | 0.1          | 1.3        |
| 1980–1989         | 2.3        | 0.01      | 0.02       | 0.8        | 0.04         | 0.1          | 1.4        |
| 1990–1999         | 0.5        | 0.004     | 0.01       | 0.2        | 0.02         | 0.03         | 0.2        |
| 2000–2009         | 0.2        | 0.002     | 0.001      | 0.1        | 0.01         | 0.02         | 0.1        |
| $^{90}\text{Sr}$  |            |           |            |            |              |              |            |
| 1960–1969         | 0.4        | 2.3E-03   | 7.6E-06    | 6.4E-04    | 7.2E-05      | 9.4E-05      | 0.4        |
| 1970–1979         | 0.2        | 1.9E-03   | 4.5E-06    | 2.6E-04    | 5.2E-05      | 3.6E-05      | 0.2        |
| 1980–1989         | 0.3        | 1.6E-03   | 7.8E-06    | 3.6E-04    | 2.4E-05      | 6.2E-05      | 0.3        |
| 1990–1999         | 0.1        | 5.9E-04   | 1.1E-06    | 8.0E-05    | 5.3E-06      | 3.1E-05      | 0.1        |
| 2000–2009         | 0.1        | 3.4E-04   | 3.6E-06    | 1.0E-04    | 1.3E-05      | 1.0E-05      | 0.1        |

Годовой баланс радионуклидов, адсорбированных на минеральной взвеси, положителен, однако изменение запаса радионуклидов в море по сравнению с водным обменом не значительно.

В подразделе **4.2 «Оценки концентраций радионуклидов в гидробионтах Баренцева моря»** показаны модельные расчеты накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в организмах разных трофических уровней экосистемы Баренцева моря в период с 1962 по 2009 гг. с последующим сравнением полученных данных с данными наблюдений.

Расчет концентраций радионуклидов в гидробионтах проводился для экосистемы открытой части Баренцева моря на основании упрощенной модели переноса радионуклидов по пищевой сети. Входными параметрами модели приняты:

- среднегодовая концентрация радионуклида в водах Баренцева моря (рис. 1);
- коэффициент поглощения радионуклида фитопланктоном (детритом) (Heldal et al, 2001; Eisler, 1981; Sediment..., 2004);
- коэффициент поглощения радионуклида донными отложениями (настоящая работа; Sediment..., 2004);
- размерно-массовые характеристики организмов (Krzykawski, 1976; Промысловые, 1977; Боркин и др., 1987; Алимов, 1989; Ушаков, 2000; Тимофеев, 1997; Древетняк, 1999; Современный 2000; Anon..., 2006; Котенев и др, 2009; Карамушко, 2007);
- рацион гидробионтов (Болдовский, 1941; Ихтиофауна..., 1986; Кормовые..., 1990; Исследования..., 1992; Эйяд, Пущаева, 1992; Берестовский, 1995; Атлантическая треска..., 1996; Древетняк, 1999; Коржев, Долгов, 1999; Blanchard et al., 2002; Треска..., 2003; Пономаренко, 2008);
- особенности поглощения и удерживания радионуклидов морскими организмами (Поликарпов, Егоров, 1986; Chowdhury, Blust, 2011).

Качество модели проверяли сравнением расчетных данных с многолетними данными наблюдений ММБИ (1990-х - 2000-е гг.). Рассчитанные значения концентраций в гидробионтах совпадают с данными непосредственных наблюдений (% от общего количества измерений в трофической группе организмов) для:

- планктоноядных рыб  $^{137}\text{Cs}$  – 66.7,  $^{90}\text{Sr}$  – 38.5;
- бентоядных рыб  $^{137}\text{Cs}$  – 89.5,  $^{90}\text{Sr}$  – 71.4;
- хищных рыб  $^{137}\text{Cs}$  – 95.7,  $^{90}\text{Sr}$  – 82.4;
- зообентоса  $^{137}\text{Cs}$  – 73.7,  $^{90}\text{Sr}$  – 20.

В подразделе **4.3 «Динамика содержания радионуклидов в основных компонентах баренцевоморской экосистемы»** определен объем накопления радионуклидов в компонентах экосистемы Баренцева моря за период с начала испытаний ядерного оружия (1960-е г.) по настоящее время (2009 г.).

Основные элементы приходных и расходных потоков радионуклидов на

частицах взвеси рассчитывали как произведение средних арифметических значений концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  во взвешенном веществе, обнаруженных в районе границ Баренцева моря с сопредельными районами, на количество взвеси в результирующем потоке воды. *Активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , поступившая в Баренцево море с взвесью в 1960-2009 гг. составляет 38.5 и 10.7 ТБк соответственно.*

Общая активность радионуклида в биологической составляющей экосистемы Баренцева моря вычислялась как сумма активностей радионуклида в каждом компоненте пищевой цепи. Среднее годовое содержание изотопа в отдельном компоненте рассчитывали как произведение концентрации радионуклида в организме на его биомассу в Баренцевом море. Средние годовые биомассы организмов приняты (млн.т): фитопланктон ~3.6–6.6 (Новиков, 2008; Романкевич, Ветров, 2001); зоопланктон 17.9–34 (Тимофеев..., 1997; Романкевич, Ветров, 2001; Новиков, 2008; Котенев и др., 2009; Комплексные..., 2011); рыбы 2.6–12 (Экология..., 2001; Anon..., 2001; Состояние..., 2005; Anon..., 2010) и зообентос 79–114 (Романкевич, Ветров, 2001; Exploring..., 2002; Новиков, 2008).

В модельных расчетах за среднюю годовую биомассу рыб Баренцева моря принята сумма годовых запасов основных промысловых видов. Биомассу непромысловых видов рыб в расчетах не использовали, так как плотность их распределения в Баренцевом море составляет не более 0.26 % в бореальной зоне, 1.18 % в арктической зоне и 10.6 % в Печорском море от плотности промысловых рыб (Карамушко и др., 2008). В настоящее время в биотической компоненте Баренцева моря содержится приблизительно 0.07 ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и 0.86 ТБк  $^{90}\text{Sr}$ .

Расчет депонирования  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностный слой донных отложений на площади Баренцева моря производился на основе известной скорости осадконакопления –  $0.4 \cdot 10^{-3}$  м/год (Жизнь...пелагиали, 1985), средней плотности грунтов –  $1500 \text{ кг/м}^3$  (Матишов, 1986), концентрации радионуклидов в осадках. В 1960-2009 гг. в донные отложения накопили приблизительно 447.2 ТБк  $^{137}\text{Cs}$  и 75.1 ТБк  $^{90}\text{Sr}$ .

#### IV. ВЫВОДЫ

1. Практически повсеместно в водах и донных отложениях шельфа Баренцева моря присутствуют  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Объемная активность  $^{90}\text{Sr}$  в *водной среде* выше, чем  $^{137}\text{Cs}$ . *Донные отложения* накапливают больше радионуклидов в районах желобов и впадин шельфа по сравнению с возвышенностями. Уровни радиоактивного загрязнения *биоты* зависят от загрязненности среды и характера питания видов. В донных видах рыб концентрации  $^{137}\text{Cs}$  выше, чем в пелагических. Для  $^{90}\text{Sr}$  наблюдается обратная зависимость.
2. Содержание искусственных радионуклидов в экосистеме Баренцева моря в 2000-2010 гг. снизилось по сравнению с 1990-ми гг.. Многолетние изменения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в водах, донных отложениях,

фукусовых водорослях и рыбе (треске) описываются экспоненциальными кривыми.

3. Реконструированные удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в рыбах разной видовой принадлежности (мойва, сельдь, сайка, окунь, камбалы, зубатки, пикша, палтус, треска, сайда) и донных организмах (амфиподы, иглокожие) экосистемы Баренцева моря с 1962 по 2009 гг. подтверждают закономерности снижения концентраций изотопов в биоте, измеренные непосредственно в организмах;
4. На основе анализа имеющейся информации восстановлены многолетние миграционные потоки  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцевом море. Доминирующими потоками, определяющими поступление изотопов в водоем, были атмосферный перенос (в 1950-1960 гг. и 1986 г.) и адвекция с течениями через западные границы моря (1970-2011 гг.). В современном балансе (2000-2009 гг.) трансграничный перенос из Норвежского моря составляет около 99 % от общего поступления. Большая часть радионуклидов выводится на северных и северо-восточных границах Баренцева моря.
5. На протяжении всей истории радиоактивного загрязнения Баренцева моря в пищевые цепи вовлекалось из среды значительное количество активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , однако на фоне запасов в воде и донных отложениях в биоте аккумулировано не более 0.02 % от общего содержания изотопов в экосистеме. Активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  распределена преимущественно в абиотической части между водой - 95.8 и 98.4 %, взвесью - 0.3 и 0.2 % и донными отложениями - 3.9 и 1.4 %.

## **V. СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ**

Работы, опубликованные в рекомендованных ВАК изданиях:

1. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., **Усягина И.С.** Динамика радиоактивного загрязнения донных отложений Баренцева, Белого и Азовского морей // Доклады академии наук. 2004. Т. 396, № 3. С. 394-396.
2. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Касаткина Н.Е., **Усягина И.С.**, Куклина М.М. Анализ распространения искусственных радионуклидов в экосистеме Баренцева моря // Доклады академии наук. 2005. Т. 404, № 4. С. 1-4.
3. Матишов Д.Г., **Усягина И.С.**, Касаткина Н.Е., Павельская Е.В. Особенности накопления искусственных радионуклидов в элементах прибрежных экосистем Кольского полуострова // Доклады академии наук. 2007. Т. 413, № 5. С. 683-686.
4. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., **Усягина И.С.**, Касаткина Н.Е., Павельская Е.В. Оценка потоков  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцевом море. Доклады академии наук. 2011. Т. 439, № 6. С. 822-827.

Другие опубликованные работы:

5. **Усягина И.С.** Степень изученности трансформации и переноса антропогенных радионуклидов в морских экосистемах // Материалы XX

юбилейной конференции молодых ученых Мурманского морского биологического института (г. Мурманск, апрель 2002 г.) Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2002. С. 175-183.

6. Матишов Д.Г. **Усягина И.С.** Радиоизотопы в промысловых видах рыб Баренцева моря // Материалы XXI конференции молодых ученых ММБИ (г. Мурманск, апрель 2003) ММБИ КНЦ РАН, 2003. С. 63-68.

7. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., **Усягина И.С.** Динамика радиоактивного загрязнения донных отложений Баренцева, Белого и Азовского морей // Эволюция морских и наземных экосистем в перигляциальных зонах: тез. докл. междунар. научн. конф. (г. Ростов-на-Дону, 6-8 сентября 2004 г.) г. Ростов-на-Дону: изд-во ООО «ЦВВР», 2004. С. 84-86.

8. Матишов Д.Г., **Усягина И.С.**, Куклин В.В. Морские птицы как индикаторы техногенного загрязнения Западной Арктики Тезисы докладов V съезда по радиационным исследованиям (10-14 апреля 2006 г.) Москва, 2006. С. 121.

9. **Усягина И.С.** Особенности накопления <sup>137</sup>Cs в элементах прибрежных экосистем Баренцева и Белого морей Материалы XXIV конференции молодых ученых Мурманского морского биологического института (май, 2006 г.) Мурманск: Изд. ММБИ КНЦ РАН, 2006. 165 с.

10. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., **Усягина И.С.** Радиоэкологическая характеристика арктических морей (по трассе Севморпути) // Биология и океанография Северного морского пути: Баренцево и Карское моря / [отв. ред. Г. Г. Матишов]; Мурман. биол. ин-т КНЦ РАН. -2-е изд. Перераб. И доп. – М.: Наука, 2007. – 323 с.

11. Матишов Д.Г., **Усягина И.С.**, Павельская Е.В. Тенденции изменчивости концентраций долгоживущих радионуклидов в промысловых рыбах Баренцева моря // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы «Исследование природы Мирового Океана» федеральной целевой программы «Мировой Океан»). Вып. 2. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2007. С. 548-556.

12. **Усягина И.С.**, Матишов Д.Г., Павельская Е.В. Искусственные радионуклиды в тканях промысловых рыб Баренцева моря Международная научная конференция «Большие морские экосистемы России в эпоху глобальных изменений (климат, ресурсы, управление)», г. Ростов-на-Дону, 10-13 октября 2007 г.

13. Матишов Д.Г., Касаткина Н.Е., **Усягина И.С.**, Павельская Е.В., Дерябин А.А. Искусственные радионуклиды в экосистеме Кольский залив : освоение и рациональное природопользование / / [отв. ред. Г. Г. Матишов]; Мурман. биол. ин-т КНЦ РАН. – М.: Наука, 2008. – 381 с.

14. Матишов Д.Г., Касаткина Н.Е., Павельская Е.В., **Усягина И.С.** Искусственные радионуклиды в водных массах Баренцева моря. Материалы международной научной конференции «Природа шельфа и архипелагов

Европейской Арктики» (г. Мурманск 9-10 ноября 2008 г.). М.: ГЕОС. С. 232-234.

15. Касаткина Н.Е., Павельская Е.В., **Усягина И.С.**, Матишов Д.Г. Современные уровни накопления искусственных радионуклидов в макрофитах Кольского залива Баренцева моря. Материалы всероссийской конференции с международным участием «Северные территории России: проблемы и перспективы развития» (г. Архангельск 23–26 июня 2008 г.).

16. Matishov D.G., **Usyagina I.S.**, Kasatkina N.E., Pavelskaya E.V. Artificial radionuclides in elements of costal ecosystems of the Kola peninsula. International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity. Norway, Bergen, 15–20 June 2008. Posters proceedings. Part 2. P. 220–223.

17. **Усягина И.С.**, Матишов Д.Г., Павельская Е.В. Миграции радионуклидов в Баренцевом море // Радіобіологічні та радіоекологічні аспекти Чорнобильської катастрофи. Тези доповідей міжнародної конференції (м. Славутич, Україна, 11-15 квітня 2011 року). Славутич: Фітосоціоцентр, 2011. С. 186

Подписано в печать 31.10.2012  
Заказ № 4-2012 Формат 60х90/16. Усл. печ. л. 1.  
Тираж 100 экз.  
**Напечатано в издательском центре ММБИ КНЦ РАН**  
**г. Мурманск, ул. Владимирская, 17 тел. (8152) 25-39-81**  
**Верстка -Янтарова И.С.**