

УДК 546.36(268.45+268.52)
DOI: 10.7868/S25000640220204

ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ СТРОНЦИЯ-90 В БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

© 2022 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, Г.В. Ильин¹

Аннотация. Дан анализ многолетней эволюции поля концентрации ⁹⁰Sr в воде, донных отложениях и биоте Баренцева моря. Работа основана на оригинальных данных, собранных в ходе многолетних исследований морей Арктики. Получены новые представления о содержании и закономерностях распределения указанного радионуклида в различных элементах региональной морской экосистемы. В многолетней динамике концентраций ⁹⁰Sr существует устойчивая нисходящая тенденция. Линия тренда осложнена квазидвухлетними и семилетними циклами колебаний, которые вызваны, по-видимому, естественной динамикой атлантического транзита радиоактивности в Баренцево море. Современное поле концентрации ⁹⁰Sr характеризуется в последние 10 лет низким его содержанием в воде, донных осадках и биоте. Стабильно низкие концентрации поддерживаются малоактивными атмосферными выпадениями радионуклидов в Северной Атлантике и Баренцевом море в результате газоаэрозольных выбросов действующих реакторных установок АЭС и флота. Актуальным для Баренцева моря остается перенос трансатлантическими течениями вод, загрязненных сбросами жидких радиоактивных отходов радиохимическими комбинатами и атомной инфраструктурой Северной Европы. Местные точечные потенциальные источники радиации дают локальный эффект загрязнения на участках прибрежной зоны Кольского полуострова и Новой Земли.

Ключевые слова: радиоактивность, стронций-90, морская среда, донные осадки, рельеф дна, источники радиации.

EVOLUTION OF THE STRONTIUM-90 CONCENTRATION FIELD IN THE ECOSYSTEM OF THE BARENTS SEA

Academician RAS G.G. Matishov^{1,2}, G.V. Ilyin¹

Abstract. The analysis of the long-term evolution of the ⁹⁰Sr concentration field in water, sediments and biota of the Barents Sea is given. The writing is based on original data collected by the MMBI during long-term studies of the Arctic seas. Modern ideas about the content and distribution patterns of this radionuclide in various elements of the regional marine ecosystem have been obtained. There is a steady downward trend in the long-term dynamics of ⁹⁰Sr concentrations. The trend line is complicated by quasi-two-year and seven-year oscillation cycles, which are apparently caused by the natural dynamics of the Atlantic transit of radioactivity in the Barents Sea. The current ⁹⁰Sr concentration field is characterized by its low content in water, bottom sediments and biota in the last ten years. Stable low concentrations are caused by low-level atmospheric fallout in the North Atlantic and the Barents Sea as a result of gas-aerosol emissions from operating reactor installations of nuclear power plants and the fleet. The transfer of waters by transatlantic currents remains relevant for the Barents Sea. These waters are polluted by discharges of liquid radioactive waste by radiochemical plants and the nuclear infrastructure of Northern Europe. Domestic point potential sources of radiation give a local effect of pollution in the areas of the coastal zone of the Kola Peninsula and Novaya Zemlya.

Keywords: radioactivity, strontium-90, marine environment, bottom sediments, bottom relief, radiation sources.

¹ Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: gvilyin@mail.ru

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

ВВЕДЕНИЕ

В период ядерных испытаний и неконтролируемых сбросов опасных радиоактивных отходов (РАО) в морях Арктики не наблюдалось опасных концентраций искусственных радионуклидов. Основу искусственной радиоактивности в морской среде создавали изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr . Наибольшему загрязнению подвергалось Баренцево море, в бассейне которого проводились испытания ядерного оружия и слив жидких РАО судами атомного флота. К примеру, в воде Кольского залива в 1953 г. содержание ^{90}Sr составляло 54 Бк/м³, на порядок выше, чем в наши дни [1–4]. И до настоящего времени ^{137}Cs и ^{90}Sr составляют основу спектра техногенных радионуклидов в арктических водах. В 1950–90-е гг. вклад атмосферных и подводных ядерных взрывов на новоземельских полигонах в глобальное поступление радионуклидов закономерно снижался. В этот период содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в арктических и субарктических морских водах уменьшилось от 50–400 до 2–20 Бк/м³ и от 10–100 до 1–7 Бк/м³ соответственно. Спад загрязнения происходил не только из-за прекращения испытаний ядерного оружия. Кроме этого свою роль сыграли несколько факторов – сокращение сброса в море жидких РАО европейскими радиохимическими заводами и судами атомного флота, естественный распад радионуклидов и самоочищение водоема. Поступление загрязненных атлантических вод из Норвежского моря оставалось для Баренцева моря основным источником искусственных радионуклидов на протяжении всего рассматриваемого периода [5–9]. По данным современных исследований (2010–2020 гг.), адвекция атлантических вод в моря Полярного бассейна остается главным фактором их радиационного загрязнения [10–11].

Радиоизотоп стронций-90 – бета-излучатель с периодом полураспада 28,8 лет. Он попадает в природную среду в виде аэрозолей при ядерных испытаниях, взрывах и авариях на атомных электростанциях, утечках РАО [4; 8]. Изучение радиоактивного загрязнения воды и донных отложений ^{90}Sr представляет интерес вследствие его биофильности и относительно повышенного накопления в организмах морских животных, донных и пелагических рыб. Стронций-90 поглощается наряду с кальцием костными тканями, накапливается и длительное время удерживается в скелетах животных [12–14]. В Арктике основными районами мирово-

го рыболовства являются Баренцево и Норвежское моря. Ежегодно все страны – участники промысла вылавливают до 2–3 млн т ценных рыб. В современных выловах (2013–2018 гг.) концентрация ^{90}Sr в скелетах рыб варьирует от 0,5 до 4–5 Бк/кг, что представляет интерес для подробных радиоэкологических исследований [15].

Развитие в XXI веке атомной энергетики определяет необходимость проводить радиоэкологический мониторинг морских и озерных водоемов за пределами 30-километровой зоны вокруг АЭС, акцентировать внимание на особенностях накопления ^{90}Sr в костной ткани морских животных, которых население употребляет в пищу.

Цель работы – оценить современный фон представляющего биологическую опасность ^{90}Sr и охарактеризовать географические закономерности его распространения в воде, донных осадках и морской биоте Баренцева моря. В том числе ставилась задача изучить эволюцию поля его концентраций в баренцевоморской среде с изменением роли ключевых источников радиоизотопов в современных условиях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Изучение проблем радиационной экологической океанологии в 1990–2019 гг. опиралось прежде всего на собственные экспедиции (рис. 1) и базу данных.

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (ММБИ РАН) провел исследования в 150 экспедициях на собственном научно-исследовательском судне «Дальние Зеленцы», судах Федерального государственного унитарного предприятия «Атомфлот», Гидрографической службы Военно-морского флота в Баренцевом, Карском морях, в море Лаптевых, в Восточно-Сибирском море, в прибрежной зоне Кольского полуострова, Шпицбергена, Новой Земли, Земли Франца-Иосифа. Регулярно выполнялся радиоэкологический мониторинг по разрезу вдоль «Кольского меридиана» (33°30' в.д.). Кроме этого, в 1997–2021 гг. Азовский филиал ММБИ РАН, а затем Южный научный центр Российской академии наук провели около 30 рейсов для сравнительного изучения радиационной обстановки в Азовском, Черном и Каспийском морях.

Сбор проб и образцов выполнен стандартным оборудованием в соответствии с современными ме-

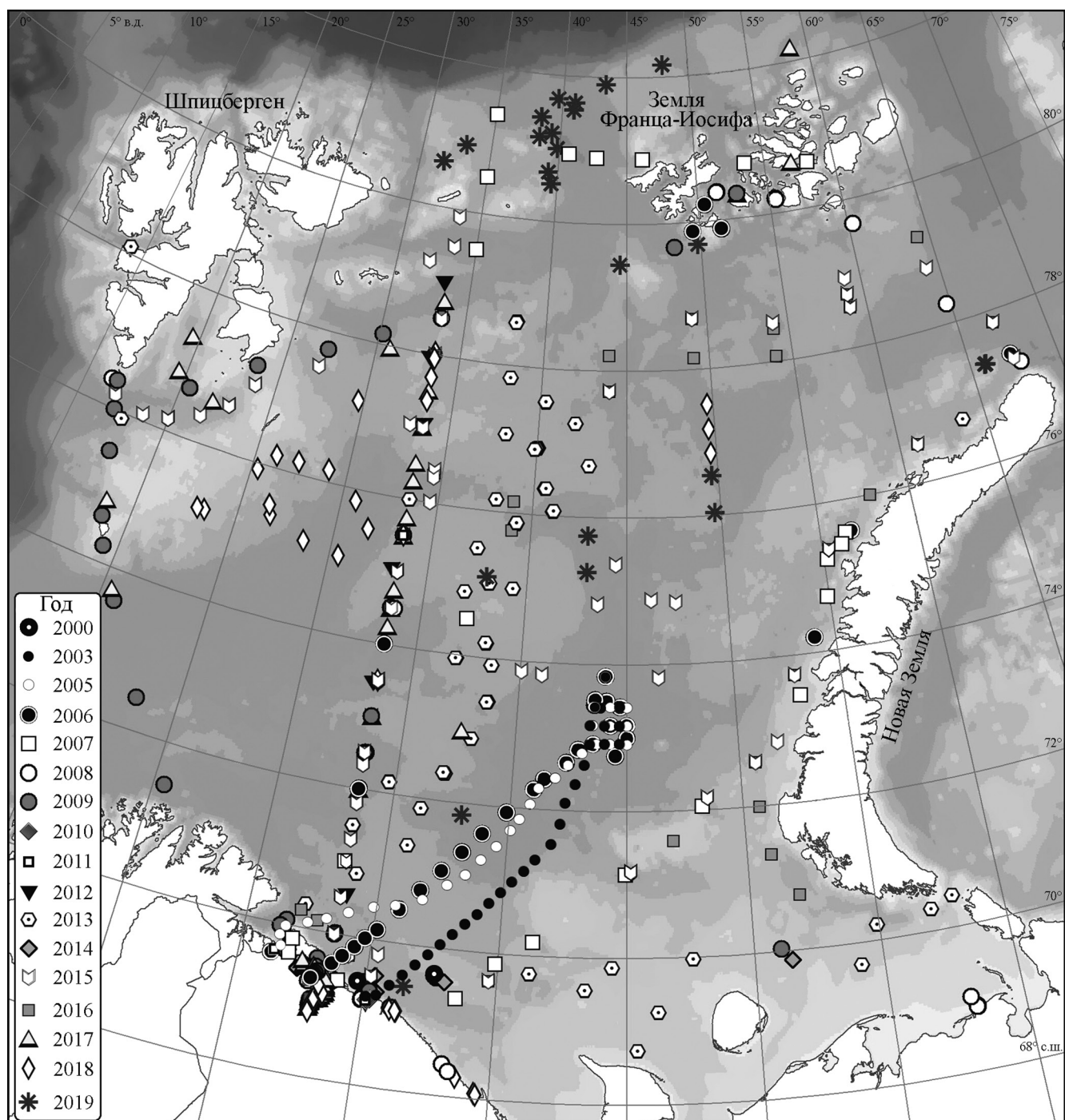


Рис. 1. Обзорная карта сбора проб и измерений концентрации ^{90}Sr в воде и донных отложениях Баренцева моря.
 Fig. 1. Overview map of sampling and measurements of ^{90}Sr concentration in water and bottom sediments in the Barents Sea.

тодиками, принятыми Международным агентством по атомной энергии, с применением розетки, пробоотборника Ван-Вина, гравитационной трубки, драги и донного трала. Радиометрический анализ проб выполнен в ММБИ РАН по аттестованным методикам. Удельная и объемная активность ^{137}Cs измерена на спектрометрах γ -излучения «InSpector-2000»,

рентгеновского и γ -излучения «b13237» («Saberra», США). Спектры проанализированы с помощью программного обеспечения Genie-2000. Определение удельной и объемной активности ^{90}Sr в пробах проведено радиохимическим методом, согласно которому активность ^{90}Sr устанавливается опосредованно, по активности равновесного ^{90}Y в счетных

образцах. Измерения выполнены на установке LS-6500 («Beckman Instruments Inc.», США).

Данные по удельной активности радиоизотопов в донных отложениях приведены в расчете на 1 кг сухой массы осадка, в рыбах – на 1 кг сырой массы. Статистические расчеты выполнены с помощью специализированной программы SPSS Statistics.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В течение 40-летнего периода наблюдений динамика концентраций ^{90}Sr в морской среде демонстрировала тенденцию неравномерного снижения от максимума в период массовых выбросов техногенных радионуклидов в океан и атмосферу до современного минимума, который устойчиво удерживается на протяжении последнего десятилетия. В 1960-е гг. содержание ^{90}Sr в поверхностных водах Баренцева, Белого, Карского морей и моря Лаптевых было наибольшим, от 20 до 50 Бк/м³. Быстрое снижение концентрации в 3–5 раз произошло в период 1963–1992 гг. [2]. В водах европейских морей – Северного, Норвежского, Гренландского, откуда загрязненные воды поступают в Баренцевоморский бассейн, – также произошло снижение объемной активности ^{90}Sr до 2–21 Бк/м³ [1; 5; 7].

В 1990-е гг. содержание ^{90}Sr в Баренцевом море снизилось до 1–7 Бк/м³. В 1992 г. поверхностные воды у его западной границы, у мыса Нордкап, содержали 4,3 Бк/м³, а на востоке, в Печорском море, – 3,7 Бк/м³. Максимальная концентрация в центральных частях моря в 2000-х гг. не превышала 14 Бк/м³.

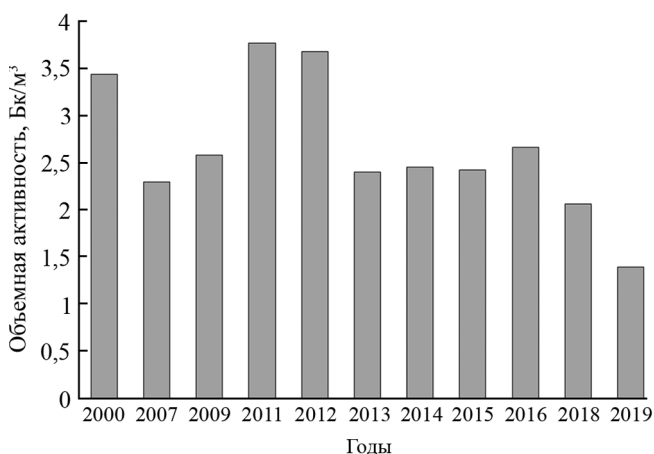


Рис. 2. Динамика средней годовой объемной активности ^{90}Sr в воде Баренцева моря.

Fig. 2. Dynamics of the average annual volume activity of ^{90}Sr in the water of the Barents Sea.

В 2010–2013 гг. содержание ^{90}Sr в воде изменялось в диапазоне 0,4–13 Бк/м³. Было рассчитано, что двукратное снижение его объемной активности происходило каждые 13,5 лет в результате самоочищения моря и естественного распада ^{90}Sr [16]. В 2007–2017 гг. в акватории Баренцева моря происходило снижение объемной активности ^{90}Sr до малозначимых величин – от 0,1–0,5 до 1,5–2 Бк/м³. Такие низкие значения были зафиксированы в 60 % исследованных проб воды, однако местами наблюдалось повышение активности до 4–5 Бк/м³. В водах атлантического, баренцевоморского и арктического происхождения, циркулирующих на шельфах архипелагов Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля, по наблюдениям 2017–2019 гг., содержание ^{90}Sr на уровне 0,1–0,4 Бк/м³ было отмечено в 90 % проб. Локально в 10 % проб содержание было более высоким – 1,6–2,1 Бк/м³ [11; 17].

Представления о многолетней динамике средней концентрации ^{90}Sr в воде Баренцева моря можно получить из рисунка 2. Расчеты показали, что в имеющихся у нас ежегодных выборках достоверно различаются средние концентрации за 2007, 2009, 2011, 2012, 2014 и 2016 гг. На основе этого в динамике концентраций можно выделить короткопериодные квазисемилетние циклы изменчивости с нисходящей составляющей (рис. 2). Причиной цикличности, по-видимому, являются колебания атлантического транзита радиоизотопов через западную границу моря [17].

По отношению к донным осадкам циркулирующие сверху водные массы являются источником радиоизотопного загрязнения. На шельфах Баренцева, Норвежского, Карского, Белого и других арктических морей радиоактивные частицы осаждаются в соответствии с процессами седиментации в океане. Наименее прочно ^{90}Sr удерживается песками и гравием. Закономерно, что песчаные и крупноалевритовые осадки возвышенностей, плато и прибрежных отмелей до глубин 130–150 м накапливают мало радиоизотопа – 0,1–0,5 Бк/кг. К примеру, на Мурманской банке (120–180 м) осадки содержали 0,1–0,4 Бк/кг ^{90}Sr . С поднятий морского дна происходит смыв радиоактивных отложений во впадины. Придонными течениями с подводных поднятий вымывается почти 95 % оседающего радиостронция [2]. Прослеживаются общие закономерности динамики концентраций ^{90}Sr в донных отложениях. Характерный для 1990-х гг. широкий диапазон его удельной активности от 0,3–4 до 16–22 Бк/кг сменяется в последующие годы относительно рав-

Таблица 1. Статистические характеристики динамики концентрации ^{90}Sr в водной массе и донных отложениях Баренцева моря (уровень значимости P_1 0,05)
Table 1. Statistical characteristics of the dynamics of ^{90}Sr concentration in the water mass and bottom sediments of the Barents Sea (significance level P_1 0.05)

Год Year	Водная масса Water mass			Донные отложения Bottom sediments		
	Количество наблюдений / Number of observations	Среднее / The average	Ошибка среднего / Error of mean	Количество наблюдений / Number of observations	Среднее / The average	Ошибка среднего / Error of mean
2000	5	3,44	0,77	–	–	–
2006	–	–	–	17	1,11	0,22
2007	12	2,09	0,42	26	0,55	0,13
2008	–	–	–	12	0,77	0,31
2009	11	2,58	0,54	12	1,18	0,36
2011	13	3,77	0,27	6	0,58	0,04
2012	7	3,68	0,25	3	2,38	0,92
2013	46	2,40	0,21	24	0,89	0,24
2014	14	2,45	0,26	–	–	–
2015	23	2,42	0,32	21	1,27	0,29
2016	41	2,66	0,20	25	1,46	0,33
2018	19	2,17	0,39	14	1,12	0,19
2019	17	1,30	0,29	18	0,61	0,29

номерно распределенной и низкой активностью – 4–6 Бк/кг. В 2010–2016 гг. загрязнение осадков Баренцева и Карского морей оценивалось уровнем 0,2–2 Бк/кг. В мелких алевритах и глинистых илах Восточно-Новоземельского желоба накапливалось 1–4 Бк/кг ^{90}Sr . Локально (10–25 % измерений) еще отмечалась повышенная удельная активность – 4,5–5,5 Бк/м³ [10; 17]. Исследования 2017–2019 гг. показали, что пески, алевриты, глинистые алевриты в прибрежной зоне шельфа – Кольском, Мотовском заливах, вокруг архипелагов Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, вдоль Кольского побережья – содержат от 0,1–0,8 до 2,1–2,4 Бк/кг ^{90}Sr . Но в 10 % проб его содержание составляло менее 0,1 Бк/кг. В Центральном желобе и других обширных впадинах шельфа с глубинами более 300 м его концентрация в осадках повышена до 0,8–1 Бк/кг. Здесь в алевритах и в глинистых илах (фракции размером 0,01–0,001 мм) радионуклиды удерживаются более устойчиво по сравнению с крупнозернистыми отложениями. Годовые колебания средних концентраций ^{90}Sr в осадке при широком доверительном интервале менее выражены, чем в воде, хотя парное сравнение ежегодных выборок подтверждает достоверность различий средних во временном

ряду, как и в водной среде (табл. 1). Отсутствие видимой цикличности колебаний удельной активности можно объяснить консервативностью среды и длительностью осадконакопления. Стронций слабо сорбируется взвешенным веществом и присутствует в морской среде преимущественно в растворенной форме.

В целом же в XXI веке наблюдалось относительно равномерное загрязнение стронцием-90 во всем бассейне, с вариациями, соответствующими географическим условиям поступления радионуклидов и накопления осадков.

В организм морских животных стронций-90 поступает с пищей. Являясь биохимическим аналогом кальция, он концентрируется в костях животных [13–15]. Его наибольшее содержание в костной ткани жителей северного полушария было зафиксировано в 1963–1965 гг. Тогда этот скачок был вызван глобальными выпадениями радиоактивных осадков при интенсивных испытаниях ядерного оружия в 1961–1962 гг. [2]. В тканях сайды *Pollachius virens* (Linnaeus, 1758) в 1963 г. содержание ^{90}Sr составило 90 Бк/кг сырой массы. В треске, зубатке, пикше содержалось 40–75 Бк/кг [18]. Возможны различия в поглощении радионуклидов разными видами рыб.

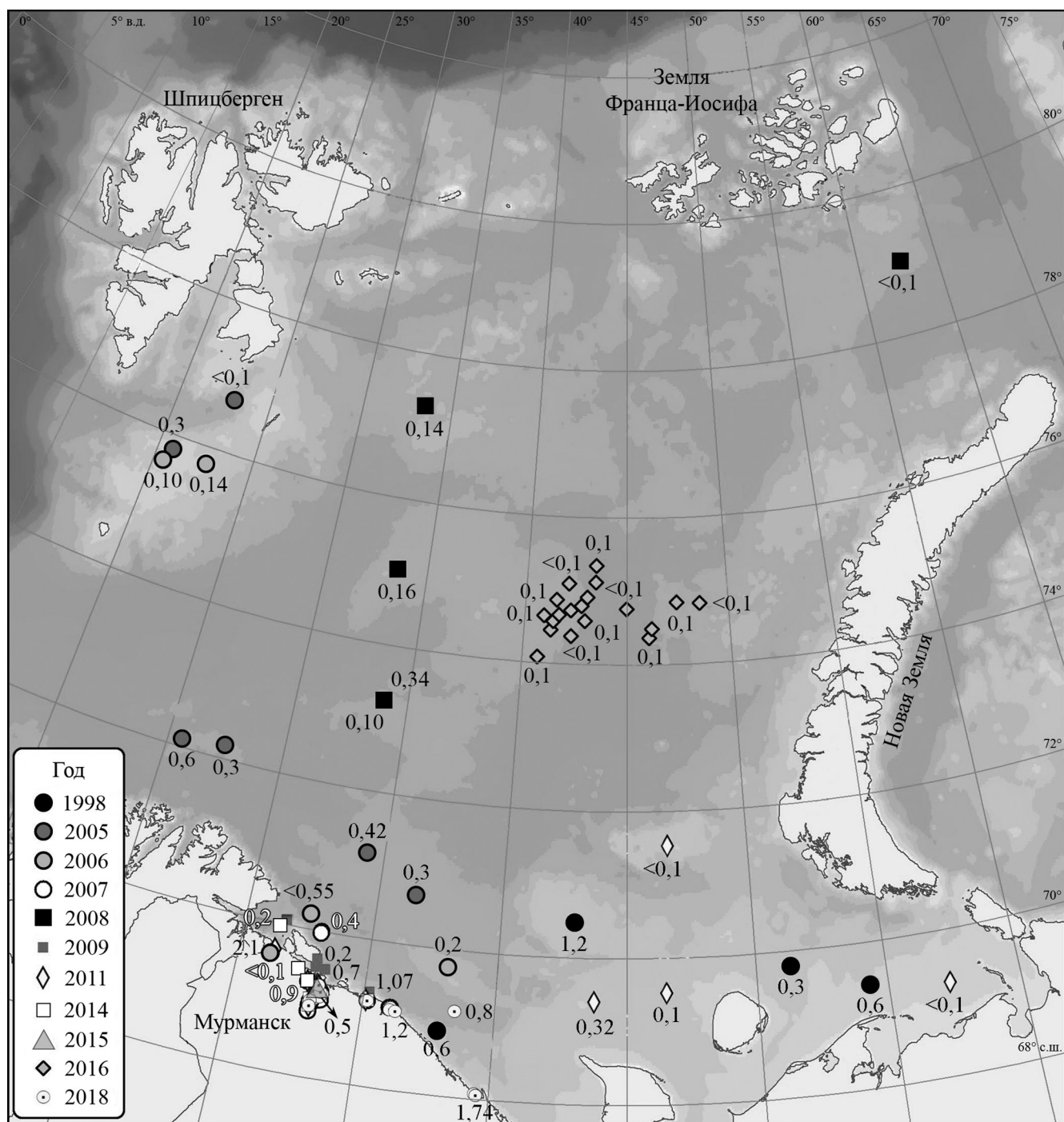


Рис. 3. Обзорная карта сбора проб и измерений концентрации ^{90}Sr в гидробионтах Баренцева моря.
 Fig. 3. Overview map of sampling and measurements of ^{90}Sr concentration in hydrobionts of the Barents Sea.

В период общего снижения концентрации стронция-90 в баренцевоморской среде его содержание в биоте также снижалось. В 1992 г. в мышечно-жировой массе высших консументов – китов – накопление радиоизотопа составляло 0,9 Бк/кг. Костные ткани рыб, выловленных в промысловых районах открытого моря и в Кольском заливе, подвержен-

ном импактному повышенному радиационному загрязнению, в 1990–2000-е гг. (рис. 3) содержали стронций-90 в количестве 0,3–0,6 Бк/кг [2; 15; 19]. После 2010-х гг. линия тренда концентрации искусственных радионуклидов в гидробионтах вышла на плато, отражая их минимальное накопление [15]. В течение последнего десятилетия удель-

ная активность ^{137}Cs в костно-мышечной массе рыб (тресковых, камбаловых) слабо варьировала от 0,1 до 0,3 Бк/кг, а ^{90}Sr – от значений <0,01 до 1,2 Бк/кг. В 2018–2020 гг. промысловые виды рыб (треска, пикша, сайда, камбала-ерш) в прибрежной зоне Баренцева моря, включая Кольский залив и Печорское море, также содержали ^{90}Sr до 1,2 Бк/кг сырой массы, а ^{137}Cs – 0,2 Бк/кг. Это количество на два порядка меньше санитарных норм для пищевой рыбной продукции [20].

В современных условиях поступление искусственных радионуклидов в моря Северного Ледовитого океана происходит слабыми потоками от двух главных источников. Один из них – прямое поступление радиоактивных частиц из окружающей атмосферы. Другой – транзит загрязнения водными массами из Атлантики.

Транзит радионуклидов с атлантическими водами через западную границу моря и отчасти из Полярного бассейна остается для Баренцева моря главным источником ^{90}Sr и ^{137}Cs даже после нормирования сброса загрязнений европейскими радиохимическими комбинатами в конце 1980-х гг. [10; 16; 17]. Дополнительное загрязнение атлантических вод происходит за счет глобальных атмосферных выпадений радиоизотопов над акваторией Северной Атлантики. В бассейне Баренцева моря радионуклиды распространяются и перераспределяются через разветвленную систему теплых течений.

Атмосферные выпадения вносили и вносят существенный вклад в радиоактивное загрязнение моря. В 1950–1960-е гг. главным источником этих выпадений были ядерные взрывы на Новой Земле. После 1963 г. интенсивность радиоактивных выпадений над арктическим бассейном снижена и поддерживается глобальным перераспределением в атмосфере мелкодисперсных выбросов действующих реакторов атомных электростанций (АЭС), энергетических установок судов атомного флота. В настоящее время эксплуатируется 443 ядерных энергоблока на 190 АЭС, рабочий цикл которых включает плановые и неплановые (из-за дефектов оборудования) выбросы радиоактивных аэрозолей в атмосферу. Совокупная роль таких эмиссий в балансе радиационного загрязнения атмосферы требует постоянного внимания и оценки.

С 1986 г. Чернобыльская АЭС стала дополнительным источником радионуклидов в атмосфере Арктики. В 2011 г. после аварии на АЭС «Фукусима-1» также зафиксирован рост загрязнения атмо-

сферы арктической зоны. После прекращения ядерных испытаний и закрытия саркофагом Чернобыльской АЭС роль глобальных атмосферных выпадений в загрязнении европейских морей многократно снижена и менее очевидна.

Прямыми точечными источниками ^{90}Sr и ^{137}Cs в Баренцевом море являются объекты инфраструктуры атомного флота, включая хранилища радиоактивных отходов и ремонтные базы. Их воздействие ограничивается локальными участками загрязнения в прибрежной зоне – губами, заливами, эстуариями.

Таким образом, к 2013–2017 гг. в Баренцевом море по степени радиационного загрязнения сформировались два типа акваторий.

Первый тип – участки Кольского побережья, подверженные эмиссии радионуклидов. Один из участков – губа Андреева в эстуарной системе губы Западная Лица (Мотовский залив). В губе расположено хранилище радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. В алевритах и илах этой губы содержание ^{90}Sr составляет 0,6–3,4 Бк/кг. Вблизи хранилища его концентрация увеличена до 36 Бк/кг. В Кольском заливе такие участки прилегают к хранилищам РАО на территории ФГУП «Атомфлот» (г. Мурманск) и базам флота в северном колене. На этих объектах систематические или эпизодические утечки, аэрозольные выбросы при ремонтах и обслуживании атомоходов создают относительно повышенный уровень загрязнения воды и донных отложений залива.

Второй тип – акватория Баренцева моря и участки шельфа, удаленные от источников радиоактивности. Здесь поле концентраций ^{90}Sr формируется в соответствии со схемой циркуляции атлантических вод, особенностями морфологии дна и седиментации. На этих участках радиационное загрязнение морской среды стабилизировалось в настоящее время на низком уровне.

ВЫВОДЫ

В многолетней динамике полей радионуклидов выражена тенденция снижения концентраций ^{90}Sr . Изменения радиационной активности в Баренцевом море более чем за 50-летний период свидетельствуют о снижении значимости важных прежде источников техногенных радиоизотопов. В то же время в последнее десятилетие в воде, донных отложениях и биоте бассейна сформировался устойчивый региональный фон низкой искусственной радиации.

Стабильный и низкий уровень концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs поддерживается за счет слабоактивных атмосферных выпадений в Северной Атлантике и Баренцевом море. В свою очередь глобальный депозит радиоактивных аэрозолей в атмосфере поддерживается постоянными газоаэрозольными выбросами действующих реакторов гражданского и военного назначения. Совокупная роль таких эмиссий требует внимания и оценки в балансе радиационного загрязнения атмосферы как арктических, так и южных морей. По-прежнему остается актуальным атлантический транзит стоков низкофоновых жидких РАО от радиохимических заводов и инфраструктуры европейских АЭС, дополняемый атмосферными выпадениями.

В многолетней динамике концентраций ^{90}Sr в воде и донных отложениях отмечаются достоверно различимые годовые колебания. В водной среде они характеризуются короткопериодными циклами, связанными, вероятно, с цикличностью атлантического транзита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. 1985. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиохимических заводов. *Атомная энергия*. 58(6): 445–449.
- Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. 2001. *Радиационная экологическая океанология*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 417 с.
- Kautsky H. 1988. Radioactive Substances. In: *Pollution of the North Sea. An assessment*. Berlin, Springer-Verlag: 390–399.
- Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П., Высоцкий Л.В., Губин А.Т., Данилян В.А., Кобзев В.И., Крышев И.И., Ловковский С.А., Мазокин В.А., Никитин А.И., Петров О.И., Пологих Б.Г., Скоркин Ю.И. 2005. *Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиозоологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»)*. М., ИздАТ: 624 с.
- Aarkrog A., Dahlgaard H., Hansen H., Holm E., Hallstadius L., Rioseco J., Christensen G. 1985. Radioactive Tracer Studies in the Surface Waters of the Northern Atlantic Including the Greenland Norwegian and Barents Sea. *Rit. Fiskideldar*. 9: 37–42.
- Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Føyn L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112.
- Kershaw P.J., Baxter A. 1995. The transfer of reprocessing waste from northwest Europe to the Arctic. *Deep-Sea Research II*. 42(6): 1413–1448.
- Nilsen T., Kudrik I., Nikitin A. 1996. *The Russian Northern Fleet: Sources of Radioactive Contamination*. Oslo, Bellona Foundation: 169 p.
- Nies H., Harms I.H., Karcher M.J., Dethleff D., Bahe C., Kuhlmann G., Oberhuber J.M., Backhaus J.O., Kleine E., Loewe P., Matishov D., Stepanov A., Vasiliev O.F. 1998. Anthropogenic Radioactivity in the Nordic Seas and the Arctic Ocean – Results of a Joint Project. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 50(4): 313–343.
- Gwynn J.P., Heldal E.H., Gäfvert T., Blinova O., Eriksson M., Svaeren I., Brungot A.L., Stråberg E., Møller B., Rudjord A.L. 2016. Radiological status of the marine environment in the Barents Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 113: 155–162. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.06.003
- Ильин Г.В., Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Валуйская Д.А. 2020. Радиозоологическое состояние среды морских экосистем Арктики в условиях современного природопользования. В кн.: *Труды Кольского научного центра. Океанология. Вып. 7. Апатиты, КНЦ РАН: 260–274. doi: 10.37614/2307-5252.2020.11.4.013*
- Радиация. Дозы, эффекты, риск*. 1990. М., Мир: 79 с.
- Поликарпов Г.Г. 1971. *Радиозоология морских организмов*. М., Атомиздат: 295 с.
- Егоров В.Н. 2019. *Теория радиоизотопного и химического гомеостаза морских экосистем*. Севастополь, изд-во ФИЦ ИнБЮМ: 355 с. doi: 10.21072/978-5-6042938-5-0
- Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Валуйская Д.А., Кириллова Е.Э. 2020. Концентрация искусственных радионуклидов в биоте арктического шельфа в современных условиях (2013–2018 гг.). *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 494(1): 71–75. doi: 10.31857/S2686739720090133
- Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Павельская Е.В. 2011. Оценка потоков ^{137}Cs и ^{90}Sr в Баренцевом море. *Доклады Академии наук*. 439(6): 822–827.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории океанографии и радиозоологии ММБИ РАН, участвовавшим в экспедиционном сборе проб и лабораторном анализе материалов: Д.А. Валуйской, А.А. Дерябину, И.С. Усягиной и др. Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ММБИ РАН и государственного задания ЮНЦ РАН, № гр. проекта 122011900153-9.

17. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Кириллова Е.Э. 2019. Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков. Часть 2. Донные отложения. *Наука Юга России*. 15(4): 24–35. doi: 10.7868/S25001640190404
18. Føyn L., Sværen I. 1995. The Barents Sea, its fisheries and the past and present status of radioactive contamination and its impact on fisheries. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic. Proceedings of the Second International Conference (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Scientific Committee: 215–220.
19. Bouldakov V.V., Kryshev I.I., Rissanen K. 2002. Dose estimation for the population due to consumption of foodstuff from the Barents sea. In: *Thesis of the 5th international conference on environmental radioactivity in the Arctic and Antarctic (St Petersburg, Russia, 16–20 June 2002)*. St Peterburg, Scientific Committee: 21–23.
20. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.1078-01 (с изменениями на 6 июля 2011 года). *Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс»*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901806306?marker=6520IM> (дата обращения: 17.05.2022).

REFERENCES

1. Vakulovskiy S.M., Nikitin A.I., Chumichev V.B. 1985. [On the contamination of the Arctic seas with radioactive waste from Western European radiochemical plants]. *Atomnaya energiya*. 58(6): 445–449. (In Russian).
2. Matishov D.G., Matishov G.G. 2001. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya*. [Radiation ecological oceanology]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 417 p. (In Russian).
3. Kautsky H. 1988. Radioactive Substances. In: *Pollution of the North Sea. An assessment* Berlin, Springer-Verlag: 390–399.
4. Sivintsev Yu.V., Vakulovskiy S.M., Vasil'ev A.P., Vysotskiy L.V., Gubin A.T., Danilyan V.A., Kobzev V.I., Kryshev I.I., Lovkovskiy S.A., Mazokin V.A., Nikitin A.I., Petrov O.I., Pologikh B.G., Skorkin Yu.I. 2005. *Tekhnogenyye radionuklidy v moryakh, omyvayushchikh Rossiyu. Radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnykh otkhodov v arkticheskie i dal'nevostochnye morya ("Belaya kniga-2000")*. [Technogenic radionuclides in the seas surrounding Russia. Radioecological consequences of radioactive waste disposal in the Arctic and Far Eastern Seas ("White Paper-2000")]. Moscow, IzdAT: 624 p. (In Russian).
5. Aarkrog A., Dahlgaard H., Hansen H., Holm E., Hallstadius L., Riøseco J., Christensen G. 1985. Radioactive Tracer Studies in the Surface Waters of the Northern Atlantic Including the Greenland Norwegian and Barents Sea. *Rit. Fiskideldar*. 9: 37–42.
6. Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Føyn L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112.
7. Kershaw P.J., Baxter A. 1995. The transfer of reprocessing waste from northwest Europe to the Arctic. *Deep-Sea Research II*. 42(6): 1413–1448.
8. Nilsen T., Kudrik I., Nikitin A. 1996. *The Russian Northern Fleet: Sources of Radioactive Contamination*. Oslo, Bellona Foundation: 169 p.
9. Nies H., Harms I.H., Karcher M.J., Dethleff D., Bahe C., Kuhlmann G., Oberhuber J.M., Backhaus J.O., Kleine E., Loewe P., Matishov D., Stepanov A., Vasiliev O.F. 1998. Anthropogenic Radioactivity in the Nordic Seas and the Arctic Ocean – Results of a Joint Project. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 50(4): 313–343.
10. Gwynn J.P., Heldal E.H., Gåfvert T., Blinova O., Eriksson M., Svaeren I., Brungot A.L., Strålberg E., Møller B., Rudjord A.L. 2016. Radiological status of the marine environment in the Barents Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 113: 155–162. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.06.003
11. Ilyin G.V., Usyagina I.S., Kasatkina N.E., Valuyskaya D.A. 2020. [Radioecological status of arctic marine ecosystems and current ocean and coastal management]. In: *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra. Okeanologiya. Vyp. 7*. [Transactions of the Kola Scientific Centre. Oceanology. Series 7]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 260–274. (In Russian). doi: 10.37614/2307-5252.2020.11.4.013
12. *Radiatsiya. Dozy, efekty, risk*. [Radiation. Doses, effects, risk]. 1990. Moscow, Mir: 79 p. (In Russian).
13. Polikarpov G.G. 1971. *Radioekologiya morskikh organizmov*. [Radioecology of marine organisms]. Moscow, Atomizdat: 295 p. (In Russian).
14. Egorov V.N. 2019. *Teoriya radioizotopnogo i khimicheskogo gomeostaza morskikh ekosistem*. [Theory of radioisotope and chemical homeostasis of marine ecosystems]. Sevastopol, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences: 355 p. (In Russian). doi: 10.21072/978-5-6042938-5-0
15. Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Valuyskaya D.A., Kirillova E.E. 2020. Current levels of artificial radioisotopes in biota from the Arctic continental shelf (2013–2018). *Doklady Earth Sciences*. 494(1): 730–734. doi: 10.1134/S1028334X20090135
16. Matishov G.G., Matishov D.G., Usyagina I.S., Kasatkina N.E., Pavel'skaya E.V. 2011. Assessment of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr fluxes in the Barents Sea. *Doklady Earth Sciences*. 439(2): 1190–1195. doi: 10.1134/S1028334X11080265
17. Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Kirillova E.E. 2019. [Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the seas of the Arctic Ocean at the turn of the 21st century. Part 2. Bottom sediments]. *Nauka Yuga Rossii*. 15(4): 24–35. (In Russian). doi: 10.7868/S25001640190404
18. Føyn L., Sværen I. 1995. The Barents Sea, its fisheries and the past and present status of radioactive contamination and its impact on fisheries. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic. Proceedings of the Second International Conference (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Scientific Committee: 215–220.
19. Bouldakov V.V., Kryshev I.I., Rissanen K. 2002. Dose estimation for the population due to consumption of foodstuff from the Barents sea. In: *Thesis of the 5th international conference*

on environmental radioactivity in the Arctic and Antarctic (St Petersburg, Russia, 16–20 June 2002). St Petersburg, Scientific Committee: 21–23.

20. [Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products. Sanitary and epidemiological rules and

regulations SanPiN 2.3.2.1078-01 (as amended on 6 July 2011)]. *Elektronnyy fond normativno-tekhnicheskoy i normativno-pravovoy informatsii Konsortsiума “Kodeks”*. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901806306?marker=6520IM> (accessed 17 May 2022). (In Russian).

Поступила 25.03.2022