

## Реконструкция поступления и миграции $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в экосистеме Баренцева моря\*

Г.Г. Матишов, И.С. Усягина, Г.В. Ильин

На основе анализа данных многолетних радиоэкологических наблюдений в Баренцевом море реконструированы основные потоки миграции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в экосистеме бассейна. В современном (2010–2019) балансе техногенной радиоактивности трансграничный перенос радиоизотопов из Норвежского моря составляет более 90% от общего поступления. Большая часть поступающих радионуклидов выводится из Баренцева моря через его северные и северо-восточные границы в процессе водообмена. Показано значительное снижение их концентрации в компонентах среды и биоты в «постядерную эпоху». Оценено вовлечение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пищевую сеть морской экосистемы в сравнении с запасом их активности в воде и донных отложениях. В биоте аккумулировано не более 0.01% от общего содержания изотопов в экосистеме.

**Ключевые слова:** цезий-137, стронций-90, экосистема, водный баланс, трансграничный перенос, компоненты биоты, коэффициенты распределения.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60249).

### Введение

Феномен радиоактивного загрязнения Баренцева моря является частью глобального загрязнения Арктики, сложившегося в эпоху испытаний ядерного оружия и сбросов радиоактивных отходов в России и Западной Европе. Циркуляция изотопов, поступивших в природную среду в «ядерную эпоху», до настоящего времени определяет формирование современного радиационного фона в морях Северного Ледовитого океана. В конце 1990-х – начале 2000-х гг. радиоэкологические исследования в Баренцевом море были направлены, в основном, на ключевые объекты, вызывающие обеспокоенность общественности, – районы интенсивного рыбного промысла, затопления атомных подводных лодок (АПЛ «Комсомолец», «Курск», К-159), испытания атомного оружия и сброса жидких радиоактивных отходов (ЖРО) [1, 2]. В начале

XXI века происходит трансформация глобальных эмитентов загрязнения и рост значимости вторичных источников: сток крупных рек, таяние покровных ледников, дрейфующих айсбергов и паковых льдов, переотложение донных осадков, инфраструктура атомного флота и прочее. Назрела необходимость обобщения накопленных данных о радиоактивном загрязнении моря, полученных разными авторами, а также выявлении современных закономерностей перераспределения радионуклидов в экосистеме водоема.

Значимость и научная новизна работы определяются необходимостью фундаментального изучения закономерностей радиоактивного загрязнения морей Полярного бассейна в XXI веке и оценки современных угроз состоянию и функционированию морских экосистем.

Цель работы – проанализировать современное радиоэкологическое состояние Баренцева моря в период с 2010 по 2019 гг., оценить потоки  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в морском бассейне и с помощью метода балансовых математических моделей оценить влияние различных источников на общую техногенную радиоактивную загрязненность акватории.

Чтобы проследить тенденции временной изменчивости загрязнения водоема, полученные результаты сравнивали с данными 1950–2009 гг.



**МАТИШОВ**  
Геннадий Григорьевич  
академик, профессор,  
научный руководитель  
Федерального  
исследовательского центра  
«Южный научный центр РАН»



**УСЯГИНА**  
Ирина Сергеевна  
Мурманский морской  
биологический институт РАН



**ИЛЬИН**  
Геннадий Васильевич  
Мурманский морской  
биологический институт РАН

### Материалы и методы исследований

Балансовые математические модели успешно применяются при обобщении многолетних данных по распределению техногенных радионуклидов в морских и пресноводных экосистемах. Для расчета баланса радионуклидов в Баренцевом море применена общая схема морских балансовых оценок, основанная на данных водообмена, трансграничного переноса радионуклидов и данных о миграционных потоках внутри морской экосистемы. Главными элементами модели приняты атмосферный и трансокеанический приток радионуклидов из разных источников, их вынос с водными массами за пределы моря, аккумуляция взвесью и гидробионтами, сорбция донными отложениями, а также радиоактивный распад. Для оценки депонирования и миграции радионуклидов в биоте Баренцева моря использована компартментальная модель, предложенная С.В. Бердниковым [3]. Модель позволяет рассчитать перенос  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из воды в разные экологические группы гидробионтов и оценить объемы депонирования радионуклидов в важнейших узлах трофической сети.

В работе использованы материалы радиоэкологических наблюдений ММБИ с 1990 г. по 2019 г. в Баренцевом море и прилегающих акваториях, а также данные литературных источников.

### Баланс $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в водах Баренцева моря

Основу оценки баланса радионуклидов в Баренцевом море составляет схема основных потоков поступления, переноса и выведения радионуклидов: приток радионуклидов из разных источников; вынос радионуклидов за пределы моря; перенос растворенных и взвешенных форм радионуклидов водными массами; седиментация взвешенных частиц вместе с мигрирующими на них радионуклидами; радиоактивный распад.

В оценках водного баланса Баренцева моря до настоящего времени существует неопределенность. Отмечена сезонная и межгодовая изменчивость объемов переноса вод на его границах, особенно на западной границе по разрезу мыс Нордкап (Скандинавия) – мыс Зюйдкап (Шпицберген). Наиболее полная информация о водообмене Баренцева моря с сопредельными акваториями представлена в работе В.А. Потанина [4]. Приближенный водный баланс рассчитан по скоростям течений на пограничных разрезах моря с использованием данных многолетних океанологических наблюдений (табл. 1).

Вследствие большой изменчивости расходов воды на пограничных разрезах и несинхронности периодов наблюдений не соблюдается абсолютный баланс «прихода» и «расхода» в водообмене. Однако разница между суммой прихода и расхода объема воды весьма незначительна, составляет 1.9% от общего поступления вод в Баренцево море. Рассчитанные потоки следует признать пригодными для оценки баланса радионуклидов.

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

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

Таблица 1. Водообмен Баренцева моря с сопредельными акваториями [4]

Приход воды		Расход воды	
Пролив	Объем, км <sup>3</sup> /год	Пролив	Объем, км <sup>3</sup> /год
Мыс Нордкап – мыс Зюйдкап	53 131	Архипелаг Шпицберген – архипелаг Земля Франца-Иосифа	10 904 – 13 218
Мыс Святой Нос – мыс Канин Нос	231	Архипелаг Земля Франца-Иосифа – архипелаг Новая Земля	7 125 – 17 130
За счет поступления льда	134	Новоземельские проливы (Карские Ворота, Маточкин Шар, Югорский Шар)	19 832 – 22 205
Пресный сток	189	—	—
Суммарный приход	53 685	Суммарный расход	37 861 – 52 553

где  $\Delta q$  – изменение запаса радионуклидов в море, ТБк;  $q_{атм}$  – активность радионуклидов, поступающих с атмосферными осадками;  $q_{реки}$  – поступающих с речными водами (р. Печора, реки Кольского полуострова и Норвежского сектора водосбора);  $q_{Норв}$ ,  $q_{Бел}$  – поступающих из Норвежского моря (граница мыс Нордкап – мыс Зюйдкап) и Белого морей (граница мыс Святой Нос – мыс Канин Нос);  $q_{ЖРО}$  – поступающих при сливе ЖРО;  $q_{прол}$ ,  $q_{ШП-ЗФИ}$ ,  $q_{ЗФИ-ИЗ}$  – вытекающих в смежные водоёмы через Новоземельские проливы и северные границы Шпицберген – Земля Франца-Иосифа и Земля Франца-Иосифа – Новая Земля;  $q_{расп}$  – поправка на радиоактивный распад радионуклида от момента его поступления в море.

Расчет потоков радионуклидов проводился по формуле:

$$q_i = A_i \cdot V_i, \quad (2)$$

где  $q_i$  – поток радионуклида, ТБк;  $A_i$  – объемная активность радионуклида в воде, Бк/м<sup>3</sup>;  $V_i$  – объем результирующего потока вод на границах моря, м<sup>3</sup>/год.

Вследствие недостатка ежегодных наблюдений годовой баланс рассчитан по данным, осредненным за десятилетний период. Отдельно приведены балансы для 1986 г. (авария на Чернобыльской АЭС) и 2011 г. (авария на АЭС «Фукусима»). Водообмен на границах Баренцева моря считали постоянным и равным его среднегодовым значениям (табл. 1). Величины

объемной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr на граничных участках Баренцева моря с 1950 по 2005 гг. получены из литературных источников [1, 2, 5, 6], в период 2005–2019 гг. – из базы данных Мурманского морского биологического института РАН (рис. 1).

Оценка поступления <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в Баренцево море с речными водами основана на имеющихся данных о концентрациях радионуклидов в реках Севера европейской территории России [7–9]. При отсутствии в литературе данных измерений активности <sup>137</sup>Cs в реках его концентрации рассчитывали исходя из известного для речных вод соотношения <sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr, составляющего 0.1 [10].

Потоки искусственных радионуклидов из атмосферы рассчитывали как произведение годового количества осадков, выпавших на площадь зеркала Баренцева моря 1438.4 тыс. км<sup>2</sup> и плотности выпадений (Бк/м<sup>2</sup>год) <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr [2, 8, 9, 11] с учетом того, что количество выпадающих осадков уменьшается по мере удаления от материка.

Поступление <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в Баренцево море из жидких радиоактивных отходов (1959–1992) рассчитано по опубликованным данным [2]. При этом считалось, что на момент затопления активность отходов соответствует «типовой» смеси радионуклидов: 50% <sup>60</sup>Co, 25% <sup>90</sup>Sr, 25% <sup>137</sup>Cs [12].

Результаты расчетов годовых балансов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в Баренцевом море, осредненных по десятилетиям, приведены в табл. 2, 3.

Результаты расчетов показали, что поступления радионуклидов, определяющие радиоэкологическое состояние вод Баренцева моря, вызваны трансокеаническим переносом из Северной Атлантики с Нордкапским течением и атмосферными выпадениями на акваторию водоема. Наиболее высокое влияние трансграничного переноса в Баренцевом море наблюдалось в 1975 г. и в 1980 г. Это связано с максимальными сбросами радионуклидов комбината «Селлафилд» в 1970 г. (около 1200 ТБк) и в 1975 г. (5230 ТБк). Большая часть этих отходов переносится к границам моря через 4–5 лет [1]. Максимумы атмосферного выпадения ради-

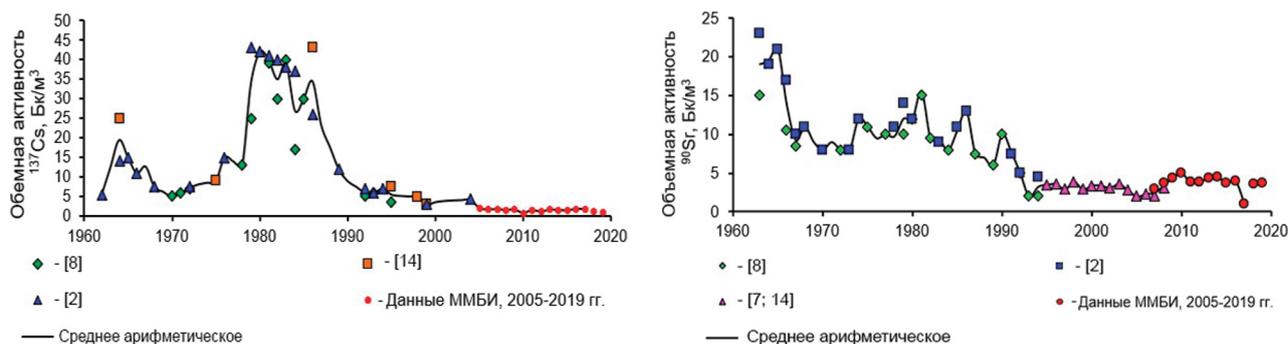


Рис. 1. Динамика удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в водной массе Баренцева моря.

Таблица 2. Годовые балансы  $^{137}\text{Cs}$  в Баренцевом море, 1950–2019 гг.

Годы	Приход $^{137}\text{Cs}$ , ТБк/год					Расход $^{137}\text{Cs}$ , ТБк/год				$\Delta q$
	$q_{\text{атм}}$	$q_{\text{Норв}}$	$q_{\text{Бел}}$	$q_{\text{реки}}$	$q_{\text{ЖРО}}$	$q_{\text{прол}}$	$q_{\text{ШП-ЗФИ}}$	$q_{\text{ЗФИ-НЗ}}$	$q_{\text{расп}}$	
1950–1959	160.4	—	—	—	—	—	—	—	3.6	156.8
1960–1969	298.2	944.6	3.5	0.6	12.0	311.2	168.5	150.7	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	1 171.2	6.7	0.5	10.8	510.7	105.7	257.0	27.1	293.1
1986	1 010.1	1 370.8	6.7	0.5	1.1	510.7	105.7	257.0	54.3	14 615
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	44.4	36.1	57.7	2.3	-41.4
2011	2.1	100.9	0.6	0.1	0	20.0	10.6	27.4	2.3	43.4
2010–2019*	0.2	92.4	0.3	0.1	0	37.7	10.6	27.4	2.1	15.2

\* Данные для этих периодов рассчитаны без учета 1986 г. и 2011 г., соответственно.

Таблица 3. Годовые балансы  $^{90}\text{Sr}$  в Баренцевом море, 1950–2019 гг.

Годы	Приход $^{90}\text{Sr}$ , ТБк/год					Расход $^{90}\text{Sr}$ , ТБк/год				$\Delta q$
	$q_{\text{атм}}$	$q_{\text{Норв}}$	$q_{\text{Бел}}$	$q_{\text{реки}}$	$q_{\text{ЖРО}}$	$q_{\text{прол}}$	$q_{\text{ШП-ЗФИ}}$	$q_{\text{ЗФИ-НЗ}}$	$q_{\text{расп}}$	
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	64.4	31.7	25.7	6.5	145.7
2011	0.2	254.0	0.3	0.7	0	64.4	31.7	25.7	6.5	127.3
2010–2019*	0.2	198.7	0.3	0.8	0	92.4	114.6	17.1	4.7	-28.8

\* Данные для этих периодов рассчитаны без учета 1986 г. и 2011 г., соответственно.

онуклидов наблюдались в 1960-е гг. и 1986 г. Эти максимумы связаны с аэрозольными продуктами испытаний ядерного оружия и аварийными выбросами Чернобыльской АЭС, соответственно [2]. Поступления радиоактивности из Белого моря, с речным стоком, сливы ЖРО оказывают главным образом местное, локальное влияние на радиозологический фон в Баренцевом море.

Большая часть активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  выносятся водными массами из Баренцева моря в Карское море через Новоземельские и Северные проливы (табл. 2, 3). Однако поступление  $^{137}\text{Cs}$  в Баренцево море с 1950-х по 1989 гг. превышало его вынос в Карское море и Северный Ледовитый океан, происходило его накопление в водоеме. С 1990 по 2011 гг. суммарный вынос радионуклида в соседние акватории стал выше, чем его поступление. Радиоактивный распад изотопа в атмосферных аэрозолях, прекращение сбросов ЖРО в море, уменьшение радиоактивного стока предприятиями «Селлафилд» (Великобритания), привело к постепенному очищению вод Баренцева моря от радиоактивного цезия. В 2011 г., несмотря на стабильность

содержания изотопа в воде и вклада (%) различных источников в общее загрязнение моря, баланс  $^{137}\text{Cs}$  стал положительным. Наблюдаемые колебания баланса в целом незначительны. Однако это рост сопряжен с увеличением атмосферных выпадений и может быть пролонгированным эффектом аэрозольных выбросов АЭС «Фукусима» на акватории Баренцева, Норвежского и Северного морей (табл. 1).

Закономерности многолетнего перераспределения  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в Баренцевом море отличаются вследствие различий их геохимических свойств. С 1950-х по 2011 гг.  $^{90}\text{Sr}$ , менее, чем  $^{137}\text{Cs}$ , поглощаемый взвесью и донным осадком, накапливался в водной массе. К 2019 г. вынос радионуклида в соседние акватории стал больше, чем его поступление в море.

При этом максимальный расходный поток направлен из Баренцева моря в Северный Ледовитый океан через границу Шпицберген – Земля Франца-Иосифа. В этом секторе моря на перенос и перераспределение  $^{90}\text{Sr}$  может влиять движение и таяние полей дрейфующего льда.

С 1950 по 2019 гг. в Баренцево море поступило  $^{137}\text{Cs}$  около  $38.5 \cdot 10^3$  ТБк, а выведено  $26.7 \cdot 10^3$  ТБк (69.3%). Радиоизотопов  $^{90}\text{Sr}$  в море поступило  $26.9 \cdot 10^3$  ТБк, выведено  $21.1 \cdot 10^3$  ТБк (78.4%).

#### Роль потоков взвешенного вещества в балансе $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в Баренцевом море

Потоки  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , адсорбированных на взвеси в пределах водных границ Баренцева моря, были рассчитаны с учетом концентраций взвеси, объема потоков воды, коэффициентов распределения ( $K_d$ ) для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностных водах.

Коэффициенты распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  между взвесью и морской водой были получены нами при специальных натурных наблюдениях с помощью седиментационных ловушек и в экспериментах.  $K_d$  цезия-137 для морской воды (34‰) составляет 1 Бк/м<sup>3</sup>, а для пресной воды (речной сток) – 0.02 Бк/м<sup>3</sup>.  $K_d$

стронция-90 составил 4 для морской воды и 348 – для пресной воды [15].

С помощью полученных коэффициентов были рассчитаны примерные удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  во взвеси на границах Баренцева моря за период с 1960 по 2019 гг. Годовые балансы потоков этих радионуклидов, адсорбированных взвешенным веществом, в Баренцевом море рассчитывались в соответствии с данными о водообмене Баренцева моря как разница между количеством изотопов, поступивших в море и выведенных из него на сопредельных границах.

Результаты расчетов показали, что таковые балансы положительны. Но в целом вклад поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  со взвесью в среднегодовые потоки радионуклидов незначителен (табл. 5). Взвесь, содержащая  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , аккумулируется преимущественно в поверхностном слое донных отложений, создавая со временем вторичный источник загрязнения.

#### Депонирование радионуклидов в донных отложениях

Расчет объемов депонирования  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностном слое донных отложений производился на основе средней скорости осадконакопления –  $0.4 \cdot 10^{-3}$  м/год, средней плотности грунтов – 1500 кг/м<sup>3</sup> [16], средней арифметической наблюдаемой удельной активности радионуклидов в осадках. Рассчитанные среднегодовые концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях согласуются с данными экспедиционных наблюдений (рис. 2) и подтверждают высокую селективность грунтов Баренцева моря к  $^{137}\text{Cs}$  и низкую сорбционную способность в отношении  $^{90}\text{Sr}$  при небольшом разбросе значений. Измеренные концен-

Таблица 4. Потоки взвеси на границах Баренцева моря [13, 14]

Элементы среднегодовых балансов	Объем воды, тыс. км <sup>3</sup> /год	Концентрация взвеси, мг/л	Потоки взвеси, млн т/год
Поступление через границу мыс Нордкап – мыс Зюйдкап	53.131	0.5	26.6
Поступление через границу мыс Святой Нос – мыс Канин Нос	0.231	0.6	0.1
Речной транспорт	0.189	1.0	0.2
Сток через Новоземельские проливы	22.205	0.4	-8.9
Сток через границу архипелаг Шпицберген – архипелаг Земля Франца-Иосифа	13.218	0.1	-1.3
Сток через границу архипелаг Земля Франца-Иосифа – архипелаг Новая Земля	17.130	0.1	-1.7

Таблица 5. Годовые балансы радионуклидов, адсорбированных на поверхности взвешенного вещества, ТБк/год

Годы	$q_{\text{Норв}}$	$q_{\text{Бел}}$	$q_{\text{реки}}$	$q_{\text{прол}}$	$q_{\text{Шл-ЗФИ}}$	$q_{\text{ЗФИ-НЗ}}$	$\Delta q$
<b><sup>137</sup>Cs</b>							
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
1986*	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
2011*	0.2	0.0005	0.001	0.03	0.004	0.01	0.1
2010–2019	0.2	0.0007	0.001	0.06	0.004	0.01	0.1
<b><sup>90</sup>Sr</b>							
1960–1969	0.4	7.6E-06	2.3E-03	6.4E-04	7.2E-05	9.4E-05	0.4
1970–1979	0.2	4.5E-06	1.9E-03	2.6E-04	5.2E-05	3.6E-05	0.2
1980–1989	0.3	7.8E-06	1.6E-03	3.6E-04	2.4E-05	6.2E-05	0.3
1986*	0.3	7.8E-06	1.6E-03	3.6E-04	2.4E-05	6.2E-05	0.3
1990–1999	0.1	1.1E-06	5.9E-04	8.0E-05	5.3E-06	3.1E-05	0.1
2000–2009	0.1	3.6E-06	3.4E-04	1.0E-04	1.3E-05	1.0E-05	0.1
2011*	0.1	0.7E-06	2.2E-04	1.0E-04	1.3E-05	1.0E-05	0.1
2010–2019	0.1	0.7E-06	2.3E-04	1.5E-04	4.6E-05	6.9E-06	0.1

\* Данные для этих периодов рассчитаны без учета 1986 г. и 2011 г., соответственно.

трации <sup>90</sup>Sr в донных отложениях хорошо согласуются с расчетными величинами. Низкая сорбционная емкость донных отложений к <sup>90</sup>Sr препятствует его миграции из водной толщи в отложения. Общий запас <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr, накопленный в донных отложениях с 1962 по 2019 гг., составляет 458.2 и 75.1 ТБк, соответственно.

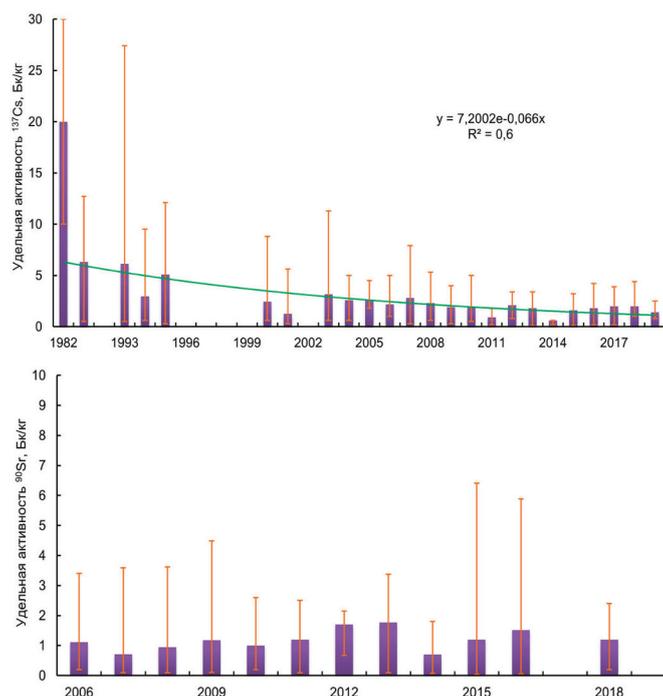


Рис. 2. Удельная активность <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в донных отложениях Баренцева моря.

### Оценки концентраций радионуклидов в гидробионтах Баренцева моря

Концентрации радионуклидов в гидробионтах Баренцева моря рассчитаны с помощью математической модели миграции радионуклидов по пищевым цепям морских экосистем с учетом биологических и экологических особенностей гидробионтов [3]. Расчет проводился для экосистемы открытой части Баренцева моря. Главные каналы переноса радионуклидов по пелагической пищевой цепи: морская вода—фитопланктон—зоопланктон—рыбы-планктофаги—хищные рыбы; по донной пищевой цепи: морская вода—донные отложения—зообентос—рыбы-бентофаги—хищные рыбы.

Входящими параметрами модели приняты среднегодовая концентрация радионуклида в водах Баренцева моря, коэффициент поглощения радионуклида фитопланктоном (детритом) [15], коэффициент по-

глощения радионуклида донными отложениями (данные ММБИ РАН и [15]), размерно-массовые характеристики гидробионтов и их рацион. Учитывались также особенности поглощения и удерживания радионуклидов различными группами организмов [17]. Качество модели проверяли сравнением расчетных данных с данными многолетних наблюдений ММБИ с 1990-х гг. по настоящее время. Данные наблюдений хорошо согласуются с расчетными значениями.

### Описание модели

Среднее содержание радионуклидов в организмах определенного трофического уровня зависит от поступления радионуклидов с пищей (алиментарное потребление) и непосредственно из среды обитания (парентеральное потребление), а также от выведения из организмов. Под средним содержанием понимается средневзвешенное значение по числу особей разных возрастных стадий с учетом их средневозрастного веса. Динамические уравнения для средних концентраций имеют вид (3):

$$\frac{dx_i}{dt} = \beta_i \cdot \sum_j (C_{ij}/B_j) \cdot x_j - (P_i/B_i) \cdot x_i + \eta_i(x_0) - \gamma_i \cdot x_i \quad (3)$$

$$\eta_i(x_0) = \eta \cdot x_0 \cdot R_i/B_i, \quad i=1 \dots N, \quad j \in I_i,$$

где  $B_i$  – биомасса  $i$ -го вида, кДж/м<sup>2</sup>;  $C_i$  – рацион, кДж/м<sup>2</sup>·год;  $R_i$  – дыхание, кДж/м<sup>2</sup>·год;  $P_i$  – продукция, кДж/м<sup>2</sup>·год;  $I_i$  – спектр питания (список видов, которыми данный вид питается);  $C_{ij}$  – частный рацион ( $\sum_j C_{ij} = C_i$ );  $x_i$  – средняя концентрация радионуклида в организмах  $i$ -го вида, Бк/кг;  $x_0$  – концентрация радионуклида в среде, Бк/м<sup>3</sup>;  $\beta_i$  – коэффициент извлечения радионуклида из пищи ( $\beta_i \leq 1$ );  $\eta_i(x_0)$  – скорость потребления из среды на единицу биомассы, Бк/кДж·год;  $\gamma_i$  – интенсивность выведения радионуклидов из организмов в среду, год<sup>-1</sup>.

Парентеральное потребление радионуклида ( $\eta_i$ ) линейно зависит от его содержания в среде и пропорционально удельной интенсивности дыхания ( $R_i/B_i$ ) [17]. Видовые вариации  $\eta_i$  связаны с изменением отношения  $R_i/B_i$ , а тип радионуклида определяется коэффициентом  $\eta$ , не зависящим от трофической принадлежности гидробионтов.

Скорость выведения радионуклидов из организмов ( $\gamma_i$ ) определяется относительной интенсивностью метаболизма. С учетом известных соотношений между рационом, ассимиляцией, тратами на обмен и продукцией [18] модель (3) можно записать в следующей форме:

$$\frac{dx_i}{dt} = [x_i^* \cdot (P_i + R_i)/B_i + \eta \cdot x_0 \cdot R_i/B_i] - (P_i/B_i + \gamma_i) \cdot x_i, \quad (4)$$

$$x_i^* = \sum_j \alpha_{ij} \cdot x_j.$$

Здесь  $x_i^*$  – средневзвешенная по спектру питания концентрация радионуклида в пище;  $\alpha_{ij}$  – коэффициент ассимиляции потребленной энергии.

Для расчетов принято, что параметры  $\beta_i$  совпадают с коэффициентами  $KI_i$ , характеризующими степень ассимиляции потребленной энергии  $\alpha_{ij}$ . Следуя работе [19], предполагаем, что скорость экскреции ( $\gamma$ , год<sup>-1</sup>) связана функциональными зависимостями с характерными параметрами гидробионтов – длиной ( $L$ , см) и массой ( $M$ , г) гидробионтов:

$$\gamma = a_1 \cdot L^{-0.75}, \quad (5a)$$

$$\gamma = a_2 \cdot M^{-0.25}. \quad (5b)$$

Параметры  $a_1$  и  $a_2$  зависят от рассматриваемого элемента и трофической ниши гидробионтов.

Оценку параметра  $\gamma$  можно получить из соотношения (6):

$$\gamma \approx (-\ln 0.5)/T, \quad (6)$$

где  $T$  – период полувыведения радионуклида из организма.

При расчетах по предложенной модели нами были приняты следующие входящие параметры. Для воды взяты средние по Баренцеву морю годовые объемные активности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr. Для фитопланктона концентрации радионуклидов рассчитаны с использованием опубликованных в литературе значений концентрационного фактора ( $CF$ ) для фитопланктона  $CF(^{137}\text{Cs})=100$ ,  $CF(^{90}\text{Sr})=10$ . Концентрации радионуклидов в детрите рассчитаны с использованием опубликованных в литературе значений коэффициента распределения ( $Kd$ ) для донных отложений  $Kd(^{137}\text{Cs})=2000$ ,  $Kd(^{90}\text{Sr})=200$ .

Для зоопланктона за основу были приняты продукционные характеристики ракообразных. Расчет проводился по формуле (4) в предположении, что концентрация радионуклида быстро достигает насыщения  $dx_z/dt=0$ . Для расчета удельной скорости выведения радионуклидов из организмов использована формула (5a) при вариациях параметра  $a$ , в интервале 50–120, что соответствует периоду полувыведения 2–4 суток.

Средняя для Баренцева моря удельная годовая продукция разноразмерных групп планктона (от 1.0 мм до 10.0 мм) равна  $2.7 \text{ год}^{-1}$  [20]. Предполагалось, что за счет питания зоопланктон накапливает до 75% радионуклида [17]. Для оценки затрат на дыхание использовано соотношение  $K2=P/(P+R)$ , где  $K2=0.26$  [18].

Расчет накопления радионуклидов в рыбах-планктофагах выполнен по основным массовым пелагическим рыбам – мойве, сайке, морском окуне рода *Sebastes* и атлантической сельди. Принято, что сайка, мойва и сельдь потребляют исключительно зоопланктон, а рацион окуней распределяется в равных долях между зоопланктоном, мелкими рыбами и зообентосом. Для расчета накопления радионуклидов в рыбах-бентофагах в качестве основных объектов были выбраны популяции морской камбалы, зубаток рода *Anarhichas* и пикши. При расчете накопления радионуклидов в хищных рыбах рассматривались популяции атлантической трески, черного палтуса и сайды. Входящими параметрами модели были приняты среднесезонные значения длины ( $L$ ) и массы ( $M$ ) рыб. При моделировании переноса радионуклидов по пищевой сети учитывали спектр питания рыб [21, 22].

Расчет накопления радионуклидов в зообентосе сделан для двух групп бентосных организмов – ракообразных и иглокожих, преобладающих по биомассе [23]. Использован стандартный подход расчета энергетических характеристик на основе характерного веса особей и коэффициента  $K2=0.26$ . Оценка скорости выведения сделана по формуле (5b) для двух уровней метаболизма. Средняя концентрация в пище принята равной концентрации радионуклидов в донных отложениях (детрите) Баренцева моря [15].

#### Реконструкция содержания $^{137}\text{Cs}$ в гидробионтах

Многолетние исследования в Баренцевом море показали, что общую техногенную радиоактивность составляет в основном  $^{137}\text{Cs}$ . В тех или иных количествах  $^{137}\text{Cs}$  присутствует во всех видах биоты Баренцева моря. Всасывание, накопление в тканях,

выведение нуклида определяется его физико-химическими характеристиками. Независимо от пути поступления всасывание растворимых форм нуклида достигает практически 100%. В обмене  $^{137}\text{Cs}$  много общего с обменом калия. В основном он накапливается в мышечной ткани (80%), скелете (10%) и 10% относительно равномерно распределяются в других тканях [17].

**Планктон.** Измерение проб сетевого планктона, отобранных в экспедиции ММБИ на НИС «Дальние Зеленцы», выявило удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  от 0.09 до 0.36 Бк/кг сырой массы. Данные наблюдений не расходятся с рассчитанными в зоопланктоне с помощью моделирования уровнями активности.

**Рыбы.** Работы Мурманского морского биологического института в 1993–1994 гг. позволили определить удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  в баренцевоморской треске, составляющую, в среднем, 0.7 Бк/кг сырой массы. По данным наблюдений авторов, в 2000-е годы максимальные уровни накопления радиоактивного цезия были отмечены в мышцах особой золотистой окуни, минимальные – в мышцах трески и пикши. Расчетные данные и данные наблюдений показывают увеличение активности  $^{137}\text{Cs}$  в 1970-е и 1980-е гг., обусловленное максимумами сбросов западноевропейских радиохимических заводов (рис. 3).

Повышенные уровни характерны для бентофагов и хищных рыб, накопление  $^{137}\text{Cs}$  которыми зависит не только от содержания радионуклида в воде и в пищевых объектах, но и от его концентрации в донных отложениях.

**Зообентос.** Сравнение расчетных концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в зообентосе с данными наблюдений в 1962–2009 гг. выявило высокую степень сходства (рис. 4). Полихеты отличаются аномально высокими уровнями накопления  $^{137}\text{Cs}$ , выше расчетных результатов [1]. Данные 2010–2019 гг. показали низкую

удельную активность  $^{137}\text{Cs}$ , часто ниже минимально детектируемой анализатором ( $\text{МДА} < 0.2 \text{ Бк/кг}$ ).

В целом результаты модельных расчетов хорошо согласуются с данными натурных наблюдений. В диапазон рассчитанных значений по  $^{137}\text{Cs}$  попадают 66.7% данных наблюдений радионуклида в рыбах-планктофагах, 89.5% в рыбах-бентофагах, 95.7% в хищных рыбах и 73.7% в организмах зообентоса.

### Реконструкция содержания $^{90}\text{Sr}$ в гидробионтах Баренцева моря

Особенность биогеохимической миграции  $^{90}\text{Sr}$  состоит во включении этого элемента в минерализованные ткани, богатые кальцием. Преимущественно  $^{90}\text{Sr}$  накапливается в костях рыб, раковинах моллюсков, панцире ракообразных, скелетах иглокожих. Избирательно накапливаясь в костной ткани,  $^{90}\text{Sr}$  обуславливает реализацию отдаленных последствий ионизирующего облучения.

Сравнение многолетних данных ММБИ по загрязнению биоты Баренцева моря  $^{90}\text{Sr}$  с результатами моделирования проведено для организмов разных трофических уровней. В диапазон рассчитанных значений по  $^{90}\text{Sr}$  попадают 38.5% данных наблюдений радионуклида в рыбах-планктофагах, 71.4% в рыбах-бентофагах, 82.4% в хищных рыбах и 20% в организмах зообентоса.

**Планктон.** Данных об удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в планктоне Баренцева моря до 2000-х гг. нет. Сравнение с модельными расчетами приведено только для периода 2000–2009 гг. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в зоопланктоне в 2005 г. составляло  $0.3 \pm 0.4 \text{ Бк/кг}$ , что согласуется с расчетными величинами.

**Рыбы.** Архивные материалы многолетних наблюдений ВРПО «Севрыба» в 1977–1987 гг., позволяют проанализировать динамику содержания  $^{90}\text{Sr}$  в скелете морских рыб. По этим данным его содержание в костной ткани трески варьи-

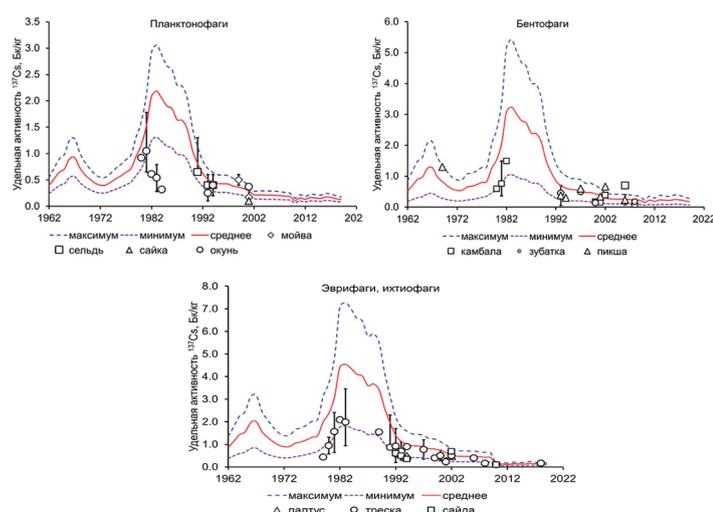


Рис. 3. Рассчитанная удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани рыб разных трофических уровней. Дискретными точками показаны данные наблюдений. Линиями показаны результаты модельных расчетов: максимум – при низкой скорости его выведения из организма; минимум – при высокой скорости выведения; среднее – средняя концентрация радионуклида в организмах.

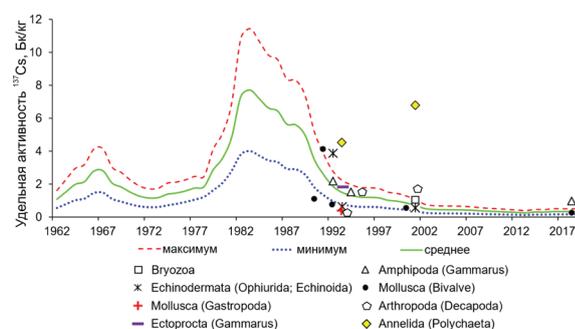


Рис. 4. Рассчитанные удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в организмах зообентоса. Дискретными точками показаны данные наблюдений. Линиями показаны результаты модельных расчетов: максимум – при низкой скорости его выведения из организма; минимум – при высокой скорости выведения; среднее – средняя удельная активность радионуклида в организмах.

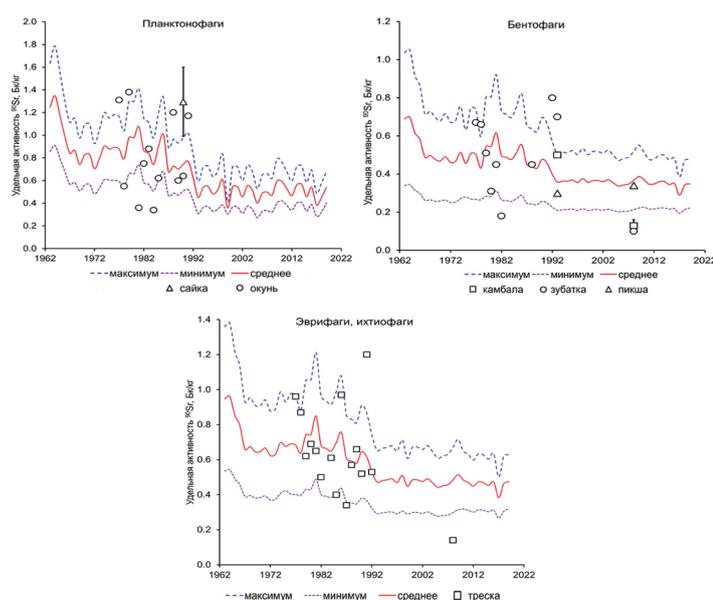


Рис. 5. Рассчитанные удельные активности  $^{90}\text{Sr}$  в костной ткани рыб разных трофических уровней. Дискретными точками показаны данные наблюдений. Линиями показаны результаты модельных расчетов: максимум – при низкой скорости его выведения из организма; минимум – при высокой скорости выведения; среднее – средняя концентрация радионуклида в организмах

ровало в пределах 0.1–1.8, зубатки – 0.2–0.8, окуня – 0.3–1.4 Бк/кг сырой массы.

Анализ архивных данных ММБИ, полученных в 1990-е – 2000-е годы, показал, что активность  $^{90}\text{Sr}$  в мышцах и костях рыб Баренцева моря указанных объектах снизилась до 0.1–0.3 Бк/кг. Более высокая активность  $^{90}\text{Sr}$  характерна для трески, наименьшая – для зубатки (рис. 5). Выявлено сходство рассчитанных и измеренных величин для этого периода.

**Зообентос.** Массив данных по концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в организмах зообентоса открытых частей Баренцева моря недостаточен. Для сравнения частично использовали материал, полученный в районе аварии на АПЛ «Комсомолец». В основной массе донных организмов, отобранных в этом районе, наблюдались повышенные концентрации  $^{90}\text{Sr}$  [24]. Видимо, вследствие этого расчетные концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в зообентосе оказываются ниже данных этих локальных наблюдений. Локальное загрязнение не позволило считать валидацию результатов успешной, так как наши расчеты были выполнены для обобщенной открытой части моря.

В настоящее время вследствие снижения концентраций радионуклида в море проведение измерений удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в бентосных гидробионтах весьма затруднено из-за необходимости отбирать большой объем пробы.

#### **Динамика содержания радионуклидов в основных компонентах экосистемы**

Сравнительный анализ данных многолетних наблюдений радиоактивного загрязнения биоты и реконструированные уровни накопления изотопов в гидробионтах позволяют охарактеризовать их как очень близкие. Это послужило основанием для использования реконструированных значений при вычислении запасов радионуклидов в компонентах пищевой сети с 1960-х гг. по 2019 г. Для расчета запасов радионуклидов в биоте в период 1962–2019 гг. использовали средние многолетние годовые биомассы гидробионтов, принятые постоянными (млн т): фитопланктон ~3.6–6.6; зоопланктон 1.8–20.3; промысловые рыбы 2.7–24.6 и зообентос 79–166 [20, 25]. Расчеты содержания радионуклидов в биомассе живых организмов показали, что из воды вовлекается в пищевую сеть Баренцева моря менее 0.01% радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

Основное количество  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (% от общего содержания в биоте) аккумулируется в биомассе зоопланктона и бентоса. Эти группы животных обитают на границах раздела сред воздух–вода, вода–дно и эффективно извлекают радионукли-

ды из среды. В 1986 г., после аварии на Чернобыльской АЭС, содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в среде и биоте значительно увеличилось. В этом случае большое значение в процессе поглощения радионуклидов гидробионтами имела величина активности изотопов в воде. Полагают, что при высокой радиоактивности воды в накоплении радионуклидов гидробионтами преобладает адсорбция. При низкой активности морской среды основную роль в загрязнении организмов играют трофические связи [17].

С 1990-х гг. наблюдается перераспределение активности  $^{137}\text{Cs}$  между компонентами экосистемы: уменьшается количество радионуклида в воде и биоте и возрастает в донных отложениях (табл. б).

Распределение  $^{90}\text{Sr}$  в море в первую очередь определяется процессами циркуляции и перемешивания водных масс, однако биогенные процессы также имеют значение, так как наряду с кальцием стронций входит в скелет и раковины многих живых организмов. Этот фактор приводит к изменчивости содержания радионуклида в компонентах экосистемы Баренцева моря. Локальное повышение содержания  $^{90}\text{Sr}$  в гидробионтах Баренцева моря наблюдалось сравнительно короткое время (1980-е гг.) в период максимума сбросов западноевропейских радиохимических заводов. Полученные результаты хорошо согласуются с данными распределения  $^{90}\text{Sr}$  в океане [1, 2, 5.]

#### **Заключение**

Результатом моделирования радиоэкологической ситуации в Баренцевом море стала реконструкция динамики загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  основных компонентов морской экосистемы, в том числе компонентов, которые редко наблюдаются при экспедиционных исследованиях, – планктон, взвешенное вещество, некоторые группы гид-

**Таблица 6.** Распределение активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в компонентах экосистемы Баренцева моря (% от общего содержания)

Компоненты экосистемы	1950-е	1960-е	1970-е	1980-е*	1986	1990-е	2000-е	2011	2010-е*
	$^{137}\text{Cs}$								
Вода	100	98.0	97.6	96.6	98.1	96.1	95.8	99.9	95.5
Взвеси	—	0.2	0.3	0.3	0.1	0.3	0.3	0.0	0.4
Донные отложения	—	1.8	2.1	3.1	1.7	3.6	3.9	0.1	4.2
Биота	—	0.009	0.005	0.009	0.073	0.002	0.001	0.006	0.001
$^{90}\text{Sr}$									
Вода	100	98.4	97.9	98.0	97.4	98.0	98.4	99.8	98.4
Взвеси	—	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Донные отложения	—	1.3	1.8	1.8	2.1	1.7	1.4	0.0	1.4
Биота	—	0.010	0.006	0.009	0.299	0.002	0.001	0.001	0.001

\* Данные для этих периодов рассчитаны без учета 1986 г. и 2011 г., соответственно.

робионтов. Результаты моделирования показали хорошую сходимость с данными экспедиционных наблюдений в открытом море (рис. 2–4). С началом развития атомного оружия и атомной энергетики доминирующими потоками изотопов, определяющими их поступление в водоем, стали атмосферный перенос (в 1950–1960 гг. и 1986 г.) и адвекция с течениями через западные границы моря (1970–2019). В современном балансе (2010–2019) трансграничный перенос  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из Норвежского моря составляет более 90% от их общего поступления. Большая часть поступивших радионуклидов выводится из Баренцева моря через его северные и северо-восточные водные границы. С конца 1990-х гг. в бассейне

удерживается относительное равновесие баланса радионуклидов, варьирующее из-за неравномерности притока североатлантических вод в Баренцево море (табл. 2).

Подавляющая часть радиоизотопов циркулирует в водной массе Баренцева моря, однако можно отметить тенденцию слабого роста потока  $^{137}\text{Cs}$  в донные отложения (табл. 6), что может быть связано с их аккумулярующей ролью в морской среде. В динамике потока  $^{90}\text{Sr}$  такой тенденции не наблюдается, по-видимому, из-за его слабой способности сорбироваться минеральными субстанциями.

Для многолетней изменчивости потоков  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в биоте характерно относительно быстрое снижение их интенсивности во всех компонентах после максимальной нагрузки экосистемы, вызванной выпадением продуктов ядерных взрывов (в 1960-х гг.) и аварии Чернобыльской АЭС (1986). Вовлечение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в морскую пищевую сеть составляет около 0.01% от общего содержания изотопов в экосистеме.

## Литература

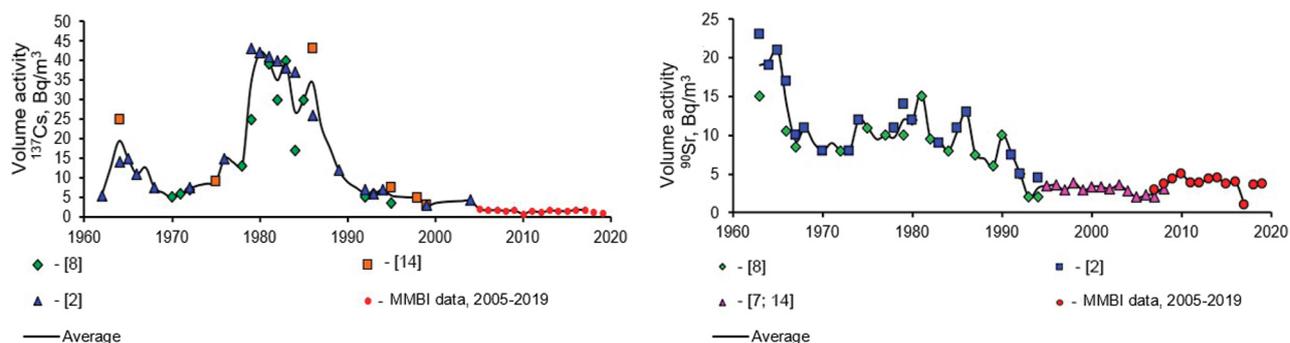
1. Д.Г. Матишов, Г.Г. Матишов  
Радиационная экологическая океанология, РФ, Апатиты, КНЦ РАН, 2001, 417 с.
2. Ю.В. Сивинцев, С.М. Вакуловский, А.П. Васильев, В.Л. Высоцкий, А.Т. Губин, В.А. Данилян, В.И. Кобзев, И.И. Крышев, С.А. Лавковский, В.А. Мазокин, А.И. Никитин, О.И. Петров, Б.Г. Пологих, Ю.И. Скорик  
Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию, РФ, Москва, ИздАТ, 2005, 624 с.
3. С.В. Бердников  
Дис. докт. геогр. наук, Мурманский морской биологический ин-т КНЦ РАН, РФ, Мурманск, 2004, 320 с.
4. В.А. Потанин, В.И. Турчанинов, Т.А. Эрштадт, В.В. Терещенко  
В Сб. докл. научно-практ. конф. по методам промышленного прогнозирования, РФ, Мурманск, 1983, с. 84.
5. R.A. Aliev, V.A. Bobrov, St. N. Kalmykov, M.S. Melgunov, I.E. Vlasova, V.P. Shevchenko, A.N. Novigatsky, A.P. Lisitzin, J. Radioanal. Nucl. Chem, 2007, 274(2), 315.  
DOI: 10.1007/s10967-007-1117-x.
6. C. Wedekind, H. Gabriel, I. Goroncy, G. Framcke, H. Kautsky  
J. Environ. Radioactiv. 1997, 35(2), 173.  
DOI: 10.1016/S0265-931X(96)00049-5.
7. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1994 г., Ежегодник, под ред. С.М. Вакуловского, РФ, Обнинск, НПО "Тайфун", 1995, 60 с.
8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010 г., Ежегодник, под ред. С.М. Вакуловского, РФ, Обнинск, НПО "Тайфун", 2011, 282 с.  
([https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/d19/ezhegodnik\\_ro\\_2010.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/d19/ezhegodnik_ro_2010.pdf)).
9. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 г., Ежегодник, под общ. ред. В.М. Шершакова и др., РФ, Обнинск, НПО "Тайфун", 2019, 324 с.  
([https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/653/ezhegodnik\\_ro\\_2018.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/653/ezhegodnik_ro_2018.pdf)).
10. Л.П. Бочков, С.М. Вакуловский, А.И. Никитин, Э.Г. Тертышник, В.Б. Чумичев  
Метеорология и гидрология, 1983, 8, 79.



## Images &amp; Tables

Table 1. Water exchange of the Barents Sea with adjacent water areas [5, 6]

Water arrival		Water expenditure	
Strait	Volume, km <sup>3</sup> /year	Strait	Volume, km <sup>3</sup> /year
Cape Northkappe – cape Southkappe	53 131	Svalbard – Franz Josef Land	10 904 – 13 218
Cape Svyatoy Nos – cape Kanin Nos	231	Franz Josef Land – Novaya Zemlya	7 125 – 17 130
Due to the arrival of ice	134	Novaya Zemlya Straits (Kara Gate, Matochkin Char, Yugorsky Char)	19 832 – 22 205
Fresh runoff	189	—	—
Total arrival	53 685	Total consumption	37 861 – 52 553

Fig. 1. Dynamics of specific activity of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in the water mass of the Barents Sea.Table 2. Annual balances of <sup>137</sup>Cs in the Barents Sea, 1950–2019

Years	Arrival of <sup>137</sup> Cs, TBq/year					Consumption <sup>137</sup> Cs, TBq/year				$\Delta q$
	$q_{atm}$	$q_{Nnorw}$	$q_{White}$	$q_{river}$	$q_{waste}$	$q_{str.}$	$q_{Sv-FJL}$	$q_{FJL-NZ}$	$q_{decay}$	
1950–1959	160.4	—	—	—	—	—	—	—	3.6	156.8
1960–1969	298.2	944.6	3.5	0.6	12.0	311.2	168.5	150.7	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	1 171.2	6.7	0.5	10.8	510.7	105.7	257.0	27.1	293.1
1986	1 010.1	1 370.8	6.7	0.5	1.1	510.7	105.7	257.0	54.3	14 615
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	44.4	36.1	57.7	2.3	-41.4
2011	2.1	100.9	0.6	0.1	0	20.0	10.6	27.4	2.3	43.4
2010–2019*	0.2	92.4	0.3	0.1	0	37.7	10.6	27.4	2.1	15.2

\* The data for these periods are calculated without taking into account 1986 and 2011, respectively.

**Table 3.** Annual balances of <sup>90</sup>Sr in the Barents Sea, 1950–2019

Years	Arrival of <sup>90</sup> Sr, TBq/year					Consumption of <sup>90</sup> Sr, TBq/year				Δq
	q <sub>atm</sub>	q <sub>Norw</sub>	q <sub>White</sub>	q <sub>river</sub>	q <sub>waste</sub>	q <sub>str.</sub>	q <sub>Sv-FJL</sub>	q <sub>FJL-NZ</sub>	q <sub>decay</sub>	
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	64.4	31.7	25.7	6.5	145.7
2011	0.2	254.0	0.3	0.7	0	64.4	31.7	25.7	6.5	127.3
2010–2019*	0.2	198.7	0.3	0.8	0	92.4	114.6	17.1	4.7	-28.8

\* The data for these periods are calculated without taking into account 1986 and 2011, respectively.

**Table 4.** Suspension flows at the borders of the Barents Sea [18, 19]

Elements of average annual balances	Volume of water, thousand km <sup>3</sup> /year	Suspension concentration, mg/l	Suspension flows, million tons/year
Admission across the border cape Northkappe – cape Southkappe	53.131	0.5	26.6
Admission across the border cape Svyatoy Nos – cape Kanin Nos	0.231	0.6	0.1
River transport	0.189	1.0	0.2
Runoff through the New Earth Straits: Kara Gate, Matochkin Char, Yugorsky Char	22.205	0.4	-8.9
Runoff across the border Svalbard – Franz Josef Land	13.218	0.1	-1.3
Runoff across the border Franz Josef Land – Novaya Zemlya	17.130	0.1	-1.7

**Table 5.** Annual balances of radionuclides adsorbed on suspended matter, TBq/year

Years	q <sub>Норв</sub>	q <sub>Бел</sub>	q <sub>реки</sub>	q <sub>прол</sub>	q <sub>Шп-ЗФИ</sub>	q <sub>ЗФИ-НЗ</sub>	Δq
<sup>137</sup> 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
1986*	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
2011*	0.2	0.0005	0.001	0.03	0.004	0.01	0.1
2010–2019	0.2	0.0007	0.001	0.06	0.004	0.01	0.1
<sup>90</sup> Sr							
1960–1969	0.4	7.6E-06	2.3E-03	6.4E-04	7.2E-05	9.4E-05	0.4
1970–1979	0.2	4.5E-06	1.9E-03	2.6E-04	5.2E-05	3.6E-05	0.2
1980–1989	0.3	7.8E-06	1.6E-03	3.6E-04	2.4E-05	6.2E-05	0.3
1986*	0.3	7.8E-06	1.6E-03	3.6E-04	2.4E-05	6.2E-05	0.3
1990–1999	0.1	1.1E-06	5.9E-04	8.0E-05	5.3E-06	3.1E-05	0.1
2000–2009	0.1	3.6E-06	3.4E-04	1.0E-04	1.3E-05	1.0E-05	0.1
2011*	0.1	0.7E-06	2.2E-04	1.0E-04	1.3E-05	1.0E-05	0.1
2010–2019	0.1	0.7E-06	2.3E-04	1.5E-04	4.6E-05	6.9E-06	0.1

\* The data for these periods are calculated without taking into account 1986 and 2011, respectively.

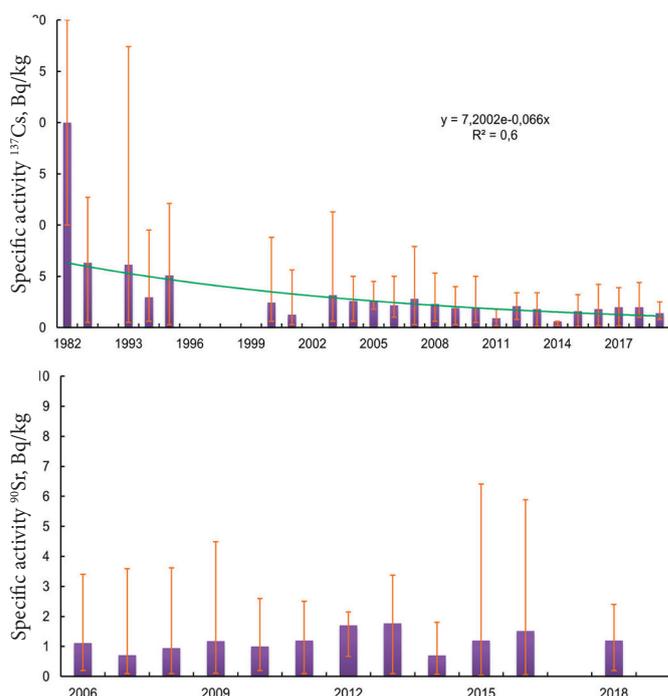


Fig. 2. Specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in bottom sediments of the Barents Sea.

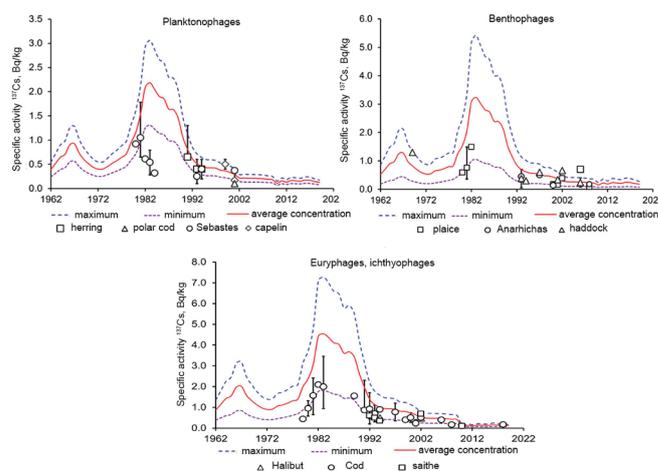


Fig. 3. Calculated specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in the muscle tissue of fish of different trophic levels. Discrete points show observational data. The lines show the results of model calculations: maximum – at a low rate of its excretion from the body; minimum – at a high rate of excretion; average – the average concentration of radionuclide in organisms.

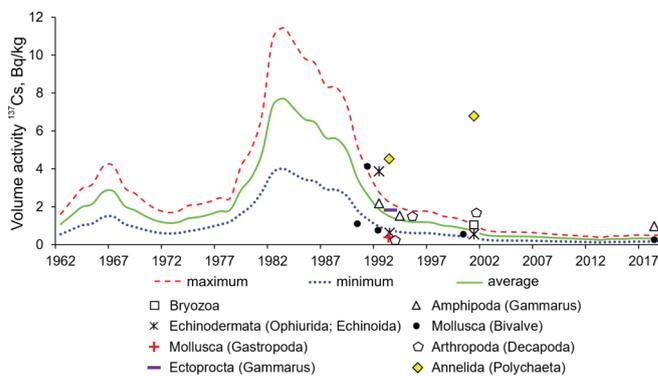


Fig. 4. Calculated specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in zoobenthos. Discrete points show observational data. The lines show the results of model calculations: maximum – at a low rate of its excretion from the body; minimum – at a high rate of excretion; average – average specific activity of radionuclide in organisms.

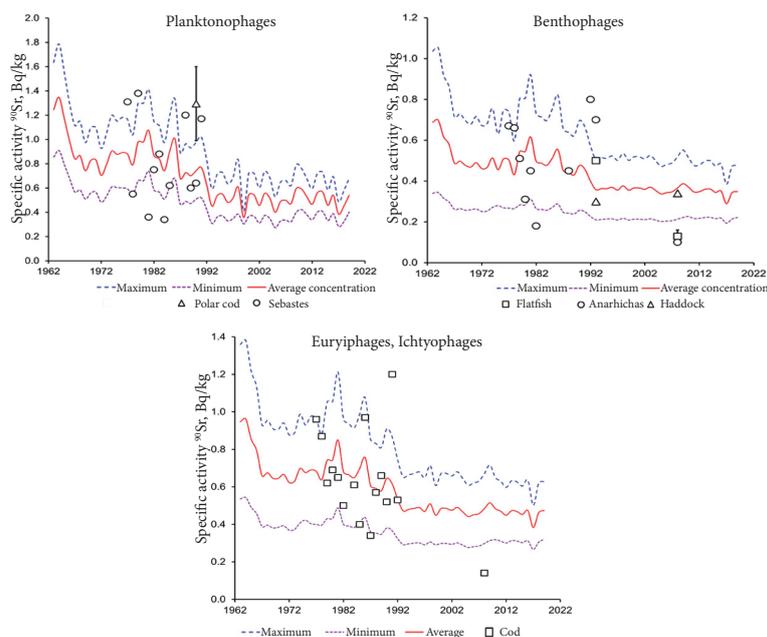


Fig. 5. Calculated specific activities of <sup>90</sup>Sr in the bone tissue of fish of different trophic levels. Discrete points show observational data. The lines show the results of model calculations: maximum – at a low rate of its excretion from the body; minimum – at a high rate of excretion; average – the average concentration of radionuclide in organisms.

Table 6. Distribution of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr activity in the components of the Barents Sea ecosystem (% of total content)

Ecosystem components	1950-e	1960-e	1970-e	1980-e*	1986	1990-e	2000-e	2011	2010-e*
	<b><sup>137</sup>Cs</b>								
Water	100	98.0	97.6	96.6	98.1	96.1	95.8	99.9	95.5
Suspension	—	0.2	0.3	0.3	0.1	0.3	0.3	0.0	0.4
Bottom sediments	—	1.8	2.1	3.1	1.7	3.6	3.9	0.1	4.2
Biota	—	0.009	0.005	0.009	0.073	0.002	0.001	0.006	0.001
<b><sup>90</sup>Sr</b>									
Water	100	98.4	97.9	98.0	97.4	98.0	98.4	99.8	98.4
Suspension	—	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Bottom sediments	—	1.3	1.8	1.8	2.1	1.7	1.4	0.0	1.4
Biota	—	0.010	0.006	0.009	0.299	0.002	0.001	0.001	0.001

\* The data for these periods are calculated without taking into account 1986 and 2011, respectively.

## References

1. D.G. Matishov, G.G. Matishov *Radioecology in Northern European Seas*, Germany, Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2004, 336 pp. DOI: 10.1007/978-3-662-09658-1.
2. Yu.V. Sivincev, S.M. Vakulovskij, A.P. Vasil'ev, V.L. Vysockij, A.T. Gubin, V.A. Danilyan, V.I. Kobzev, I.I. Kryshev, S.A. Lavkovskij, V.A. Mazokin, A.I. Nikitin, O.I. Petrov, B.G. Pologih, Yu.I. Skorik *Tekhnogennye radionuklidy v moryakh, omyvayushchikh Rossiyu [Technogenic Radionuclides in the Seas Surrounding Russia]*, RF, Moscow, Izdat, 2005, 624 pp. (in Russian).
3. S.V. Berdnikov *D. Sci. Thes. (Geography) [Dissertation for the degree of a Doctor of Geographical Sciences]*, Murmansk Marine Biological Inst. Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, RF, Murmansk, 2004, 320 pp. (in Russian).
4. V.A. Potanin, V.I. Turchaninov, T.A. Ershtadt, V.V. Tereshchenko *In Proc. Scientific-Practical Conference on Methods of Commercial Forecasting [Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferencii po metodam promyslovogo prognozirovaniya]*, RF, Murmansk, 1983, p. 84 (in Russian).
5. R.A. Aliev, V.A. Bobrov, St.N. Kalmykov, M.S. Melgunov, I.E. Vlasova, V.P. Shevchenko, A.N. Novigatsky, A.P. Lisitzin, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2007, 274(2), 315. DOI: 10.1007/s10967-007-1117-x.
6. C. Wedekind, H. Gabriel, I. Goroncy, G. Framcke, H. Kautsky *J. Environ. Radioactiv.* 1997, 35(2), 173. DOI: 10.1016/S0265-931X(96)00049-5.
7. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopedelnykh gosudarstv v 1994 godu [The Radiation Situation in Russia and Neighboring Countries in 1994]*, RF, Obninsk, SPA "Tayfun" Publ., 1995, 60 pp. (in Russian).

8. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2010 godu*, [The Radiation Situation in Russia and Neighboring Countries in 2010], RF, Obninsk, SPA "Tayfun" Publ., 2011, 282 pp. (in Russian). ([https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/d19/ezhegodnik\\_ro\\_2010.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/d19/ezhegodnik_ro_2010.pdf)).
9. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2018 godu*, [The Radiation Situation in Russia and Neighboring Countries in 2018], RF, Obninsk, SPA "Tayfun" Publ., 2019, 324 pp. (in Russian). ([https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/653/ezhegodnik\\_ro\\_2018.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/653/ezhegodnik_ro_2018.pdf)).
10. **L.P. Bochkov, S.M. Vakulovskiy, A.I. Nikitin, E.G. Tertyshnik, V.B. Chumichev**  
*Russian Meteorology and Hydrology [Meteorologia i gidrologia]*, 1983, **8**, 79 (in Russian).
11. **Y. Gao, H. Drange, M. Bentsen & O. Johannessen**  
*J. Environ. Radioactiv.*, 2004, **71**(1), 1.  
DOI: 10.1016/S0265-931X(03)00108-5.
12. **N.I. Kvasha, S.A. Lavkovskij, V.I. Kobzev, V.N. Sadovnikov, A.B. Pleskov, V.N. Lyscov, S.M. Vakulovskij, V.N. Vavilkin, O.I. Petrov**  
*Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal (Zhurnal Rossiyskogo Khimicheskogo Obshchestva im. D.I. Mendeleeva) [Russ. J. General Chemistry]*, 2001, **XLV**(5-6), 142 (in Russian). (<http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2001-5-6/142.pdf>).
13. **N.A. Aibulatov**  
*Ekologicheskoe ekho kholodnoy voyny v moryakh Rossiyskoy Arktiki [An Ecological Response of the Cold War's Impact in the Russian Arctic Seas]*, RF, Moscow, GEOS Publ., 2000, 307 pp. (in Russian).
14. **M.V. Gerasimova**  
*Abstr. PhD. Thes. (Geography) [Abstract of Dissertation for the Degree of a Candidate of Geographical Sciences]*, Murmansk Marine Biological Inst. Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, RF, Murmansk, 2004, 22 pp. (in Russian).
15. *Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment, Technical Report Series, 422*, AT, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2004, 95 pp.
16. **G.G. Matishov**  
*In Zhizn i uslovia ee sushchestvovaniya v bentali Barentseva morya [Life and Conditions of Its Existence in the Benthos of the Barents Sea]*, USSR, Apatity, MMBI AN SSSR, 1986, pp. 5–26 (in Russian).
17. **G.G. Polikarpov, V.N. Egorov**  
*Morskaya dinamicheskaya radiohemoekologiya [Marine Dynamic Radiochemoecology]*, USSR, Moscow, Energoatomizdat, 1986, 176 pp. (in Russian).
18. **A.F. Alimov**  
*Vvedenie v produktsionnyuyu gidrobiologiyu [Introduction to Production Hydrobiology]*, USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, 152 pp. (in Russian).
19. **S.E. Jorgensen**  
*Ecological Modelling*, **6**, 1979, 199.
20. **M.A. Novikov**  
*Water Resources*, 2008, **35**(2), 212.  
DOI: 10.1007/s11268-008-2010-x.
21. ICES. 2006. *Report of the Arctic Fisheries Working Group (Denmark, Copenhagen, 19-28 April 2006)*, DK, Copenhagen, ICES, 2006, 594 pp.
22. *Kormovye resursy i pishchevye vzaimootnosheniya ryb Severnoy Atlantiki: Sb. nauch. tr. [Feed Resources and Food Relationships of North Atlantic Fish: Comp. Sci. Works]*, USSR, Murmansk, PINRO Publ., 1990, 228 pp. (in Russian).
23. *Sovremennyy bentos Barentseva i Karskogo morey [Benthos of the Barents and Kara Seas]*, RF, Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences publ., 2000, 486 pp. (in Russian).
24. **A.N. Kuznetsov, P. Dando, I.N. Shmelev, S.G. Denisenko, B.V. Efimov, A.M. Demidov, V.M. Shubko**  
*Biology Bulletin [Izvestiya RAN. Ser. biologicheskaya]*, 1995, №4, 467 (in Russian).
25. *Sostoyaniye biologicheskikh syrevykh resursov Barentseva morya i Severnoy Atlantiki na 2005 god [State of Biological Feedstock of the Barents Sea and the North Atlantic in 2005]*, RF, Murmansk, PINRO, 2005, 99 pp. (in Russian).