

УДК 632.153(268)

ТЕХНОГЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОГО ПОЛЯРНОГО БАСЕЙНА И СМЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ АРКТИКИ

Академик РАН Г. Г. Матишов^{1,2}, Н. Е. Касаткина^{1,*}, И. С. Усягина¹

Поступило 16.05.2018 г.

Выполнена оценка современной радиационной обстановки в Центральном Полярном бассейне и российских морях Северного Ледовитого океана по данным 2013–2017 гг. Выявлены статистически значимые различия средней объёмной активности ^{137}Cs в поверхностном слое вод. Отмечена тенденция уменьшения загрязнённости морской среды в направлении с запада на восток. Максимальные концентрации ^{137}Cs характерны для Баренцева, Карского морей. Меньше всего загрязнены воды морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, наиболее удалённых от европейских источников техногенных радионуклидов.

Ключевые слова: вода, Северный Ледовитый океан, арктические моря, загрязнение, искусственные радионуклиды.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485193-98>

Проблема трансграничных миграций радиоактивного вещества, попавшего в морские экосистемы из наземной, воздушной, водной сред, по-прежнему привлекает внимание многих исследователей. В Северном Ледовитом океане после испытаний атомного оружия в 1950–1960-х годах постоянно обнаруживали изотопы ^{137}Cs , ^{90}Sr — продукты деления ядер ^{235}U , ^{239}Pu [1]. В 1970–1980-е годы воды Арктического бассейна стали содержать изотоп ^{134}Cs — маркер трансокеанического переноса сбросов английского радиохимического предприятия “Селлафилд” и радиоактивных атмосферных выпадений после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. [2].

Первые масштабные исследования искусственной радиоактивности морской среды вблизи Северного полюса Земли выполнены на полярных станциях: в 1974 г. на ст. Logex, дрейфовавшей вдоль 89° с.ш. [3]; в 1983 г. на ст. Cesag, развёрнутой в районе поднятия Альфа на 87° с.ш. [4]. Значительный массив данных о содержании искусственных радионуклидов в центре Арктического бассейна собран в ходе экспедиции шведского ледокола “Оден” в 1994 г. [5]. Анализ опубликованных карт распределения антропогенных изотопов [5, 6] и баз данных радиоактивного загрязнения АМАР (Arctic Monitoring and Assessment Programme, Арктический совет) и MARI S (Marine Information System, МАГАТЭ, <https://maris.iaea.org>) показал, что в последние два

десятилетия радиоактивность вод Центрального Полярного бассейна вблизи Северного полюса Земли практически не изучали. В связи с этим результаты радиоэкологических исследований, проведённых впервые в XXI в. непосредственно на акватории Северного полюса, приобретают особую актуальность.

Цель нашей работы — анализ современных закономерностей радиоактивного загрязнения в водах Центрального Полярного бассейна и сопредельных акваторий, Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей, а также моря Лаптевых.

Материалы по загрязнению вод Центрального Полярного бассейна собраны в экспедиции на атомном ледоколе “50 лет Победы” по маршруту г. Мурманск—Северный полюс 15–25 августа 2017 г. Пробы воды для определения гидрологических, радиометрических параметров отбирали на восьми комплексных станциях (рис. 1). Оценка радиоактивного загрязнения других российских морей Северного Ледовитого океана (Баренцево, Карское, Восточно-Сибирское моря, море Лаптевых) выполнена по данным, полученным в комплексных экспедициях ММБИ КНЦ РАН на нис “Дальние Зеленцы”, на дизель-электроходах “Мончегорск”, “Талнах”, “Надежда”, “Норильский Никель” в 2013–2017 гг. (рис. 1).

Концентрирование радионуклидов Cs из морской воды проводили из пробы объёмом 100 л на целлюлозно-неорганическом сорбенте “Анфеж”. Измерения полученных счётных образцов выполняли на гамма-спектрометре “InSpektor-2000” фирмы “Canberra”, США. Для определения содержания ^{90}Sr

¹ Мурманский морской биологический институт Российской Академии наук

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской Академии наук, Ростов-на-Дону

*E-mail: kasatkina@mmbi.info

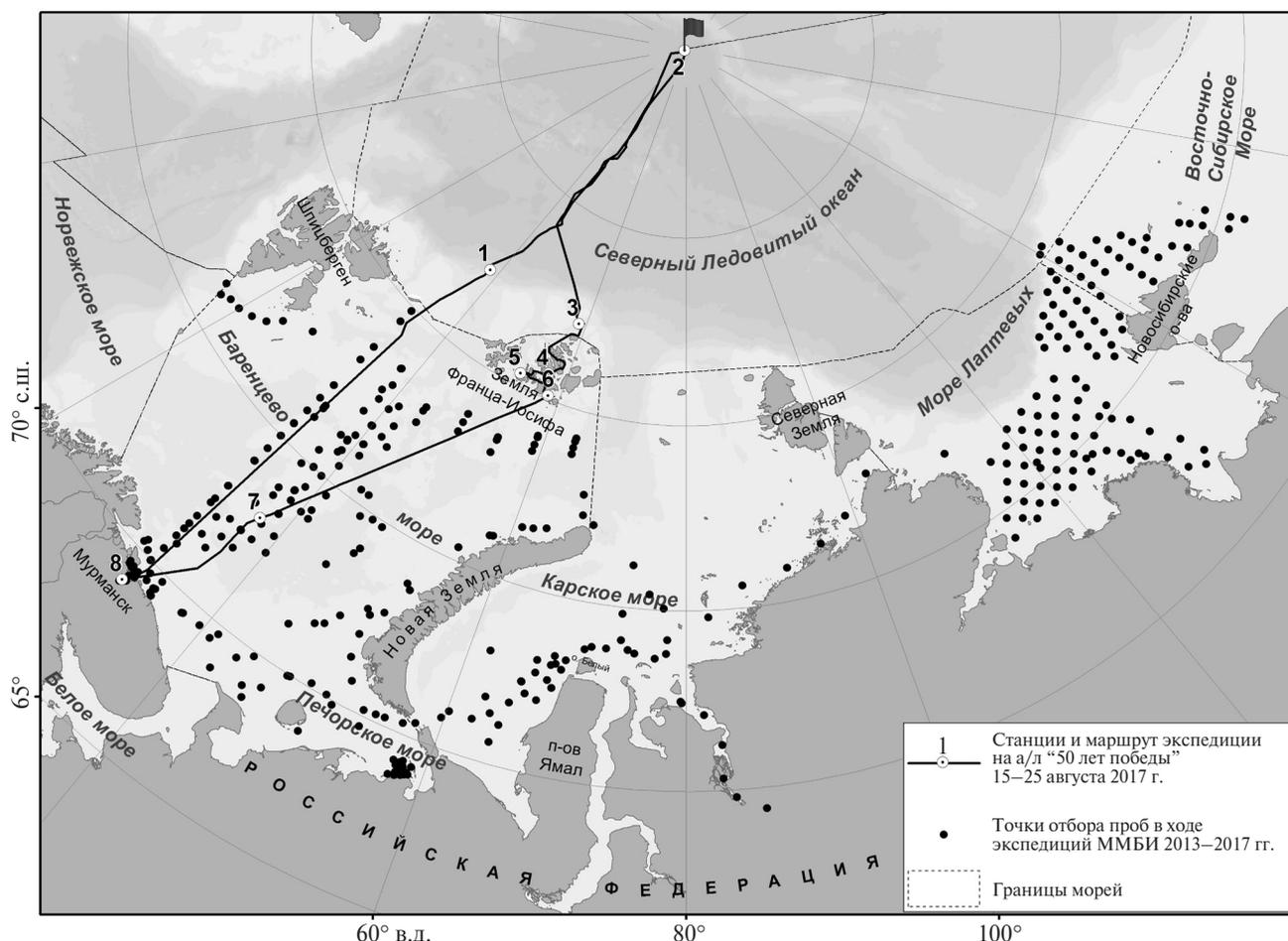


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды для исследования уровней искусственной радиоактивности в арктических морях, 2013–2017 гг.

пробы воды объёмом 20 л подвергали радиохимической обработке оксалатным методом с последующим измерением счётного образца на жидкосцинтилляционном бета-радиометре “LS 6500” фирмы “Beckman coulter”, США. Статистические расчёты выполнены с помощью специализированной программы SPSS Statistics.

Важнейшую роль в перемещении радиоактивного вещества в Северном Ледовитом океане играют атлантические воды, поступающие в акваторию через пролив Фрама. Эти тёплые воды и материковый сток участвуют в формировании термохалинной структуры и ледовых условий в Полярном бассейне. Стратификация вод имеет многослойную структуру. Верхний слой (до 100–200 м) характеризуется холодными распреснёнными водами, которые покрыты морскими льдами. Ниже галоклина (200–600 м) залегает слой тёплых и солёных атлантических вод.

Во второй половине августа 2017 г. акватория Северного Ледовитого океана в районе Северного

полюса представляла собой заснеженную ледовую пустыню. Температура воздуха до -8° , морской воды $-1,6^{\circ}$. От окраин Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена в направлении Северного полюса нарастало распреснение водных масс (табл. 1). Поверхностные воды в разводе на акватории Северного полюса отличались наибольшим распреснением (30,42‰).

Таблица 1. Объёмные активности ^{137}Cs , ^{90}Sr в поверхностных водах Центрального Полярного бассейна и Баренцева моря по результатам экспедиции на а/л “50 лет Победы” (15–25 августа 2017 г.)

№ станции	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	S, ‰	^{137}Cs , Бк/м ³	^{90}Sr , Бк/м ³
1	82°10'	38°014'	32,92	—	< 0,1
2	89°57'	39°071'	30,42	2,0 ± 0,2	2,1 ± 0,3
3	82°11'	58°35'	31,54	—	0,7 ± 0,1
4	80°39'	56°57'	34,08	—	1,5 ± 0,3
5	80°20'	52°49'	34,12	—	0,7 ± 0,1
6	80°06'	58°10'	33,73	—	< 0,1
7	72°59'	37°34'	35,14	—	1,2 ± 0,2
8	69°02'	33°04'	24,31	—	1,8 ± 0,3

Под полярными льдами (ст. 1–6) температура воды имела отрицательные значения.

Согласно опубликованным данным [3, 5], в 1979 г. в поверхностных водах вблизи Северного полюса содержание радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr составляло 6,7 и 5,3 Бк/м³ соответственно. Близкие значения объёмной активности ^{137}Cs ~5,5 Бк/м³ регистрировали в 1983 г. [4, 5]. Именно поверхностные воды были наиболее загрязнены искусственными радионуклидами, на глубинах >1000 м радиоактивное загрязнение снижалось более чем на порядок. В первой половине 1990-х годов воды Северного Ледовитого океана в районе Северного полюса характеризовались более высоким содержанием ^{137}Cs : 11,0–16,5 Бк/м³ [5, 7].

Исследования арктических морей со второй половины 1990-х годов по настоящее время показали тенденцию снижения искусственной радиоактивности [6, 8], однако сохраняется опасность вторичного загрязнения вод в Полярном бассейне при таянии многолетних льдов, накопивших долгоживущие радионуклиды из осадков. Дрейфующие айсберги и паковые льды могут быть не только вторичным источником загрязнения, но и средством транспортировки и перераспределения поллютантов на акватории морей.

От Северного полюса до 85° с. ш. (между 44–48° в. д.) наблюдали сплошной ледовый покров сплочённостью от 7–8 до 9–10 баллов, его толщина > 2 м.

В 2017 г. объёмная активность антропогенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr в поверхностных водах Центрального Полярного бассейна вблизи географической точки “Северный полюс” составила $2,0 \pm 0,2$; $2,1 \pm 0,3$ Бк/м³ соответственно. Эти значения согласуются с результатами аналогичных измерений, выполненных в смежных арктических морях в последние годы (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения объёмных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr (Бк/м³) в поверхностных водах российских морей Северного Ледовитого океана, 2013–2017 гг.

Исследуемый район	^{137}Cs			^{90}Sr		
	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>n</i>	Среднее значение	Стандартное отклонение	<i>n</i>
Центральный Полярный бассейн (Северный полюс)	2,00		1	2,11		1
Баренцево море	1,71	0,76	206	4,14	3,09	147
Карское море	1,98	0,97	50	5,58	3,68	49
Море Лаптевых	1,19	0,71	83	5,20	5,16	32
Восточно-Сибирское море	0,93	0,55	37	5,12	4,67	8

Примечание. *n* — число измерений.

Статистический анализ уровней радиоактивного загрязнения поверхностных вод четырёх исследованных морей Северного Ледовитого океана, выполненный с использованием непараметрического критерия Краскела—Уоллиса (H) [9, 10], показал наличие статистически значимых различий между акваториями по содержанию ^{137}Cs ($H = 58,035$, $df = 3$; $p < 0,001$) и отсутствие таковых по содержанию ^{90}Sr ($H = 7,327$, $df = 3$; $p = 0,062$), где df — число степеней свободы, p — достигнутый уровень статистической значимости.

Для детализации установленных различий проведены апостериорные сравнения значений объёмных активностей ^{137}Cs в исследованных морях с помощью критерия Манна—Уитни (U). Всего для четырёх морей проведено шесть парных сравнений ($n = 0,5 \cdot N \cdot (N - 1)$, где N — количество сравниваемых морей). Результаты сравнений (табл. 3) показали, что средние объёмные активности ^{137}Cs в Баренцевом, Карском морях не различаются между собой, но значимо выше, чем в море Лаптевых или Восточно-Сибирском. При этом статистически значимые различия в содержании радионуклида в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море не выявлены. Для интерпретации результатов парных сравнений использован критический уровень значимости p^* , равный 0,0085 ($p^* = 1 - 0,95^{1/n}$, где n — количество производимых сравнений).

В последние годы объёмная активность ^{137}Cs в водах Центрального Полярного бассейна, Баренцева, Карского морей находится приблизительно на одном уровне и составляет в среднем 2 Бк/м³. Это обусловлено общностью источников радиоактивного загрязнения, наиболее значимы из которых глобальные атмосферные и перенос радионуклидов атлантическими водными массами от западноевропейских радиохимических предприятий (Селлафилд и др.). В морях Лаптевых, Восточно-Сибирском, которые в меньшей степени подвержены влиянию Атлантики, отмечены минимальные уровни загрязнения ^{137}Cs .

Таблица 3. Результаты статистического анализа различий в содержании ^{137}Cs в поверхностных водах российских морей Северного Ледовитого океана (2013–2017 гг.) с использованием критерия Манна–Уитни

Сравниваемые пары	U	Z	p
Баренцево море — Карское море	4211,500	-2,000	0,046
Баренцево море — море Лаптевых	5442,000	-4,838	<0,001
Баренцево море — Восточно-Сибирское море	1494,000	-5,892	<0,001
Карское море — море Лаптевых	1070,000	-4,674	<0,001
Карское море — Восточно-Сибирское море	323,500	-5,170	<0,001
Море Лаптевых — Восточно-Сибирское море	1210,500	-1,853	0,064

Распределение ^{90}Sr в воде арктических морей характеризуется большим разбросом значений объёмной активности, не позволяющим выявить чёткие закономерности. Уровень ^{90}Sr в водах Центрального Полярного бассейна заметно ниже, чем в смежных арктических акваториях. Вероятно, такие значения ^{90}Sr в водах самой высокоширотной области Арктики обусловлены отсутствием влияния материко-

вого стока — главного поставщика этого изотопа в морскую среду [8].

На протяжении всей истории морских радиоэкологических исследований в Российской Арктике Баренцево море остаётся одним из наиболее изученных. На его примере можно с достаточной объективностью проанализировать пространственные (табл. 4) и временные закономерности изменения уровней радиоактивного загрязнения (рис. 2).

Баренцево море — система, открытая для поступления вод из соседних акваторий, в составе которых могут быть различные загрязнители, в том числе искусственные радионуклиды. На гидрологический режим в бассейне наибольшее влияние по сравнению с другими арктическими морями оказывают воды атлантического происхождения. В настоящее время это один из главных источников поступления искусственных радионуклидов в экосистему [11]. Также представляет интерес влияние потенциально опасных объектов атомного флота, расположенных на берегах Кольского полуострова (в Кольском и Мотовском заливах, губе Андреева и др.) и архи-

Таблица 4. Распределение ^{137}Cs , ^{90}Sr (Бк/м³) в водных массах Баренцева моря (слой 0 м) в 2017 г.

Тип водной массы	^{137}Cs			^{90}Sr		
	Среднее значение	Стандартное отклонение	n	Среднее значение	Стандартное отклонение	n
Прибрежная	2,0	0,7	5	2,1	0,7	6
Атлантическая	1,9	0,1	4	0,6	0,7	2
Трансформированная атлантическая	1,9	0,6	8	—	—	—
Баренцевоморская	1,6	0,4	4	0,9	0,9	3
Арктическая	1,6	1,1	14	1,6	1,1	5
Фронтальная зона	2,2	1,4	5	1,4	1,4	1

Примечание. n — количество измеренных проб.

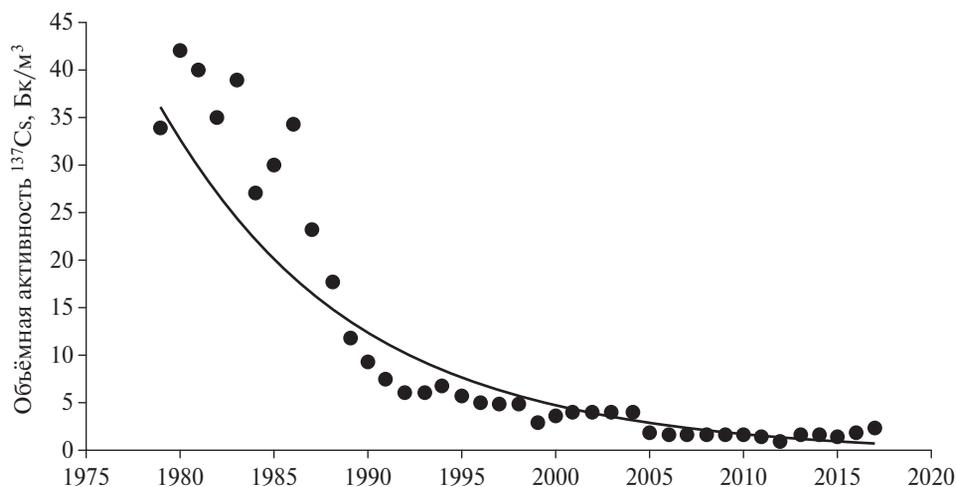


Рис. 2. Многолетняя динамика объёмной активности ^{137}Cs в воде Баренцева моря.

пелага Новая Земля (в губе Чёрной). Показателем их влияния может быть повышенный уровень радиоактивности прибрежных вод, формирующихся с участием материкового стока.

В работе использовались схема циркуляции вод и положение климатических фронтальных зон в Баренцевом море [12]. Типизация водных масс (табл. 4) выполнена по классификации, предложенной Л.К. Цехоцкой [13], в основе которой лежит изменчивость гидрологических характеристик (температуры и солёности) на станциях отбора проб.

Статистический анализ распределения объёмной активности искусственных радионуклидов в шести типах водных масс Баренцева моря на основе критерия Краскела—Уоллиса показал отсутствие статистически значимых различий в пространственном распределении ^{137}Cs ($H=5,654$, $df=5$; $p=0,341$) и ^{90}Sr ($H=5,227$, $df=4$; $p=0,265$).

Увеличение ^{137}Cs в воде Баренцева моря (до 45 Бк/м^3) произошло к 1979–1980 гг. С этого времени многолетняя динамика изменения объёмной активности ^{137}Cs в воде Баренцева моря подчиняется законам экспоненциального снижения. Экспоненциальная функция, с высокой степенью достоверности ($R^2=0,91$) описывающая наблюдаемую тенденцию, имеет вид $y=36,069e^{-0,097x}$, где x — количество лет, прошедших после максимума загрязнения. Время, за которое происходит уменьшение концентраций ^{137}Cs в 2 раза, для Баренцева моря ~7 лет, что меньше физического периода полураспада рассматриваемого радионуклида.

Современная радиационная обстановка в Центральном Полярном бассейне и российских морях Северного Ледовитого океана, оценённая по данным 2013–2017 гг., характеризуется как благополучная и отражает общее снижение влияния приоритетных ранее источников. Выявлены статистически значимые различия средней объёмной активности ^{137}Cs в поверхностном слое вод. Отмечена тенденция уменьшения загрязнённости морской среды в направлении с запада на восток. Максимальные концентрации ^{137}Cs характерны для Баренцева моря, в бассейне которого в XX в. разгружались трансграничные поступления западноевропейских радиохимических предприятий, проводили надводные, подводные ядерные взрывы, сбросы и захоронения

ядерных отходов. Повышенный уровень загрязнения ^{137}Cs Карского моря сформировался преимущественно в результате поступления с речным стоком радиоактивных отходов с заводов Сибири. Меньше всего загрязнены воды морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, наиболее удалённых от европейских источников техногенных радионуклидов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ КНЦ РАН по теме “Воздействие климатических факторов, химического и радиационного загрязнения на морские экосистемы Арктики в условиях комплексного природопользования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. // Атом. энергия. 1985. Т. 58. В. 6. С. 445–449.
2. Aarkrog A.J. // Environ. Radioactivity. 1994. № 25. P. 21–35.
3. Livingston H.D., Kupferman S.L., Bowen V.T., Moore R.M. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1984. V. 48. P. 2195–2203.
4. Smith J.N., Ellis K.M. // Deep-Sea Res. II. 1995. V. 42. № 6. P. 1449–1470.
5. Crene K., Galasso J.L. Arctic Environmental Atlas. Wash. (DC): Naval Res. Lab., 1999. 164 p.
6. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. 417 с.
7. Arctic Pollution Issues: a State of the Arctic Environment Report. AMAP Arctic. Oslo: Monitoring and Assessment Programme, 1997. 188 p.
8. Тенденции и динамика загрязнения природной среды Российской Федерации на рубеже XX–XXI вв. / Под ред. Ю.А. Израэля. М.: Изд-во Росгидромета, 2007. 65 с.
9. Гржибовский А.М. // Экология человека. 2008. № 3. С. 50–58.
10. Унгурияну Т.Н., Гржибовский А.М. // Экология человека. 2011. № 5. С. 55–60.
11. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Усягина И.С., Касаткина Н.Е., Павельская Е.В. // ДАН. 2011. Т. 439. № 6. С. 822–827.
12. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В., Жичкин А.П. // Пробл. Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 7–21.
13. Цехоцкая Л.К. В кн.: Жизнь и условия ее существования в пелагиали Баренцева моря. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1985. С. 42–46.

TECHNOGENIC RADIOACTIVITY OF WATERS IN THE CENTRAL ARCTIC BASIN AND ADJACENT WATER AREA

Academician of the RAS **G. G. Matishov, N. E. Kasatkina, I. S. Usyagina**

Received May 16, 2018

The contemporary radiation situation in the Arctic Basin and Russian Arctic seas is assessed on the basis of data from 2013 to 2017. Statistically significant differences are revealed in the mean volumetric activity of ^{137}Cs in the surface water layer. The tendency toward a west-to-east decrease in seawater pollution is noted. The maximum ^{137}Cs concentrations are characteristic of the Barents and Kara seas. The least polluted waters are reported in the Laptev and East Siberian seas, which are the most remote from the sources of technogenic radionuclides in Europe.

Keywords: water, Arctic Ocean, Arctic seas, pollution, technogenic radionuclides.