

УДК [504.5:620.267](261.243)

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА (1973–2019)

© 2021 г. **И. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина, Н. Н. Павлова, И. В. Косых,
А. А. Бурякова, А. И. Крышев**

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Российская Федерация

E-mail: kryshev@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 05.11.2020; после доработки 17.12.2020;
принята к публикации 11.03.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.

Целью работы было оценить радиоэкологическое состояние морского водоёма — охладителя Ленинградской АЭС — Копорской губы Финского залива. Согласно международным основным нормам безопасности, принятым на генеральной конференции МАГАТЭ, этот вопрос имеет особую актуальность в связи с необходимостью обоснования защиты от промышленного радиационного воздействия не только человека, но и окружающей среды. Как исходные материалы для оценки использованы данные многолетнего мониторинга (1973–2019) содержания радионуклидов в морской воде, донных отложениях и гидробионтах в зоне наблюдения Ленинградской АЭС. В качестве показателей радиационного состояния морской среды применены контрольные уровни содержания радионуклидов в морской воде и донных отложениях, порядок расчёта которых определён в Рекомендациях Росгидромета Минприроды России Р 52.18.852-2016 и Р 52.18.873-2018. В этих рекомендациях, разработанных специалистами ФГБУ НПО «Тайфун», представлена методика оценки радиоэкологического состояния морской среды по уровню активности радионуклидов на основе принципов, обеспечивающих сохранение благоприятной окружающей среды и морских гидробионтов, а также радиационную защиту человека. При наличии в морской среде смеси радионуклидов должно быть выполнено условие непревышения единицы для суммы отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде (донных отложениях) к соответствующим значениям контрольных уровней. По данным мониторинга в ранний период эксплуатации АЭС (1973–1985), в компонентах морской экосистемы присутствовал широкий спектр техногенных радионуклидов. Наряду с ^{137}Cs заметный вклад в загрязнение морской воды и донных отложений вносили ^{54}Mn и ^{60}Co , контрольные уровни для которых в морской воде, в отличие от таковых ^{137}Cs , определяются по экологическому, а не радиационно-гигиеническому критерию. Зарегистрировано присутствие техногенных радионуклидов в водорослях на расстоянии свыше 10 км от АЭС. Отмечен биогенный перенос коррозионных радионуклидов (^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn) рыбой в реку, впадающую в Копорскую губу. Чернобыльская авария привела к заметному увеличению загрязнения Копорской губы техногенными радионуклидами. По сравнению с доаварийным периодом значение суммы отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде к соответствующим значениям контрольных уровней в мае — декабре 1986 г. возросло в 100 раз, а в донных отложениях — в 30 раз. Основной вклад в загрязнение компонент морской экосистемы в 1986 г. вносили ^{137}Cs и ^{134}Cs . В настоящее время загрязнение морской воды и донных отложений Копорской губы определяется в основном ^{137}Cs и находится, по данным наблюдений, на относительно постоянном уровне, свидетельствующем о стабильности радиоэкологической обстановки в морском водоёме — охладителе АЭС.

Ключевые слова: Копорская губа Финского залива, Ленинградская АЭС, радиоэкологический мониторинг, морская вода, донные отложения, контрольные уровни радионуклидов, экологический и радиационно-гигиенический критерии, интегральный показатель загрязнения, многолетняя динамика

В соответствии с современной парадигмой радиационной безопасности, не только человек, но и другие организмы должны быть защищены от радиационных рисков; при этом необходимо подтверждать (а не исходить из предположения), что окружающая среда защищена от промышленного радиационного воздействия (Крышев и Сазыкина, 2013, 2014 ; *Radiation Protection...*, 2014).

Ленинградская АЭС (далее — ЛАЭС) расположена в 80 км на запад от г. Санкт-Петербурга, на побережье Копорской губы Финского залива Балтийского моря. Копорскую губу используют в качестве водоёма-охладителя ЛАЭС с 1973 г. В настоящее время на атомной станции эксплуатируются два энергоблока с реакторами РБМК-1000 и один энергоблок с реактором ВВЭР-1200. В 2021 г. планируется пуск ещё одного энергоблока с реактором ВВЭР-1200. Два энергоблока с реакторами РБМК-1000 остановлены для вывода из эксплуатации. Деятельность ЛАЭС сопровождается выбросами радиоактивных веществ в атмосферу и сбросами в морскую среду. В этом районе расположены и другие предприятия атомно-промышленного комплекса — Научно-исследовательский технологический институт имени А. П. Александрова с комплексом экспериментальных ядерных установок, а также Ленинградское отделение филиала «Северо-Западный территориальный округ» «Федеральный экологический оператор», осуществляющее переработку и хранение радиоактивных отходов.

К настоящему времени накоплен уникальный опыт организации радиоэкологического мониторинга окружающей среды в районе расположения ЛАЭС, в том числе морского водоёма — охладителя, в который осуществляются сбросы радиоактивных веществ и на который воздействует комплекс нерадиационных факторов (тепловой сброс, химическое загрязнение, эвтрофирование, механическое травмирование организмов в водозаборных устройствах АЭС) (Крышев, 2017 ; Крышев и Рязанцев, 2010 ; *Эколого-геофизические аспекты...*, 1992). Территориально объектом мониторинга стал морской водоём — охладитель, а также прилегающая к нему территория водосборного бассейна с впадающими в Копорскую губу реками.

Копорская губа Финского залива площадью 255 км² относится к типу мелких полузамкнутых водоёмов с протяжённой границей водораздела с основной акваторией. Солёность воды изменяется в пределах 2–4 ‰. Дно водоёма в основном песчаное, местами встречаются илы и камни. Средняя глубина — около 12 м. Максимальные глубины (до 27 м) отмечены на границе с основной акваторией. Сброс нагретых вод ЛАЭС направлен в восточную часть Копорской губы площадью около 50 км² и средней глубиной 5 м. В восточную часть водоёма впадают три реки (Систа, Коваши и Воронка) с общим среднемноголетним расходом воды около 10 м³·с⁻¹. С учётом загрязнённости рек промышленно-бытовыми стоками можно считать, что именно эта часть Копорской губы (используемая как водоём-охладитель) наиболее подвержена влиянию антропогенных факторов в районе ЛАЭС.

Целью нашей работы было оценить радиоэкологическое состояние морского водоёма — охладителя Ленинградской АЭС (Копорская губа Финского залива) на основе данных многолетнего радиоэкологического мониторинга (1973–2019) и критериев, обеспечивающих сохранение благоприятной окружающей среды и морских гидробионтов, а также радиационную защиту человека.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Радиоэкологический мониторинг. На протяжении более чем 47 лет природоохранные подразделения Росгидромета, Научно-исследовательского технологического института, Радиового института и Ленинградской АЭС проводят наблюдения за содержанием техногенных

радионуклидов в морской воде, донных отложениях и морской биоте Копорской губы Финского залива (Блинова, 1998 ; Бондаренко и др., 2013 ; Вакуловский и Никитин, 1984 ; Крышев, 2017 ; Крышев и Блинова, 1991 ; Крышев и Рязанцев, 2010 ; Радиационная обстановка..., 1992–2020 ; Радиоактивное загрязнение районов АЭС, 1990). Для анализа содержания радионуклидов используют стандартные методы пробоотбора, радиохимического анализа, радиометрических и спектрометрических измерений (Методические рекомендации..., 1980, 1986 ; Наставление гидрометеорологическим станциям..., 2015 ; Руководство по организации..., 1990).

Наиболее детальный радиоэкологический мониторинг осуществляли в период выхода ЛАЭС с реакторами РБМК-1000 на максимальную мощность (1973–1985), а также в первые годы после Чернобыльской аварии (Крышев и Блинова, 1991 ; Крышев и Рязанцев, 2010). Ежемесячно в пробах заборных и сбросных каналов АЭС определяли содержание радионуклидов. Ежемесячно в период вегетации водных растений (апрель — октябрь) в пяти пунктах прибрежной акватории и круглогодично в сбросных каналах тёплых вод определяли активность радионуклидов в пробах морской воды, водных растений и донных отложений. Ежегодно измеряли активность радионуклидов в 20–30 пробах рыбы с сеток водозаборных сооружений АЭС и из уловов рыбаков (Блинова, 1998). Результаты мониторинга водоёма-охладителя ЛАЭС в дочернобыльский период обобщены для последующего анализа (табл. 1).

Таблица 1. Содержание техногенных радионуклидов в компонентах морского водоёма — охладителя на разном удалении от ЛАЭС (1973–1985)

Table 1. Technogenic radionuclides content in components of the marine cooling reservoir at different distances from the Leningrad NPP (1973–1985)

Место отбора проб	Радионуклиды				
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn
Морская вода, мБк·л ⁻¹					
Сбросные каналы	30 ± 3 (100 %)	32 ± 6 (100 %)	38 ± 14 (5 %)	33 ± 11 (7 %)	< MDA
1–3 км от ЛАЭС	27 ± 2 (100 %)	18 ± 2 (100 %)	31 ± 13 (4 %)	30 ± 9 (4 %)	< MDA
3–10 км	23 ± 2 (100 %)	11 ± 2 (100 %)	< MDA	< MDA	< MDA
Свыше 10 км	23 ± 2 (100 %)	10 ± 2 (100 %)	< MDA	< MDA	< MDA
Контрольный уровень в морской воде (Порядок расчёта..., 2016)	16 800	1220	270	610	116
Донные отложения, Бк·кг ⁻¹ сырого веса					
Сбросные каналы	3,5 ± 1,6 (100 %)	4,0 ± 1,7 (100 %)	8 ± 3 (25 %)	8 ± 3 (12 %)	4,4 ± 2,1 (6 %)
1–3 км от ЛАЭС	2,0 ± 0,9 (100 %)	2,1 ± 1,0 (100 %)	14 ± 6 (10 %)	10 ± 4 (12 %)	11 ± 5 (5 %)
3–10 км	2,1 ± 1,1 (100 %)	2,0 ± 1,0 (100 %)	6 ± 3 (12 %)	7 ± 3 (7 %)	< MDA
Свыше 10 км	1,5 ± 0,8 (100 %)	1,6 ± 0,7 (100 %)	0,2 ± 0,1 (7 %)	< MDA	< MDA
Контрольный уровень в донных отложениях (Порядок расчёта..., 2019)	2500	1500	810	1800	2400

Продолжение на следующей странице...

Место отбора проб	Радионуклиды				
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{54}Mn	^{60}Co	^{65}Zn
Водные растения, Бк·кг ⁻¹ сырого веса					
Сбросные каналы	1,8 ± 0,6 (100 %)	5,2 ± 1,4 (100 %)	18 ± 6 (43 %)	17 ± 5 (41 %)	13 ± 4 (12 %)
1–3 км от ЛАЭС	1,7 ± 0,7 (100 %)	4,8 ± 1,5 (100 %)	15 ± 5 (31 %)	15 ± 5 (33 %)	10 ± 4 (11 %)
3–10 км	1,7 ± 0,7 (100 %)	3,3 ± 1,5 (100 %)	5,2 ± 1,9 (30 %)	7 ± 3 (19 %)	10 ± 4 (11 %)
Свыше 10 км	1,2 ± 0,5 (100 %)	1,6 ± 0,7 (100 %)	5,2 ± 2,0 (10 %)	4,4 ± 1,8 (19 %)	7 ± 3 (7 %)
Рыбы, Бк·кг ⁻¹ сырого веса					
Сбросные каналы					
Плотва <i>Rutilus rutilus</i> (Linnaeus, 1758)	2,3 ± 0,7 (100 %)	1,7 ± 0,5 (100 %)	18 ± 6 (30 %)	11 ± 3 (52 %)	70 ± 27 (43 %)
Копорская губа					
Плотва <i>R. rutilus</i>	1,8 ± 0,7 (100 %)	1,5 ± 0,5 (100 %)	1,5 ± 0,6 (7 %)	10 ± 3 (14 %)	60 ± 21 (28 %)
Салака <i>Clupea harengus</i> <i>membras</i> Linnaeus, 1760	1,3 ± 0,5 (100 %)	2,0 ± 0,7 (100 %)	0,3 ± 0,1 (4 %)	5,4 ± 1,9 (12 %)	12 ± 5 (8 %)
Окунь <i>Perca fluviatilis</i> Linnaeus, 1758	1,5 ± 0,5 (100 %)	2,7 ± 0,8 (100 %)	6,3 ± 2,5 (20 %)	10 ± 3 (20 %)	14 ± 5 (10 %)
Реки					
Плотва <i>R. rutilus</i>	1,7 ± 0,7 (100 %)	1,3 ± 0,5 (100 %)	3,7 ± 1,3 (17 %)	1,9 ± 0,7 (17 %)	34 ± 11 (17 %)

Примечание: в скобках указана частота определения радионуклида выше MDA по данным мониторинга; MDA (minimum detectable activity) — минимально детектируемая активность (5 мБк·л⁻¹ для морской воды; 0,2 Бк·кг⁻¹ для донных отложений; 0,6 Бк·кг⁻¹ для водных растений и рыбы).

Note: in parentheses, the frequency of radionuclide detection above MDA according to monitoring data is indicated; MDA is the minimum detectable activity (5 mBq·L⁻¹ for seawater; 0.2 Bq·kg⁻¹ for bottom sediments; 0.6 Bq·kg⁻¹ for water plants and fish).

Кроме радионуклидов (см. табл. 1), в пробах донных отложений в ряде случаев (1–5 %) определяли ^{51}Cr , ^{58}Co , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{134}Cs (Крышев и Блинова, 1991). В пробах морских растений в акватории Копорской губы, наряду с радионуклидами, в 4–28 % случаев регистрировали более широкий спектр техногенных радионуклидов, чем в пробах морской воды и донных отложений: ^{51}Cr , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce (Радиоактивное загрязнение районов АЭС, 1990).

Существенное влияние на формирование радиационной обстановки в районе ЛАЭС, в том числе в Копорской губе Финского залива, оказала авария на Чернобыльской АЭС (Блинова, 1998 ; Крышев и Блинова, 1991 ; Крышев и Рязанцев, 2010 ; Радиоактивное загрязнение районов АЭС, 1990). Радиоактивное облако аварийного выброса достигло района ЛАЭС 28.04.1986. В результате атмосферных выпадений произошло загрязнение водосборной территории Копорской губы, морской воды, донных отложений и биоты. После распада ^{131}I (период полураспада — 8,04 суток) и других короткоживущих радионуклидов основную радиоэкологическую значимость в этой части дальнего чернобыльского следа приобрели ^{134}Cs (период полураспада — 2,06 года) и особенно долгоживущий ^{137}Cs (период полураспада — 30 лет), содержание которого в компонентах морской экосистемы возросло в 6–250 раз по сравнению с доаварийным уровнем (табл. 2).

Таблица 2. Динамика среднегодового содержания ^{137}Cs в компонентах прибрежной морской экосистемы в районе расположения Ленинградской АЭС (1985–1990)**Table 2.** Dynamics of ^{137}Cs average annual content in the coastal marine ecosystem components in the Leningrad NPP area (1985–1990)

Компонента экосистемы		Усреднённые данные по ежемесячным наблюдениям					
		1985	1986*	1987	1988	1989	1990
Морская вода, мБк·л ⁻¹		10 ± 3	1300 ± 570	290 ± 110	130 ± 40	56 ± 18	52 ± 15
Донные отложения, Бк·кг ⁻¹ сырого веса		1,5 ± 0,6	49 ± 19	19 ± 8	10 ± 4	10 ± 3	8 ± 3
Водные растения, Бк·кг ⁻¹ сырого веса		0,8 ± 0,3	200 ± 97	17 ± 7	25 ± 8	14 ± 6	12 ± 5
Рыба, Бк·кг ⁻¹ сырого веса	Салака <i>C. harengus membras</i>	1,7 ± 0,5	27 ± 11	36 ± 15	19 ± 7	14 ± 5	25 ± 11
	Окунь <i>P. fluviatilis</i>	3,5 ± 1,1	22 ± 10	123 ± 41	126 ± 39	113 ± 31	116 ± 39

Примечание: * — усреднённые данные за май — декабрь 1986 г.

Note: * denotes averaged data for May – December 1986.

Наиболее высокие уровни загрязнения ^{137}Cs практически для всех компонент морской экосистемы, кроме хищных видов рыб, зарегистрированы в 1986 г. Для хищных рыб наблюдали, начиная с 1987 г., эффект трофических уровней, который проявляется в повышенном накоплении радиоцезия, по сравнению с накоплением «мирных» видов, спустя год после аварийного загрязнения. Для большинства компонент морской экосистемы в дальнейшем зарегистрировано постепенное уменьшение содержания ^{137}Cs , однако даже в 1990 г. оно оставалось в 5–30 раз выше доаварийного уровня.

Определены современные значения содержания радионуклидов в компонентах прибрежной морской экосистемы Копорской губы Финского залива (табл. 3) (Бондаренко и др., 2013 ; Радиационная обстановка..., 1992–2020).

Таблица 3. Содержание радионуклидов в компонентах морской прибрежной экосистемы в районе расположения Ленинградской АЭС (2000–2019)**Table 3.** Radionuclide content in the coastal marine ecosystem components in the Leningrad NPP area (2000–2019)

Компонента экосистемы		Радионуклид					
		⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	¹⁴ C	³ H
Морская вода, мБк·л ⁻¹		12 ± 2	20 ± 4	26 ± 7*	< MDA	–	21 000 ± 10 000
Контрольный уровень для морской воды		16 800	1220	610	270	137	86 800 000
Донные отложения, Бк·кг ⁻¹ сырого веса		0,70 ± 0,16	19 ± 3	1,5 ± 0,7	0,9 ± 0,4	–	–
Контрольный уровень для донных отложений		2500	1500	1800	810	41	–
Рыба, Бк·кг ⁻¹ сырого веса	Плотва <i>R. rutilus</i>	0,20 ± 0,08	1,2 ± 0,3	–	–	150 ± 50**	56 ± 17**
	Окунь <i>P. fluviatilis</i>	0,30 ± 0,10	6,2 ± 1,3	–	–	63 ± 31**	38 ± 11**

Примечание: прочерк (–) означает отсутствие данных; * — по данным за 2002–2004 гг. (Радиационная обстановка..., 1992–2020); ** — по данным за 2012 г. (Бондаренко и др., 2013).

Note: a dash (–) denotes no data; * denotes data for 2002–2004 (Radiatsionnaya obstanovka..., 1992–2020); ** denotes data for 2012 (Bondarenko et al., 2013).

Согласно данным многолетнего мониторинга, по прошествии более чем 30 лет после Чернобыльской аварии концентрация ^{137}Cs в донных отложениях, морской воде и тканях рыб (окунь) в акватории Копорской губы всё ещё превышает доаварийный уровень. При этом существенно уменьшилось содержание коррозионных радионуклидов стационарного происхождения в морской воде и донных отложениях. Особую значимость приобрели тритий и углерод-14, имеющие как природное, так и техногенное происхождение.

Методы оценки радиационного состояния морской среды. В качестве критериев оценки радиационного состояния морского водоёма — охладителя ЛАЭС использованы контрольные уровни содержания техногенных радионуклидов в морской воде и донных отложениях, порядок расчёта которых определён в Рекомендациях Росгидромета Минприроды России ([Порядок расчёта...](#), 2019, 2016). В данных Рекомендациях впервые в отечественной и мировой практике приведена методика оценки качества морской среды на основе экологических и радиационно-гигиенических принципов, обеспечивающих сохранение благоприятной окружающей среды и биологического разнообразия, защиту водных экосистем и радиационную защиту человека.

Экологическим критерием при оценке контрольных уровней содержания радионуклида в морской воде принято считать критерий предельно допустимого радиационно-экологического воздействия (P_{\max}) на объекты морской биоты. Его значения — $1,0 \text{ мГр}\cdot\text{сут}^{-1}$ для морских позвоночных животных и $10 \text{ мГр}\cdot\text{сут}^{-1}$ для морских беспозвоночных животных и водных растений ([Оценка радиационно-экологического воздействия...](#), 2015 ; [Environmental protection...](#), 2009).

В связи с огромным видовым разнообразием биосферы и практической невозможностью оценить радиационное воздействие на каждую компоненту флоры и фауны методология радиационной безопасности окружающей среды разработана для сравнительно небольшого числа представительных видов биоты ([Оценка радиационно-экологического воздействия...](#), 2015 ; [Environmental protection...](#), 2009). Контрольный уровень i -го радионуклида в морской воде для k -го представительного объекта морской биоты $A_{i,k,\text{ЭК}}$, $\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$, рассчитан по формуле ([Крышев и др.](#), 2017 ; [Порядок расчёта...](#), 2016):

$$A_{i,k,\text{ЭК}} = \frac{P_{\max,k}}{(DCF_{i,k,1} \cdot CF_{i,k,2} + DCF_{i,k,2} \cdot \alpha'_{k,2} + 0,5 \cdot DCF_{i,k,2} \cdot K_{d,i,3} \cdot \alpha'_{k,3}) \cdot \tau}, \quad (1)$$

где $P_{\max,k}$ — критерий предельно допустимого радиационно-экологического воздействия на k -й представительный объект морской биоты, $\text{мГр}\cdot\text{сут}^{-1}$;

$DCF_{i,k,1}$ и $DCF_{i,k,2}$ — факторы дозовой конверсии для внутреннего и внешнего облучения соответственно k -го представительного объекта морской биоты от i -го радионуклида, $(\text{мкГр}\cdot\text{ч}^{-1})/(\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1} \text{ сырого веса})$;

$CF_{i,k,2}$ — коэффициент накопления i -го радионуклида в k -м представительном объекте морской биоты, $\text{л}\cdot\text{кг}^{-1}$;

$K_{d,i,3}$ — коэффициент распределения i -го радионуклида между морской водой и донными отложениями, $\text{л}\cdot\text{кг}^{-1}$;

$\alpha'_{k,2}$ и $\alpha'_{k,3}$ — доля времени, которую k -й представительный объект морской биоты проводит в воде и вблизи дна соответственно, безразмерный коэффициент;

τ — переводной коэффициент, равный $2,4 \cdot 10^{-2} (\text{мГр}\cdot\text{сут}^{-1})/(\text{мкГр}\cdot\text{ч}^{-1})$.

В соответствии с нормативными документами ([Оценка радиационно-экологического воздействия...](#), 2015 ; [Environmental protection...](#), 2009), в качестве референтных выбирают организмы из следующих объектов морской биоты: морские рыбы, моллюски, ракообразные, водоросли, млекопитающие. Непревышение наименьшего значения $A_{i,k,\text{ЭК}}$ для всех представительных

организмов, присутствующих в морской экосистеме, гарантирует устойчивое функционирование и сохранение видового разнообразия экосистемы в целом. Критическими организмами, которые характеризуются наименьшими значениями контрольных уровней содержания радионуклидов в морской воде, для большинства техногенных радионуклидов, обнаруживаемых системой радиоэкологического мониторинга в районе ЛАЭС, являются рыбы (Порядок расчёта..., 2016). В качестве представительных видов рыб морского водоёма — охладителя выбраны плотва *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758) и окунь *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Радиоактивное загрязнение районов АЭС, 1990), доступные для отлова в течение всего года и в зонах распространения сбросных вод, и в других участках, включая бассейны рек, впадающих в морской залив. Указанные виды нерестятся в водоёме-охладителе, в том числе в сбросных каналах; молодь держится в каналах постоянно в значительных количествах; крупные особи образуют скопления в зоне распространения подогретых вод, где их добывают в промысловых количествах. Существенно то, что данные виды размножаются в зарослях водной растительности, накапливающей радионуклиды. Икра и молодь плотвы и окуня испытывают повышенные дозовые нагрузки вместе с воздействием высоких температур (в летний период — выше +30 °С).

При расчёте контрольных уровней содержания радионуклидов в морской воде учитывают то, что она не употребляется для питьевых целей. В качестве радиационно-гигиенического критерия используют ограничение дозы облучения от потребления морепродуктов для критической группы населения, для которой характерно значительное потребление морепродуктов (Крышев и др., 2017; Порядок расчёта..., 2016; Сазыкина и Крышев, 1999).

Расчёт контрольного уровня i -го радионуклида в морской воде по радиационно-гигиеническому критерию $A_{i,чел}$, Бк·л⁻¹, произведён по формуле:

$$A_{i,чел} = \frac{ПД_{10\%}}{E_i \sum CF_{i,k,2} \cdot R_k}, \quad (2)$$

где $ПД_{10\%}$ — часть предела дозы (ПД) для критической группы населения от потребления морепродуктов, содержащих i -й радионуклид, равная 10 %, то есть 0,1 мЗв·год⁻¹ (согласно СанПин 2.6.1.2523, ПД составляет 1 мЗв·год⁻¹);

E_i — дозовые коэффициенты для i -го радионуклида, Зв·Бк⁻¹, при оценке дозы на человека от потребления морепродуктов в соответствии с СанПин 2.6.1.2523;

$CF_{i,k,2}$ — коэффициент накопления i -го радионуклида в k -м морепродукте, л·кг⁻¹;

R_k — величины годового потребления k -го вида морепродуктов критической группой населения.

В целях обеспечения экологической безопасности рекомендовано в качестве контрольного уровня содержания радионуклидов в морской воде брать минимальное из рассчитанных по радиационно-гигиеническому и экологическому критериям значение $A_{i,min}$:

$$A_{i,min} = \min\{A_{i,чел}, A_{i,k,эк}\}. \quad (3)$$

При наличии в морской воде смеси радионуклидов для обеспечения радиационной защиты человека и морской биоты необходимо выполнение условия не превышения экологически безопасного уровня (Порядок расчёта..., 2016):

$$\sum_i \frac{A_{v,i}}{A_{i,min}} \leq 1, \quad (4)$$

где $A_{v,i}$ — объёмная активность i -го радионуклида в морской воде, Бк·л⁻¹.

Выполнение условия (4) обеспечивает как экологическую, так и радиационно-гигиеническую безопасность, поскольку суммарное загрязнение техногенными радионуклидами морской воды в этом случае не будет приводить к превышению безопасного уровня облучения биоты и нормативов радиационной безопасности человека.

Подобным образом определяют контрольные концентрации радионуклидов для морских донных отложений (Порядок расчёта..., 2019).

Сумма отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде и донных отложениях к значениям контрольных уровней далее будет интерпретирована как интегральный показатель загрязнения водоёма техногенными радионуклидами. Использование соотношений, аналогичных (4), и соответствующих показателей (индексов) загрязнения широко распространено в практике мониторинга радиационной обстановки (Радиационная обстановка..., 1992–2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение интегральных показателей загрязнения техногенными радионуклидами морской воды и донных отложений в акватории Копорской губы на разном удалении от ЛАЭС, рассчитанных по данным многолетнего мониторинга (см. табл. 1) в дочернобыльский период, свидетельствует о том, что значения загрязнения как для морской воды, так и для донных отложений были максимальными в сбросных каналах ЛАЭС, а наименьшими — на расстоянии свыше 10 км от неё (рис. 1). По мере удаления от атомной станции уровень загрязнения техногенными радионуклидами прибрежной зоны восточной части Копорской губы постепенно снижается. Основной вклад в загрязнение морской воды ближней к ЛАЭС прибрежной зоны Копорской губы вносят ^{137}Cs (52–55 %), ^{54}Mn (14–17 %) и ^{60}Co (7–14 %). Вклад ^{90}Sr в загрязнение морской воды в ближней зоне составляет 4–8 %. На удалении свыше 10 км вклад ^{137}Cs в техногенное радиоактивное загрязнение возрастает до 85 %, а ^{90}Sr — почти до 15 %. Примерно такие же радионуклидный состав и пространственное распределение загрязнения техногенными радионуклидами зарегистрированы и для донных отложений.

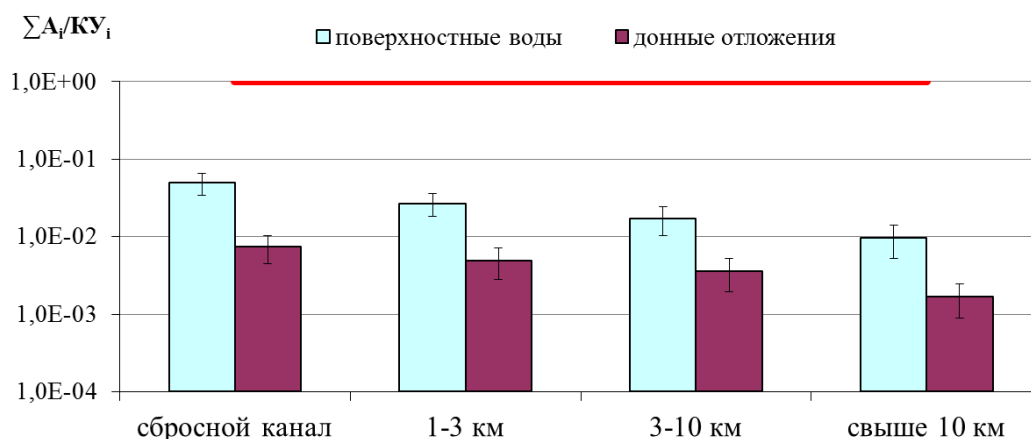


Рис. 1. Сумма отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде и донных отложениях прибрежной зоны Копорской губы в районе расположения Ленинградской АЭС к значениям контрольных уровней (1973–1985). Верхняя горизонтальная линия соответствует условию выполнения соотношения (4), обеспечивающего экологическую и радиационно-гигиеническую безопасность морской среды

Fig. 1. Sum of technogenic radionuclide activity ratios, observed in coastal seawater and bottom sediments of the Koprorye Bay in the Leningrad NPP area, to the reference levels (1973–1985). The upper horizontal line corresponds to the fulfillment of the condition (4), providing the environmental and radiation-hygienic safety of the marine environment

С учётом неравновесности радиоэкологических процессов после Чернобыльской аварии и в соответствии с рекомендациями (Порядок расчёта..., 2019, 2016) сумма отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов к контрольным уровням в 1986–1990 гг. рассчитана на основе данных наблюдений для исследуемой морской экосистемы (Блинова, 1998 ; Крышев и Блинова, 1991 ; Крышев и Рязанцев, 2010 ; Радиоактивное загрязнение районов АЭС, 1990). Динамика изменений этого показателя характеризуется достижением максимальных значений в мае — декабре 1986 г. (рис. 2), близких значению для морской воды, которое соответствует условию выполнения соотношения (4), обеспечивающего экологическую и радиационно-гигиеническую безопасность. Основной вклад в радиоактивное загрязнение водоёма в 1986 г. вносили ^{137}Cs и ^{134}Cs , контрольные уровни для которых лимитированы по радиационно-гигиеническому критерию. Остальные техногенные радионуклиды (^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{131}I , ^{90}Sr и др.) давали в сумме вклад менее 2 %. В последующие годы уровень загрязнения снижался, однако даже в 1990 г. он был на порядок выше доаварийного.

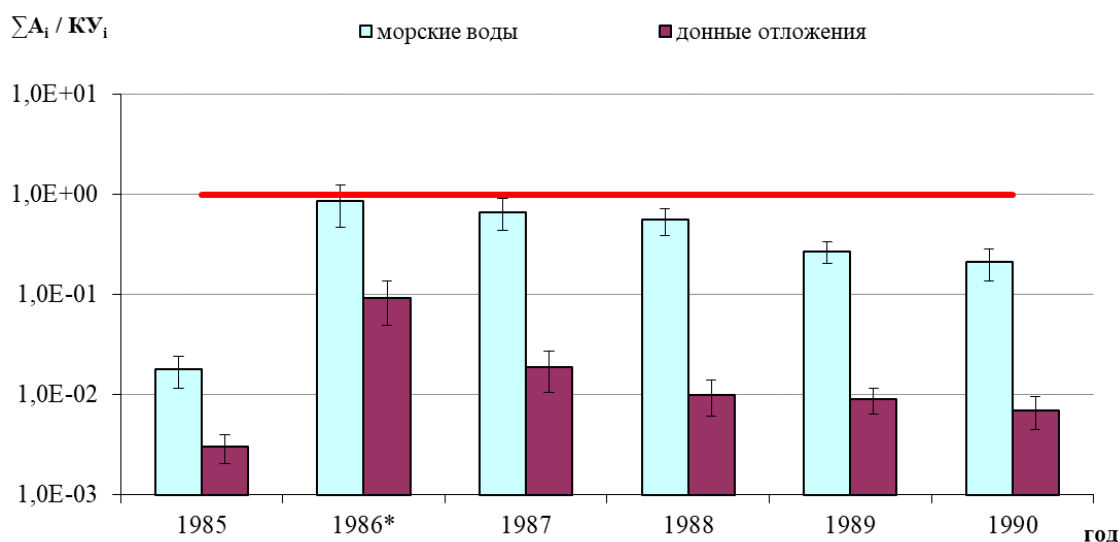


Рис. 2. Динамика изменений суммы отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде и донных отложениях прибрежной зоны Копорской губы в районе расположения ЛАЭС к значениям контрольных уровней до и после Чернобыльской аварии (1985–1990); * — по данным за май — декабрь 1986 г. Верхняя горизонтальная линия соответствует условию выполнения соотношения (4), обеспечивающего экологическую и радиационно-гигиеническую безопасность морской среды

Fig. 2. Dynamics of changes of the sum of technogenic radionuclide activity ratios, observed in seawater and bottom sediments of the Kopyrye Bay in the Leningrad NPP area, to the reference levels before and after the Chernobyl disaster (1985–1990); * – according to data for May – December 1986. The upper horizontal line corresponds to the fulfillment of the condition (4), providing the environmental and radiation-hygienic safety of the marine environment

Современная динамика радиоактивного загрязнения морской воды и донных отложений прибрежной зоны Копорской губы в районе расположения ЛАЭС в целом характеризуется относительно стабильным уровнем концентраций техногенных радионуклидов (рис. 3).

В 2002–2004 гг. отмечено увеличение суммы отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде и донных отложениях прибрежной зоны Копорской губы к контрольным уровням; оно связано с присутствием в этих компонентах морской экосистемы ^{60}Co в количествах, сопоставимых с таковыми ^{137}Cs . В последующие годы загрязнение морской воды было в основном обусловлено ^{137}Cs и находилось примерно на одном уровне. Похожая динамика наблюдается и для донных отложений.

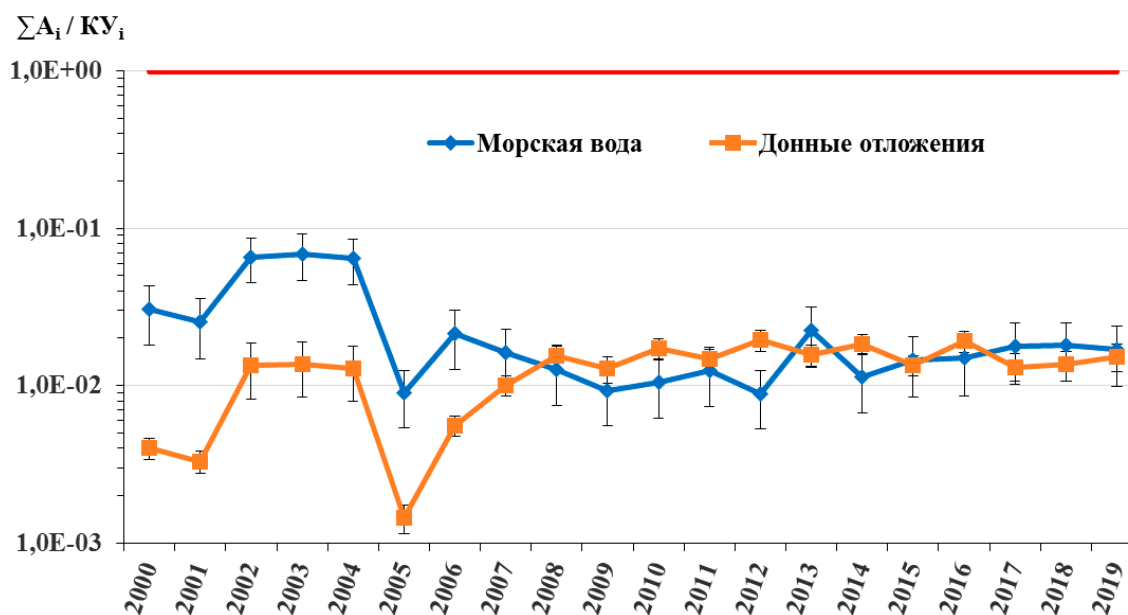


Рис. 3. Динамика изменений суммы отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде и донных отложениях прибрежной зоны Копорской губы в районе расположения ЛАЭС к значениям контрольных уровней (2000–2019). Верхняя горизонтальная линия соответствует условию выполнения соотношения (4), обеспечивающего экологическую и радиационно-гигиеническую безопасность морской среды

Fig. 3. Dynamics of changes of the sum of technogenic radionuclide activity ratios, observed in seawater and bottom sediments of the Koporye Bay in the Leningrad NPP area, to the reference levels (2000–2019). The upper horizontal line corresponds to the fulfillment of the condition (4), providing the environmental and radiation-hygienic safety of the marine environment

ОБСУЖДЕНИЕ

До публикации Рекомендаций Росгидромета Р 52.18.852-2016 (Порядок расчёта..., 2016) и Р 52.18.873-2018 (Порядок расчёта..., 2019) в отечественной и мировой литературе не было нормативно-методических документов по критериям оценки радиационного состояния морской среды, не превышение которых обеспечивает радиационную безопасность и сохранение благоприятной окружающей среды, морских гидробионтов и человека. Это создавало трудности при решении природоохранных проблем и использовании атомной энергии на море.

Основным источником дополнительного облучения населения вследствие контактов с морской средой является потребление морепродуктов. Морская вода практически не используется в России в питьевых целях. По этой причине для оценки радиационного состояния морских вод нельзя применять уровни вмешательства по содержанию отдельных радионуклидов в питьевой воде, приведённые в нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009 (Приложение П-2а), при превышении которых следует проводить определённые защитные мероприятия.

В настоящее время приоритет имеет обеспечение безопасности человека, но значительный интерес научное сообщество проявляет также к регулированию и научному обоснованию радиационного состояния окружающей среды (Крышев и Сазыкина, 2013, 2014, 2018 ; Environmental protection..., 2009 ; Radiation Protection..., 2014). При радиоактивном загрязнении моря гидробионты в ряде случаев, например при внешнем облучении от донных отложений, могут получать более высокие дозы облучения, чем человек. Кроме того, отдельные группы организмов аккумулируют радионуклиды из среды обитания с высокими коэффициентами накопления, нехарактерными для человека.

Методология оценки показателей радиационного состояния морской среды на основе экологических и радиационно-гигиенических критериев развита в публикациях (Гусев, 1975 ; Крышев и др., 2017 ; Сазыкина и Крышев, 1999, 2001 ; Kryshev & Sazykina, 2002 ; Sazykina & Kryshev, 2002a, b). Значения контрольных уровней в морской воде для радионуклидов, обнаруживаемых системами радиоэкологического мониторинга в разные периоды деятельности ЛАЭС, представлены в табл. 4 (Порядок расчёта..., 2016).

Таблица 4. Контрольные уровни содержания радионуклидов в морской воде по экологическому и радиационно-гигиеническому критериям

Table 4. Reference levels of radionuclide content in seawater according to environmental and radiation-hygienic criteria

Радионуклид	Контрольные уровни объёмной активности в воде, Бк·л ⁻¹		
	по экологическому критерию	по радиационно-гигиеническому критерию	минимальное значение, удовлетворяющее одновременно экологическому и радиационно-гигиеническому критериям (Порядок расчёта..., 2016)
¹³⁷ Cs	180	1,22	1,22
¹³⁴ Cs	70	0,838	0,8382
⁹⁰ Sr	490*	16,8	16,82
⁵⁴ Mn	0,27	1,91	0,272
⁶⁰ Co	0,61	0,628	0,612
⁶⁵ Zn	11	0,116	0,1162
⁹⁵ Zr	0,31	62,7	0,312
⁹⁵ Nb	0,74	83,7	0,742
¹³¹ I	420	8,04	8,042
¹⁴¹ Ce	2,0	14,2	2,02
¹⁴⁴ Ce	0,72	1,94	0,722
³ H	1 000 000*	86 800	86 800
¹⁴ C	72	0,137	0,1372

Примечание: * — по критерию отнесения к жидким радиоактивным отходам.

Note: * – according to the criterion of classification as liquid radioactive waste.

Для ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁴¹Ce и ¹⁴⁴Ce лимитирующими являются контрольные уровни, рассчитанные по экологическому критерию. Для ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H и ¹⁴C, наиболее распространённых в окружающей среде, значения контрольных уровней в морской воде определяются радиационно-гигиеническими ограничениями. Минимальные значения контрольных уровней имеют радионуклиды, характеризующиеся высокими факторами накопления в морской биоте (¹⁴C, ⁶⁵Zn) и донных отложениях (⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb).

Контрольные уровни содержания радионуклидов в компонентах морской среды могут быть непосредственно сопоставлены с данными прямых измерений, что даёт возможность их применения в практике радиоэкологического мониторинга. Интегральным показателем радиоэкологической обстановки является сумма отношений наблюдаемых концентраций техногенных радионуклидов в морской воде и донных отложениях морского водоёма к значениям контрольных уровней. Расчёты этого показателя по данным многолетнего радиоэкологического мониторинга (1973–2019) Копорской губы Финского залива в районе расположения Ленинградской АЭС выполнены впервые. Анализ данных мониторинга позволяет сделать следующие выводы.

В период выхода ЛАЭС с реакторами РБМК-1000 на максимальную мощность (1973–1985) её влияние на активность радионуклидов в морской воде прослежено в сбросных каналах и прилегающей к ним акватории на расстоянии до 3 км (табл. 1). Только в редких случаях (до 4 %) определены следовые количества коррозионных радионуклидов в зоне наблюдений, непосредственно примыкающей к АЭС. Постоянное присутствие в морской воде ^{137}Cs и ^{90}Sr объясняется глобальными процессами формирования техногенного радиационного фона. Увеличение удельной активности этих радионуклидов отмечено в сбросных каналах 1-й и 2-й очереди ЛАЭС и примыкающей акватории.

Влияние ЛАЭС на активность радионуклидов в морских донных отложениях прослежено на расстоянии до 10 км, при этом зафиксировано снижение техногенной активности радионуклидов в донных отложениях и частоты обнаружения радионуклидов стационарного происхождения по мере удаления от ЛАЭС.

Вследствие процессов накопления вероятность определения техногенных радионуклидов в пробах водных растений существенно выше, чем в пробах воды. Влияние ЛАЭС на активность радионуклидов в морских растениях прослежено на расстоянии свыше 10 км. Отмечено снижение радиоактивного загрязнения морских растений по мере удаления от ЛАЭС. В целом водные растения являются информативным биоиндикатором, позволяющим отслеживать распространение техногенных радионуклидов в районе расположения АЭС.

Наиболее высокие уровни содержания техногенных радионуклидов в тканях рыб зарегистрированы в сбросных каналах ЛАЭС. В пробах тканей рыб из Копорской губы, наряду с постоянно присутствующими ^{137}Cs и ^{90}Sr , в ряде случаев выявили коррозионные радионуклиды (^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn). Представляет интерес биологический перенос следовых количеств этих радионуклидов в реки, впадающие в Копорскую губу.

Чернобыльская авария привела к заметному увеличению загрязнения Копорской губы техногенными радионуклидами. Значение суммы отношений наблюдаемых концентраций радионуклидов чернобыльского происхождения в морской воде в мае — декабре 1986 г. к значениям контрольных уровней увеличилось по сравнению со значением доаварийного периода примерно в 100 раз. В это время показатель был близок к величине, при которой нарушается соотношение (4), обеспечивающее сохранение благоприятной окружающей среды. Увеличение значения в основном было обусловлено радионуклидами цезия, контрольные уровни для которых в морской воде лимитированы по радиационно-гигиеническому критерию.

На формирование современной динамики загрязнения компонентов морской экосистемы техногенными радионуклидами продолжают оказывать влияние последствия загрязнения Копорской губы «чернобыльским» ^{137}Cs . Вместе с тем отмечено снижение сбросов ЛАЭС в Копорскую губу. Согласно данным многолетнего мониторинга, по прошествии более чем 30 лет после Чернобыльской аварии концентрация ^{137}Cs в донных отложениях, морской воде и тканях рыб Копорской губы всё ещё превышает доаварийный уровень, при этом содержание коррозионных радионуклидов стационарного происхождения в морской воде и донных отложениях существенно уменьшилось. Особую значимость в практике радиоэкологического мониторинга в этом регионе приобрели тритий и углерод-14 как природного, так и техногенного происхождения.

Заключение. Анализ данных многолетнего радиоэкологического мониторинга в районе расположения Ленинградской АЭС (1973–2019) позволяет сделать вывод о том, что содержание техногенных радионуклидов в компонентах морской экосистемы Копорской губы Финского залива в штатных условиях эксплуатации АЭС не превышает контрольные уровни, приведённые в Рекомендациях Росгидромета Минприроды России и обеспечивающие сохранение благоприятной окружающей среды. В динамике радиоэкологической обстановки в этом регионе

можно выделить ряд характерных периодов. В ранний период эксплуатации АЭС (1973–1985) в компонентах морской экосистемы присутствовал широкий спектр техногенных радионуклидов. Наряду с ^{137}Cs заметный вклад в загрязнение морской воды и донных отложений вносили ^{54}Mn и ^{60}Co , контрольные уровни для которых в морской воде, в отличие от контрольных уровней ^{137}Cs , определяются по экологическому, а не радиационно-гигиеническому критерию. Наиболее широкий спектр техногенных радионуклидов зарегистрирован в морских водорослях, которые являются информативным биоиндикатором, позволяющим отслеживать распространение техногенных радионуклидов в районе расположения АЭС на расстояния свыше 10 км. Прослежен биогенный перенос коррозионных радионуклидов (^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn) рыбой в реки, впадающие в Копорскую губу.

После Чернобыльской аварии содержание радиоизотопов цезия в компонентах морской экосистемы существенно увеличилось. После распада относительно короткоживущих «чернобыльских» радионуклидов основную радиоэкологическую значимость в этом регионе приобрел ^{137}Cs , содержание которого возросло в мае — декабре 1986 г., по сравнению с доаварийным уровнем, в морской воде в 130 раз, в водорослях — в 250 раз, в донных отложениях — в 30 раз. Для хищных рыб отмечен эффект накопления радиоцезия по трофическим уровням. Максимальные удельные активности ^{137}Cs в мышцах рыб зарегистрированы спустя год после аварийного загрязнения, в 1987 г., однако значения оставались высокими и даже в 1990 г. были в 3–8 раз выше активностей «мирных» видов.

В настоящее время (2010–2019) радиоактивное загрязнение компонент морской экосистемы Копорской губы определяется в основном наличием ^{137}Cs и находится, по данным наблюдений, на относительно постоянном уровне, свидетельствующем о стабильности радиоэкологической обстановки в морском водоёме — охладителе АЭС. С учётом потенциальной радиационной опасности АЭС, ситуации совместного действия на морскую биоту техногенного ионизирующего излучения и комплекса нерадиационных факторов (тепловой сброс, химическое загрязнение, травмирование гидробионтов на водозаборных устройствах АЭС) можно заключить, что в дальнейшем необходимо продолжать и развивать радиоэкологический мониторинг морского водоёма — охладителя Ленинградской АЭС.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета, тема 4.3.1 «Модернизация и развитие государственного мониторинга радиационной обстановки на территории РФ» (2020–2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Блинова Л. Д. *Радиоэкологический мониторинг атмосферы и гидросферы в районе расположения объектов ядерного комплекса (на примере города Сосновый Бор)* : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 04.00.23, 11.00.11. Обнинск, 1998. 166 с. [Blinova L. D. *Radioekologicheskii monitoring atmosfery i gidrosfery v raione raspolozheniya ob'ektov yadernogo kompleksa (na primere goroda Sosnovyi Bor)*. [dissertation]. Obninsk, 1998, 166 p. (in Russ.)]
2. Бондаренко Л. Г., Быстрова А. А., Гаврилов В. М., Душин В. Н., Лебедева А. В., Осипов В. В., Савельева И. М., Садыкин А. Д., Степанов А. В., Тишков В. П. Влияние Ленинградской атомной электростанции и других предприятий атомной промышленности региона на радиоэкологическое состояние Копорской губы Финского залива // *Ядерная и радиационная безопасность России* : тематический сборник / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Москва : ГК «Росатом», 2013. Вып. 15. С. 115–125. [Bondarenko L. G., Bystrova A. A., Gavrilov V. M., Dushin V. N., Lebedeva A. V., Osipov V. V., Savelieva I. M., Sadykin A. D., Stepanov A. V., Tishkov V. P. Influence of the Leningrad Nuclear Power Plant and other enterprises of the region on a radioecological condition of the Korporsky Bay of the Gulf of Finland. In: *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' Rossii* : tematicheskii

- sbornik / Gosudarstvennaya korporatsiya po atomnoi energii "Rosatom". Moscow : GK "Rosatom", 2013, iss. 15, pp. 115–125. (in Russ.)]
3. Вакуловский С. М., Никитин А. И. Радиоактивное загрязнение морской среды вблизи Ленинградской АЭС в 1982 г. // *Атомная энергия*. 1984. Т. 56, вып. 3. С. 153–155. [Vakulovskii S. M., Nikitin A. I. Radioactive contamination of the marine environment near the Leningrad Nuclear Power Station in 1982. *Atomnaya energiya*, 1984, vol. 56, iss. 3, pp. 153–155. (in Russ.)]
 4. Гусев Д. И. Гигиенические критерии к оценке загрязнения радионуклидами прибрежных морских вод // *Impacts of Nuclear Releases Into the Aquatic Environment* : proceedings of symposium, Otaniemi, 30 June – 4 July, 1975. Vienna : IAEA, 1975. P. 363–373. [Gusev D. I. Health criteria for estimating acceptable contamination of coastal waters by radionuclides. In: *Impacts of Nuclear Releases Into the Aquatic Environment* : proceedings of symposium, Otaniemi, 30 June – 4 July, 1975. Vienna : IAEA, 1975, pp. 363–373. (in Russ.)]
 5. Крышев А. И., Сазыкина Т. Г., Крышев И. И., Косых И. В. Оценка контрольных уровней радиоактивного загрязнения водных объектов на основе экологических критериев // *Метеорология и гидрология*. 2017. Т. 42, № 5. С. 91–97. [Kryshchov A. I., Sazykina T. G., Kryshchov I. I., Kosykh I. V. Reference levels of radioactive contamination of water bodies based on the environmental criteria. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, vol. 42, no. 5, pp. 91–97. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.3103/S1068373917050090>
 6. Крышев И. И. Становление отечественного радиоэкологического мониторинга // *XLVI Международные радиоэкологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В. М. Клечковскому* : сборник материалов, Обнинск, 30 ноября 2017 г. Обнинск : ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2017. С. 113–135. [Kryshchov I. I. Stanovlenie otechestvennogo radioekologicheskogo monitoringa. In: *XLVI Mezhdunarodnye radioekologicheskie chteniya, posvyashchennye deistvitel'nomu chлену VASKhNIL V. M. Klechkovskomu* : sbornik materialov, Obninsk, 30 Nov., 2017. Obninsk : FGBNU VNIIRAE, 2017, pp. 113–135. (in Russ.)]
 7. Крышев И. И., Блинова Л. Д. Радиоэкологический мониторинг морской среды в районе расположения Ленинградской АЭС // *Атомная энергетика на море. Экология и безопасность*. Москва : Ядерное общество СССР, 1991. С. 266–271. [Kryshchov I. I., Blinova L. D. Radioekologicheskii monitoring morskoi sredy v raione raspolozheniya Leningradskoi AES. In: *Atomnaya energetika na more. Ekologiya i bezopasnost'*. Moscow : Yadernoe obshchestvo SSSR, 1991, pp. 266–271. (in Russ.)]
 8. Крышев И. И., Рязанцев Е. П. *Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : ИздАт, 2010. 496 с. [Kryshchov I. I., Ryazantsev E. P. *Ekologicheskaya bezopasnost' yaderno-energeticheskogo kompleksa Rossii*. 2nd ed., revised and added. Moscow : IzdAt, 2010, 496 p. (in Russ.)]
 9. Крышев И. И., Сазыкина Т. Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учётом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 // *Радиация и риск*. 2013. Т. 22, № 1. С. 47–61. [Kryshchov I. I., Sazykina T. G. Radiation safety of the environment: Request for harmonization of Russian and international regulation documents with consideration of federal laws and new international basic safety standards. *Radiatsiya i risk*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 47–61. (in Russ.)]
 10. Крышев И. И., Сазыкина Т. Г. Радиационная безопасность биосферы: научные и нормативно-методические аспекты // *XLII Радиоэкологические чтения, посвященные действительному члену ВАСХНИЛ В. М. Клечковскому* : сборник материалов, Обнинск, 3 декабря 2013 г. Обнинск : ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2014. С. 31–76. [Kryshchov I. I., Sazykina T. G. Radiatsionnaya bezopasnost' biosfery: nauchnye i normativno-metodicheskie aspekty. In: *XLII Radioekologicheskie chteniya, posvyashchennye deistvitel'nomu chлену VASKhNIL V. M. Klechkovskomu* : sbornik materialov, Obninsk, 3 Dec., 2013. Obninsk : GNU VNIISKHRAE, 2014, pp. 31–76. (in Russ.)]
 11. Крышев И. И., Сазыкина Т. Г. Радиационная безопасность окружающей среды. Обзор

- // *Радиация и риск*. 2018. Т. 27, № 3. С. 113–131. [Kryshch I. I., Sazykina T. G. Radiation protection of the natural environment. Review. *Radiatsiya i risk*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 113–131. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2018-27-3-113-131>
12. *Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды* / под общ. ред. А. Н. Марей, А. С. Зыковой. Москва : МЗ СССР, 1980. 337 с. [*Metodicheskie rekomendatsii po sanitarnomu kontrolyu za sodержaniem radioaktivnykh veshchestv v ob"ektakh vneshnei sredy* / A. N. Marei, A. S. Zyкова (Eds). Moscow : MZ SSSR, 1980, 337 p. (in Russ.)]
 13. *Методические рекомендации по определению радиоактивного загрязнения водных объектов* / под ред. С. М. Вакуловского. Москва : Гидрометеиздат, 1986. 78 с. [*Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu radioaktivnogo zagryazneniya vodnykh ob"ektov* / S. M. Vakulovskii (Ed.). Moscow : Gidrometeoizdat, 1986, 78 p. (in Russ.)]
 14. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением компонентов природной среды* : руководящий документ РД 52.18.826-2015 / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 96 с. [*Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam*. Iss. 12. *Nablyudeniya za radioaktivnym zagryazneniem komponentov prirodnoi sredy* : rukovodyashchii dokument RD 52.18.826-2015 / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 2015, 96 p. (in Russ.)]
 15. *Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки* : рекомендации Р 52.18.820-2015 / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 64 с. [*Otsenka radiatsionno-ekologicheskogo vozdeystviya na ob"ekty prirodnoi sredy po dannym monitoringa radiatsionnoi obstanovki* : rekomendatsii R 52.18.820-2015 / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 2015, 64 p. (in Russ.)]
 16. *Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в донных отложениях морских водных объектов* : рекомендации Р 52.18.873-2018 / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2019. 29 с. [*Poryadok rascheta kontrol'nykh urovnei sodержaniya radionuklidov v donnykh otlozheniyakh morskikh vodnykh ob"ektov* : rekomendatsii R 52.18.873-2018 / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 2019, 29 p. (in Russ.)]
 17. *Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах* : рекомендации Р-52.18.852-2016 / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2016. 28 с. [*Poryadok rascheta kontrol'nykh urovnei sodержaniya radionuklidov v morskikh vodakh* : rekomendatsii R-52.18.852-2016 / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 2016, 28 p. (in Russ.)]
 18. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1991–2019 гг.* : ежегодник / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 1992–2020. [*Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 1991–2019 gg.* : ezhegodnik / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 1992–2020. (in Russ.)]
 19. *Радиоактивное загрязнение районов АЭС* / ред. И. И. Крышев. Москва : Ядерное общество СССР, 1990. 150 с. [*Radioaktivnoe zagryaznenie raionov AES* / I. I. Kryshch (Ed.). Moscow : Yadernoe obshchestvo SSSR, 1990, 150 p. (in Russ.)]
 20. *Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС* / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии ; под ред. К. П. Махонько. Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. 264 с. [*Rukovodstvo po organizatsii kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy v raione raspolozheniya AES* / Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii ; K. P. Makhon'ko (Ed.). Leningrad : Gidrometeoizdat, 1990, 264 p. (in Russ.)]
 21. Сазыкина Т. Г., Крышев И. И. Оценка контрольной концентрации радионуклидов в морской воде с учётом гигиенических и радиоэкологических критериев // *Атомная энергия*. 1999. Т. 87, вып. 4. С. 302–307. [Sazykina T. G., Kryshch I. I. On the estimation of control concentrations of radionuclides in sea water with concentration for hygienic and radioecological criteria. *Atomnaya energiya*, 1999, vol. 87, iss. 4, pp. 302–307. (in Russ.)]
 22. Сазыкина Т. Г., Крышев И. И. Радиоэкологические критерии нормирования технологических сбросов в морскую среду // *Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин* : [сборник

- докладов] / под ред. А. В. Трапезникова, С. М. Вовк. Заречный : [Б. и.], 2001. Вып. 4. С. 92–106. [Sazykina T. G., Kryshev I. I. Radioekologicheskie kriterii normirovaniya tekhnologicheskikh sbrosov v morskuyu sredu. In: *Problemy radioekologii i pogranichnykh distsiplin* : [sbornik dokladov] / A. V. Trapeznikov, S. M. Vovk (Eds). Zarechnyi : [S. n.], 2001, iss. 4, pp. 92–106. (in Russ.)]
23. *Эколого-геофизические аспекты мониторинга районов АЭС* : [сб. ст.] / под ред. В. А. Борзилова, И. И. Крышева. Москва : Моск. отд-ние Гидрометеоздата, 1992. 228 с. (Труды Института экспериментальной метеорологии. Сер. Загрязнение природных сред ; вып. 19 (152)). [*Ekologo-geofizicheskie aspekty monitoringa raionov AES* : [sb. st.] / V. A. Borzilov, I. I. Kryshev (Eds). Moscow : Mosk. otd-nie Gidrometeoizdata, 1992, 228 p. (Trudy Instituta eksperimental'noi meteorologii ; iss. 19 (152)). (in Russ.)]
24. Environmental protection: The concept and use of reference animals and plants. *Annals of the ICRP*, 2009, vol. 38, no. 4–6, 242 p. (ICRP Publication ; 108).
25. Kryshev I. I., Sazykina T. G. Assessment of permissible low-level releases of radionuclides into the marine environment. In: *Issues and Trends in Radioactive Waste Management* : Proceedings of an International Conference on Vienna, Austria, 9–13 Dec., 2002. Vienna : IAEA-CN-90, 2003, pp. 17–20.
26. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources : International Basic Safety Standards*. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014, 471 p. (IAEA safety standards series ; no. GSR part 3).
27. Sazykina T. G., Kryshev I. I. Methodology for radioecological assessment of radionuclides permissible levels in the seas – protection of human and marine biota. *Radioprotection*, 2002a, vol. 37, C1, pp. C1-899–C1-902. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2002221>
28. Sazykina T. G., Kryshev I. I. Assessment of radiological impact on marine biota in the OSPAR region (Marina Update Project). In: *Proceedings From the International Conference on Radioactivity in the Environment*, 1–5 Sept., Monaco : extended abstracts. Østerås : NRPA, 2002b, pp. 565–568.

**ASSESSMENT OF RADIATION STATE OF MARINE ENVIRONMENT
IN THE LENINGRAD NPP AREA
ACCORDING TO LONG-TERM MONITORING DATA (1973–2019)**

**I. I. Kryshev, T. G. Sazykina, N. N. Pavlova, I. V. Kosykh,
A. A. Buryakova, and A. I. Kryshev**

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russian Federation
E-mail: kryshev@rpatyphoon.ru

The aim of the study was to conduct a radioecological assessment of the Leningrad NPP marine cooling reservoir – Koporye Bay of the Gulf of Finland. According to the international basic safety standards, accepted at the IAEA General Conference, this issue is of particular relevance due to the need to justify protection from technogenic radiation exposure both to humans and the environment. The assessment was based on the long-term radioecological monitoring data (1973–2019) within the Leningrad NPP observation area: radionuclides concentration in seawater, bottom sediments, and hydrobionts. The reference levels of radionuclides content in seawater and bottom sediments were used as indicators of the radiation state of the marine environment; their calculation procedure is defined in the Recommendations R 52.18.852-2016 and R 52.18.873-2018, issued by the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation). These recommendations, developed by RPA “Typhoon” specialists, contain a methodology for assessing the radioecological state of the marine environment by the level of radionuclides activity, based on the principles, ensuring the maintenance of favorable environment, safety of marine hydrobionts, and radiation protection of humans. In the presence of various radionuclides in the marine environment, the sum of technogenic radionuclide activity ratios in seawater (bottom sediments) to the corresponding reference levels shall be below 1. According to monitoring data in the early period of NPP operation (1973–1985), a wide spectrum of technogenic radionuclides was observed in the marine ecosystem components. Along with ^{137}Cs , significant contributors to the contamination of seawater

and bottom sediments were ^{54}Mn and ^{60}Co . In contrast to reference levels for ^{137}Cs , reference levels for ^{54}Mn and ^{60}Co in seawater are determined by an environmental criterion, not a radiation-hygienic one. The presence of technogenic radionuclides in algae was registered at distances, exceeding 10 km from the NPP. Biogenic transfer of corrosion radionuclides (^{54}Mn , ^{60}Co , and ^{65}Zn) by fish into rivers, flowing into the Koporye Bay, was noted. The Chernobyl disaster led to a noticeable increase in the pollution of the Koporye Bay with technogenic radionuclides. In May – December 1986, the sum of technogenic radionuclide activity ratios in seawater to the reference levels exceeded the pre-accidental level by 100 times, and in bottom sediments – by 30 times. In 1986, ^{137}Cs and ^{134}Cs were the main contributors to the marine ecosystem radioactive contamination. Currently, the technogenic radioactivity of seawater and bottom sediments of the Koporye Bay is mainly determined by ^{137}Cs ; its level is relatively constant, which indicates the stability of the radioecological situation in the Leningrad NPP marine cooling reservoir.

Keywords: Koporye Bay of the Gulf of Finland, Leningrad NPP, radioecological monitoring, seawater, bottom sediments, radionuclide reference levels, environmental and radiation-hygienic criteria, integral indicator of pollution, long-term dynamics