

Радиационный мониторинг питьевой воды в районе Белоярской АЭС

А.В. Панов¹, А.В. Трапезников², А.В. Коржавин², И.В. Гешель¹, С.В. Коровин¹, М.А. Эдомская¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Министерства образования и науки России, Обнинск, Россия

²Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

В статье дана радиационно-гигиеническая оценка современного состояния источников питьевого водоснабжения населения в зоне наблюдения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов. На примере тестовых населенных пунктов, расположенных на разном расстоянии и направлениях от радиационно-опасных объектов, определено содержание природных (^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th) и техногенных (^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am) радионуклидов в питьевой воде водопроводов, скважин и колодцев. Результаты мониторинга источников водопользования в 2012–2013 гг. и в 2019 г. показали радиационную безопасность питьевых вод в регионе Белоярской АЭС по ряду критериев. Так, максимальные уровни удельной суммарной альфа-активности радионуклидов в пробах были в 3,9 раза ниже критерия предварительной оценки соответствия воды требованиям радиационной безопасности (0,2 Бк/кг), удельной суммарной бета-активности – в 5,7 раза меньше данного критерия (1 Бк/кг). За весь период наблюдений ни в одной из проб питьевых вод не были превышены как уровни вмешательства по отдельным радионуклидам, определенные Приложением 2а к НРБ-99/2009, так и критерий соответствия питьевой воды требованиям радиационной безопасности – сумма отношений удельных активностей радионуклидов к уровням вмешательства не превышала 1. Содержание природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде района Белоярской АЭС снижается в ряду: колодцы > скважины > водопроводы. Показано уменьшение за последние 20 лет удельной активности трития в питьевой воде района Белоярской АЭС на 20–35% в зависимости от источника водоснабжения. Отмечено, что начало эксплуатации реактора БН-800 не привело к увеличению содержания техногенных радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs) в подземных водах. Средняя годовая эффективная доза внутреннего облучения населения от потребления питьевой воды в зоне потенциального влияния Белоярской АЭС составляет 0,05 мЗв, по консервативным оценкам – 0,07 мЗв, что ниже референтного дозового уровня ожидаемой эффективной дозы за счет потребления питьевой воды в течение одного года (0,1 мЗв/год), рекомендованного ВОЗ. Основной вклад в формирование средней годовой эффективной дозы внутреннего облучения населения (98,9%) от потребления питьевой воды в районе Белоярской АЭС вносят природные радионуклиды. Наибольший вклад в дозу внутреннего облучения за счет потребления питьевой воды от природных радиоизотопов вносит ^{210}Po – 43%, несколько меньший ^{210}Pb – 25%. На третьем месте в дозоформировании от природных радионуклидов находятся: ^{234}U (8%), ^{228}Ra (7%), ^{226}Ra (6%) и ^{230}Th (6%). Роль остальных природных радиоизотопов в формировании дозы внутреннего облучения от потребления питьевой воды не превышает 2–3%. Вклад техногенных радионуклидов в среднюю годовую эффективную дозу от потребления питьевой воды ничтожно мал (около 1%). От техногенной компоненты наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят ^{90}Sr (60%), ^3H (20%) и ^{241}Am (12%).

Ключевые слова: радиационный контроль, подземные воды, водопровод, скважина, колодец, природные и техногенные радионуклиды, удельная активность, радиационно-гигиеническая оценка, уровни вмешательства, доза облучения за счет потребления питьевой воды.

Введение

Питьевая вода – это один из наиболее ценных природных ресурсов, от качества которого напрямую зависит здоровье и нормальная жизнедеятельность человека. Поэтому к обеспечению приемлемого уровня безопасности питьевой

воды предъявляются специальные требования, как во многих развитых странах мира, так и на международном уровне [1]. Одним из важных контролируемых показателей качества питьевой воды является радиоактивность, обусловленная наличием в ней природных и техногенных радионуклидов.

Панов Алексей Валерьевич

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

Адрес для переписки: 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: riar@mail.ru

Радиационный контроль источников питьевого водоснабжения, наряду с оценкой содержания радиоизотопов в почве, атмосферном воздухе и продуктах питания, включен в систему обеспечения радиационной безопасности населения. Подходы к нормированию допустимой удельной активности радионуклидов в питьевой воде, методология организации радиационного контроля и проведения мониторинга источников питьевого водоснабжения, а также методы идентификации радиоизотопов в последние десятилетия активно развиваются в США, Канаде, Австралии, странах ЕС, Турции, Индии [2] и России [3, 4]. Например, для природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb , содержащихся в питьевой воде и характеризующихся высокими индексами радиотоксичности [5], в Нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009¹ установлены наиболее жесткие уровни вмешательства (УВ). Особое внимание в радиационном нормировании уделяется минеральной питьевой воде, которая, с одной стороны, имеет повышенное содержание природных радиоизотопов, и ее потребление влияет на формирование дозы внутреннего облучения человека, с другой – она обладает положительным терапевтическим эффектом и используется в медицине [6].

Особенно значим вклад в дозу внутреннего облучения от поступления в организм человека с питьевой водой природных радионуклидов рядов урана и тория, попадающих в водоносные слои при их выщелачивании из водовмещающих пород. Необходимо отметить, что в подземных водах нарушено равновесие радиоизотопов в уран-ториевых рядах, что определяется физико-химическими процессами в жидкой и твердой фазах, а также на границе вода – горная порода [2].

Питьевая вода на схожей территории может иметь не только разную удельную активность природных радионуклидов, но и отличающийся радиоизотопный состав. Это обусловлено концентрацией радионуклидов в породах, гидравлическим взаимодействием разных водоносных горизонтов, проницаемостью тектонических зон, «окнами» в водоупорных пластах и другими факторами [7]. Например, в относительно небольшой по площади Финляндии содержание природных радионуклидов в питьевой воде разных районов страны отличается на несколько порядков величин. Диапазон

вариации удельной активности ^{238}U в финской питьевой воде составляет 0,0005–150 Бк/кг; ^{226}Ra – 0,01–49 Бк/кг; ^{210}Pb – 0,0002–21 Бк/кг; ^{210}Po – 0,0002–7,6 Бк/кг; ^{228}Ra – 0,018–0,57 Бк/кг [8]. В России содержание природных радионуклидов в питьевых водах также варьирует в широких пределах: ^{238}U – 0,002–3,7 Бк/кг; ^{226}Ra – 0,006–1,28 Бк/кг; ^{210}Pb – 0,002–0,04 Бк/кг; ^{210}Po – 0,002–0,48 Бк/кг; ^{228}Ra – 0,002–0,32 Бк/кг [9]. Большой разброс значений удельной активности природных радиоизотопов в питьевой воде России определяет вариабельность формирующихся при ее употреблении доз внутреннего облучения человека: 0,003–0,5 мЗв/год [9]. Таким образом, на содержание природных радионуклидов в подземных водах и дозоформирование населения от потребления питьевых вод влияет комплекс физико-химических, физико-географических, геологических, гидрологических, биологических и других факторов [10, 11].

Второй важной задачей по обеспечению радиационной безопасности человека при потреблении питьевой воды является радиационный контроль источников водопользования в регионах размещения радиационно-опасных объектов, поскольку содержание техногенных радионуклидов в воде может повышаться вследствие их поступления в окружающую среду в результате радиационных аварий, сбросов и выбросов предприятий атомной энергетики, неправильной эксплуатации ядерных установок^{2,3}.

Особенно актуальна данная проблема для районов расположения атомных электростанций, так как сбросы техногенных радионуклидов АЭС в грунтовые воды, их миграция и накопление в водовмещающих породах могут стать дополнительным фактором, влияющим на увеличение дозы внутреннего облучения населения при потреблении питьевой воды из источников водоснабжения, находящихся в зоне влияния радиационно-опасного объекта. Например, в районе размещения Белоярской АЭС (БАЭС) обнаружена прямая корреляция между содержанием в питьевой воде (хотя и ниже УВ) одного из наиболее радиологически значимых радионуклидов – трития (^3H) и его концентрацией в моче людей, проживающих в регионе расположения атомной электростанции [12].

Район Белоярской АЭС БАЭС представляет интерес для изучения особенностей влияния природной и техно-

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009 [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standard NRB-99/2009" (In Russ.)].

² МУ 2.6.1.1981-05 Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов: методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005. 39 с. [Guidelines 2.6.1.1981-05 Radiation control and hygienic assessment of drinking water supply and drinking water sources according to radiation safety indicators. Optimization of protective measures for drinking water supply sources with an increased content of radionuclides. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor. 2005:39 (In Russ.)]

³ МУ 2.6.1.2713-10 Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов. Изм. 1 к МУ 2.6.1.1981-05: Методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 12 с. [Guidelines 2.6.1.2713-10 Radiation control and hygienic assessment of drinking water supply and drinking water sources according to radiation safety indicators. Optimization of protective measures for drinking water supply sources with an increased content of radionuclides. Changes to Guidelines 2.6.1.1981-05. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor. 2011:12 (In Russ.)]

генной компонент на дозоформирование населения от потребления питьевой воды. БАЭС расположена на Урале (Свердловская область), в 42 км от г. Екатеринбурга. Водонесные горизонты Уральского региона характеризуются присутствием горных пород с повышенным содержанием радионуклидов уран-ториевого рядов, а также наличием так называемых «радоновых аномалий» [13]. Белоярская АЭС является одной из старейших в России (начало эксплуатации с 1964 г.) и имеет в своем составе 4 энергоблока: АМБ-100 и АМБ-200 остановлены и находятся на стадии вывода из эксплуатации, БН-600 и БН-800 в настоящее время эксплуатируются. На площадке БАЭС расположен АО «Институт реакторных материалов» (ИРМ) с действующим исследовательским реактором ИВВ-2М (запущен в 1966 г.). Радионуклидный состав выбросов ИРМ схож с таковыми БАЭС, а сбросные технологические воды от эксплуатирующихся реакторов этих объектов атомной энергетики объединены в единую систему. Поэтому при оценке воздействия на окружающую среду от сбросов и выбросов радионуклидов, БАЭС и ИРМ рассматриваются как один объект.

Радиационный мониторинг подземных вод в зоне влияния Белоярской АЭС проводится более 40 лет и был всегда ориентирован на идентификацию техногенного загрязнения. Так, в 1981–1989 гг. в питьевой воде района расположения БАЭС обнаруживались повышенные концентрации трития (от 11 до 49 Бк/кг). Среднее содержание этого радионуклида в воде колодцев составляло 30 ± 2 Бк/кг, скважин 26 ± 2 Бк/кг, что в 5–6 раз превышало техногенный фон, характерный для Уральского региона [14]. Высокие уровни удельной активности ^3H в питьевой воде района БАЭС в тот период были обусловлены эксплуатацией первых двух реакторов АМБ-100 (1964–1981 гг.) и АМБ-200 (1967–1989 гг.), а именно повышенными сбросами радионуклидов в водные экосистемы и несовершенством систем очистки сбросных технологических вод. В более поздних исследованиях (1996–2005 гг.) отмечалось некоторое снижение удельной активности трития в питьевой воде: до 2–25 Бк/кг в воде колодцев и 1–22 Бк/кг в воде скважин [15], что связано с остановкой реакторов АМБ и существенно меньшими сбросами данного радионуклида от эксплуатации более безопасного и конструктивно совершенного реактора БН-600.

Ранее нами была проведена комплексная радиационно-гигиеническая оценка качества сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов в районе расположения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов [16]. Однако потребление питьевой воды так же, как и потребление продуктов питания, является важным путем поступления радионуклидов в организм человека. Представленный обзор исторических аспектов техногенного загрязнения источников водопользования в районе расположения БАЭС и ИРМ ставит задачу современной радиационной оценки показателей качества питьевой воды, а также ее роли в дозоформировании населения, проживающего в зоне потенциального влияния радиационно-опасных объектов.

Цель исследования – оценка радиационной безопасности использования источников питьевого водоснабжения в районе расположения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов.

Задачи исследования

1. Сравнительный анализ различных источников водопользования и их размещения в зоне влияния Белоярской АЭС как факторов, определяющих содержание природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде.

2. Оценка динамики удельной активности техногенных радионуклидов в подземных водах региона Белоярской АЭС во времени и влияния начала эксплуатации нового реактора БН-800 на дополнительное поступление радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^3H в питьевую воду.

3. Радиационно-гигиеническая оценка соответствия содержания природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде района размещения Белоярской АЭС требованиям НРБ-99/2009.

4. Определение дозовой нагрузки на население от потребления питьевой воды в районе расположения Белоярской АЭС, а также рейтинга природных и техногенных радионуклидов по вкладу в дозу внутреннего облучения.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны 10 тестовых населенных пунктов и одна база отдыха (база «Путеец»), входящих в 13-километровую зону наблюдения Белоярской АЭС, расположенных на разном расстоянии и направлениях от атомной электростанции. Отобранные для мониторинга населенные пункты являются наиболее представительными с точки зрения источников водопользования городского и сельского населения. База «Путеец» находится вблизи БАЭС на западном берегу Белоярского водохранилища, где размещены множество других рекреационных зон, используемых населением региона атомной электростанции для отдыха. Как правило, обязательному радиационному контролю подлежит питьевая вода из источников централизованного водоснабжения (водопроводов), в то время как индивидуальные скважины или колодцы в небольших населенных пунктах проверяются нерегулярно или не входят в состав сети мониторинга. Поэтому для более полного охвата источников водопользования района БАЭС все тестовые населенные пункты были разделены на три группы по типу контролируемых систем водоснабжения: водопровод, скважина, колодец (табл. 1).

Мониторинговые исследования подземных вод района БАЭС, включающие контроль широкого спектра природных (^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th) и техногенных (^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am) радионуклидов проводились в 2012–2013 гг. до ввода в эксплуатацию реактора БН-800 атомной электростанции. В 2019 г., т.е. через 3 года после начала работы нового энергоблока, мониторинговые работы были продолжены. Оценивалась удельная активность в питьевой воде наиболее радиологически значимых техногенных радионуклидов: ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^3H . Для оптимизации проведения мониторинга в 2019 г. природные радионуклиды уже не контролировались, поскольку их концентрация в подземных водах подвержена малой вариабельности по годам, согласно работе [17].

Населенные пункты сети радиационного мониторинга питьевой воды в районе Белоярской АЭС

Таблица 1

[Table 1

Settlements of the drinking water radiation monitoring network in the vicinity of the Beloyarsk NPP]

Источник водоснабжения [Source of water supply]					
Водопровод [Tap water]		Скважина [Water borehole]		Колодец [Water well]	
Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]	Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]	Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]
Заречный [Zarechny]	Ю, 3,5 [S, 3,5]	База отдыха «Путеец» [Recreation "Navy"]	Ю-З, 5,2 [S-W, 5,2]	Режик [Rezhik]	В, 4,5 [E, 4,5]
Малиновка [Malinovka]	В, 11,5 [E, 11,5]	Боярка [Boyarka]	Ю, 8,5 [S, 8,5]	Каменка [Kamenka]	С-В, 9,0 [N-E, 9,0]
Белоярский [Beloyarsky]	Ю-В, 12,5 [S-E, 12,5]	Гагарка [Gagarka]	Ю-З, 10 [S-W, 10]	Ялунина [Yalunina]	Ю-В, 9,5 [S-E, 9,5]
-	-	Мезенское [Mezenskoe]	Ю, 12 [S, 12]	Курманка [Kurmanka]	Ю, 10,5 [S, 10,5]

Отбор проб питьевой воды на всех этапах исследования проводили в летний период (июль – август), т.к. ранее было установлено отсутствие значимых сезонных колебаний содержания радионуклидов в подземных водах [17]. При отборе проб питьевая вода сливалась в течение 5 мин для стабилизации характеристик. Пробы воды отбирали в новые пластиковые флаги и сразу подкисляли небольшим количеством кислоты, предотвращая сорбцию радионуклидов на стенках сосудов. Для получения объективных результатов все пробы воды отбирали в двух параллельных повторностях по 200 л в каждой.

Определение удельной активности радионуклидов в питьевой воде проводилось в аккредитованных лабораториях ФГБУН ИЭРиЖ УрО РАН (аттестат № САРК RU.0001.441492) и ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат № RA.RU.21АД81) с межлабораторным сравнительным анализом полученных результатов. В лабораторных условиях пробы воды выпаривали до сухого остатка. Для определения содержания радиоизотопов в питьевой воде использовали высокочувствительные радиометрические и спектрометрические комплексы. Гамма-излучающие радионуклиды определяли на спектрометре ГАММА-1П с двумя измерительными трактами с полупроводниковыми детекторами из особо чистого германия («ЛСРМ», Россия, «EG&G ORTEC», США) и многоканальном гамма-спектрометре CANBERRA («Canberra Industries, Inc.», США). Альфа- и бета-активность препаратов измеряли на жидкосцинтилляционном спектрометре TRI-CARB 4810 TR («Perkin Elmer», США), жидкосцинтилляционном спектрометрическом комплексе СКС-07П-Б11 («Green Star», Россия) и альфа-бета-радиометре с кремниевым детектором УМФ-2000 (НПП «Доза», Россия). Относительная погрешность

измерений активности радиоизотопов составляла не более 30% в зависимости от используемого прибора и метода измерения.

В период исследований 2019 г. в пробах подземных вод определяли их физико-химические показатели многопараметрическим прибором оценки качества воды U-52 (Horiga, Япония). Средняя температура питьевой воды в момент отбора варьировала в пределах +12...+15 °С (табл. 2). По всем характеристикам, за исключением окислительно-восстановительного потенциала и растворенного кислорода, водопроводная и колодезная вода были схожи. Питьевая вода с наименьшими показателями мутности наблюдалась в скважинах. Во всех источниках водоснабжения отобранные пробы питьевой воды являлись слабо минерализованными (менее 1 г/л), что предвзвешивало о пониженном содержании в ней природных радионуклидов.

Определение качества и безопасности питьевой воды по радиационным показателям проводили в соответствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2800-10⁴. Измеренные удельные активности природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде сравнивали с соответствующими уровнями вмешательства по Приложению 2а к НРБ-99/2009⁵. Радиационную безопасность источников питьевого водоснабжения региона БАЭС и ИРМ оценивали на основе комплекса критериев: удельной суммарной альфа- и бета-активности радионуклидов в питьевой воде, соответствия удельной активности радионуклидов уровням вмешательства, а также по дозам внутреннего облучения населения при потреблении питьевой воды. Многолетние мониторинговые исследования позволили

⁴ СанПиН 2.6.1.2800-10 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения» [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2800-10 "Hygienic requirements to limitation of population exposure from natural ionizing irradiation sources" (In Russ.)].

⁵ СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009 [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standard NRB-99/2009" (In Russ.)].

Таблица 2

Физико-химические свойства питьевой воды в районе Белоярской АЭС на момент отбора проб в период 22–25 июля 2019 г.

[Table 2

Physical and chemical properties of drinking waters in the vicinity of the Beloyarsk NPP in the period of sampling 22-25 July 2019]

Показатель [Indicator]	Источник водоснабжения [Source of water supply]		
	Водопровод [Tap water]	Скважина [Water borehole]	Колодец [Water well]
Температура, °C [Temperature, °C]	13,8±3,4	12,1±1,4	15,1±2,3
Водородный показатель (pH) [Hydrogen indicator (pH)]	6,6±0,3	6,2±0,2	6,7±0,2
Окислительно-восстановительный потенциал, мВ [Redox potential, mV]	182±62	210±23	231±51
Удельная электропроводность, мкС/см [Electrical conductivity, mcC/cm]	0,41±0,15	0,30±0,12	0,45±0,24
Мутность, ЕМФ [Turbidity, EMF]	0,6±0,6	0,3±0,2	0,7±0,6
Растворенный кислород, мг/л [Dissolved oxygen, mg/L]	4,9±0,9	6,0±3,0	7,1±2,4
Общее содержание растворенных твердых веществ, г/л [Total dissolved substance, g/L]	0,26±0,09	0,20±0,08	0,29±0,15

определить не только состояние источников водопользования по радиационным показателям при штатной эксплуатации БАЭС и ИРМ, но и влияние работы нового реактора БН-800 на динамику содержания техногенных радионуклидов в питьевой воде района размещения радиационно-опасных объектов.

Результаты и обсуждение

На первом этапе анализа результатов измерений была проведена оценка радиационной безопасности питьевой воды водопроводов (табл. 3), скважин (табл. 4) и колодцев (табл. 5) тестовых населенных пунктов по интегральным

Таблица 3

Удельная активность радионуклидов в питьевой воде водопроводов населенных пунктов района Белоярской АЭС в 2012–2013 гг., Бк/кг

[Table 3

Specific activity of radionuclides in drinking water from tap water of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2012–2013, Bq/kg]

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Заречный [Zarechny]	Малиновка [Malinovka]	Белоярский [Beloyarsky]	
Предварительная оценка качества воды по показателям радиационной безопасности [Preliminary assessment of water quality in terms of radiation safety indicators]				
$\Sigma\alpha$ -активность [$\Sigma\alpha$ -activity]	0,05±0,01	0,015±0,0004	0,02±0,005	0,2
$\Sigma\beta$ -активность [$\Sigma\beta$ -activity]	0,17±0,01	0,029±0,002	0,09±0,006	1,0
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ высокая [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is high]				
²³⁴ U	–	0,08±0,04	<0,12	2,8
²³⁸ U	–	0,008±0,004	0,008±0,005	3,0
²²⁶ Ra	<0,05	<0,01	<0,01	0,49
²²⁸ Ra	<0,05	<0,0009	<0,0009	0,2
²¹⁰ Po	–	0,02	0,02	0,11
²²² Rn	2,1±0,8	2,9±1,2	<3,0	60
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ возможна в отдельных случаях [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is possible in some cases]				
²¹⁰ Pb	–	0,02	0,02	0,2
²²⁸ Th	–	0,014±0,05	0,017±0,003	1,9

Окончание таблицы 3

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Заречный [Zarechny]	Малиновка [Malinovka]	Белоярский [Beloyarsky]	
²³⁰ Th	–	0,013±0,002	0,008±0,002	0,65
²³² Th	–	<0,014	<0,014	0,6
Радионуклиды, контроль за которыми осуществляется в зонах наблюдения радиационных объектов [The radionuclides, which are monitored in areas of observation of radiation facilities]				
³ H	5,9±1,3 (6,3±4,8*)	11,1±1,1 (7,3±2,5)	5,2±1,2 (7,1±1,3)	7 600
¹⁴ C	–	<0,007	<0,007	240
⁶⁰ Co	<0,0006	<0,0006	<0,0006	40
⁹⁰ Sr	<0,0005 (0,009±0,001)	0,03±0,004 (0,01±0,001)	0,015±0,001 (0,009±0,003)	4,9
¹³⁴ Cs	–	<0,0004	0,0004±0,0003	7,2
¹³⁷ Cs	0,003±0,0005 (0,004±0,002)	0,003±0,001 (<0,0005)	0,004±0,001 (0,003±0,001)	11
²³⁸ Pu	–	0,00001	0,0002	0,6
^{239,240} Pu	–	0,00002	0,00002	0,55
²⁴¹ Am	–	<0,0004	<0,0004	0,69

* – в скобках результаты 2019 г. [in brackets results of 2019].

Таблица 4

Удельная активность радионуклидов в питьевой воде скважин населенных пунктов района Белоярской АЭС в 2012–2013 гг., Бк/кг

[Table 4

Specific activity of radionuclides in drinking water from water borehole of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2012–2013 Bq/kg

Радионуклид [Radionuclide]	База отдыха «Путеец» [Recreation "Navy"]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
		Боярка [Boyarka]	Гагарка [Gagarka]	Мезенское [Mezenskoe]	
Предварительная оценка качества воды по показателям радиационной безопасности [Preliminary assessment of water quality in terms of radiation safety indicators]					
Σα-активность [Σα-activity]	–	0,03±0,01	–	0,02±0,005	0,2
Σβ-активность [Σβ-activity]	–	0,18±0,03	–	0,07±0,004	1,0
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ высокая [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is high]					
²³⁴ U	–	–	–	<0,07	2,8
²³⁸ U	–	–	–	0,008±0,004	3,0
²²⁶ Ra	<0,05	–	–	<0,005	0,49
²²⁸ Ra	<0,05	–	–	<0,001	0,2
²¹⁰ Po	–	–	–	0,03	0,11
²²² Rn	–	4,1±1,6	–	<3,0	60
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ возможна в отдельных случаях [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is possible in some cases]					
²¹⁰ Pb	–	–	–	0,03	0,2
²²⁸ Th	–	–	–	0,01±0,001	1,9
²³⁰ Th	–	–	–	0,02±0,0008	0,65
²³² Th	–	–	–	<0,005	0,6

Окончание таблицы 4

Радионуклид [Radionuclide]	База отдыха «Путеец» [Recreation "Navy"]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
		Боярка [Boyarka]	Гагарка [Gagarka]	Мезенское [Mezenskoe]	
Радионуклиды, контроль за которыми осуществляется в зонах наблюдения радиационных объектов [The radionuclides, which are monitored in areas of observation of radiation facilities]					
³ H	6,1±1,4 (4,7±1,3*)	5,6±1,3 (4,8±2,1)	5,2±0,7 (7,0±0,8)	11,3±1,6 (8,6±2,5)	7 600
¹⁴ C	–	–	–	<0,007	240
⁶⁰ Co	–	–	–	<0,0003	40
⁹⁰ Sr	–	<0,0005	–	0,021±0,003	4,9
¹³⁴ Cs	–	–	–	0,0002±0,0001	7,2
¹³⁷ Cs	0,005±0,001 (0,007±0,002)	0,004±0,002 (0,002±0,0005)	0,004±0,001 (0,005±0,002)	0,002±0,0005	11
²³⁸ Pu	–	–	–	0,000024	0,6
^{239,240} Pu	–	–	–	0,000015	0,55
²⁴¹ Am	–	–	–	<0,00023	0,69

* – в скобках результаты 2019 г. [in brackets results of 2019].

Таблица 5

**Удельная активность радионуклидов в питьевой воде колодцев населенных пунктов района Белоярской АЭС
в 2012–2013 гг., Бк/кг**

[Table 5]

**Specific activity of radionuclides in drinking water from water well of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP,
2012–2013, Bq/kg]**

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]				Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Режик [Rezhik]	Каменка [Kamenka]	Ялунина [Yalunina]	Курманка [Kurmanka]	
Предварительная оценка качества воды по показателям радиационной безопасности [Preliminary assessment of water quality in terms of radiation safety indicators]					
∑α-активность [∑α-activity]	–	–	0,014±0,001	0,041±0,002	0,2
∑β-активность [∑β-activity]	–	–	0,064±0,006	0,041±0,001	1,0
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ высокая [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is high]					
²³⁴ U	–	–	<0,28	0,19±0,09	2,8
²³⁸ U	–	–	0,009±0,004	0,009±0,004	3,0
²²⁶ Ra	–	–	<0,017	<0,009	0,49
²²⁸ Ra	–	–	<0,0009	<0,0009	0,2
²¹⁰ Po	–	–	0,026	0,034	0,11
²²² Rn	3,1±1,2	–	3,9±1,6	3,9±1,6	60
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ возможна в отдельных случаях [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is possible in some cases]					
²¹⁰ Pb	–	–	0,026	0,034	0,2
²²⁸ Th	–	–	0,03±0,005	0,014±0,004	1,9
²³⁰ Th	–	–	0,03±0,003	0,023±0,002	0,65
²³² Th	–	–	<0,017	<0,009	0,6
Радионуклиды, контроль за которыми осуществляется в зонах наблюдения радиационных объектов [The radionuclides, which are monitored in areas of observation of radiation facilities]					
³ H	5,8±1,3 (7,1±1,7*)	6,4±1,4 (13,0±0,8)	8,7±0,9 (5,6±0,5)	13,2±1,1 (9,5±2,2)	7 600

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]				Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Режик [Rezhik]	Каменка [Kamenka]	Ялунина [Yalunina]	Курманка [Kurmanka]	
¹⁴ C	–	–	<0,007	<0,007	240
⁶⁰ Co	–	–	<0,001	<0,0005	40
⁹⁰ Sr	–	–	0,02±0,0001 (0,01±0,008)	0,025±0,001	4,9
¹³⁴ Cs	–	–	0,0009±0,0007	0,001±0,0003	7,2
¹³⁷ Cs	0,004±0,002 (0,002±0,001)	0,005±0,002 (0,003±0,001)	0,006±0,002 (0,005±0,002)	0,002±0,0008	11
²³⁸ Pu	–	–	0,00001	0,000005	0,6
^{239,240} Pu	–	–	0,00002	0,000013	0,55
²⁴¹ Am	–	–	<0,0009	<0,00048	0,69

* – в скобках результаты 2019 г. [in brackets results of 2019].

показателям: удельной суммарной альфа-активности (A_α), критерий соответствия требованиям радиационной безопасности (контрольный уровень – КУ) равен 0,2 Бк/кг и удельной суммарной бета-активности (A_β), критерий соответствия равен 1,0 Бк/кг. Целью такого скринингового анализа является предварительная оценка качества питьевой воды по радиационным показателям. В практике радиационного контроля источников водопотребления данный подход позволяет избежать большого количества дорогостоящих измерений широкого спектра природных и техногенных радионуклидов в воде при непревышении КУ по A_α и A_β , т.е. метод обычно используется как экономически обоснованный оценочный инструмент.

Из данных, приведенных в таблицах 3–5, видно, что показатели A_α радионуклидов в питьевой воде района БАЭС по источникам водопользования могут отличаться до 3,4 раза и составляют в среднем 0,03 Бк/кг при вариации 0,01–0,05 Бк/кг. Максимальное значение A_α зафиксировано в водопроводной воде г. Заречный, наиболее близко расположенного к БАЭС и ИРМ, однако этот показатель в 4 раза ниже соответствующего КУ. В работах [3, 18] на основе статистического анализа большой совокупности данных по A_α радиоизотопов в питьевой воде 14 субъектов Российской Федерации показано, что данный критерий оценки качества варьирует от 0,01 до 12,6 Бк/кг при среднем 0,5 Бк/кг. Таким образом, результаты измерений удельной суммарной альфа-активности радионуклидов в пробах питьевой воды района размещения БАЭС являются минимальными среди изученных регионов РФ и укладываются в 17% исследованных в них проб.

Среднее значение A_β радиоизотопов в питьевой воде тестовых населенных пунктов района БАЭС находится на уровне 0,09 Бк/кг и варьирует в диапазоне 0,03–0,18 Бк/кг, что в 5–30 раз ниже КУ (см. табл. 3–5). Максимальные показатели A_β зафиксированы в питьевой воде населенных пунктов Боярка и Заречный, расположенных в южном направлении от атомной электростанции. Среднероссийское значение удельной суммарной бета-активности радионуклидов в питьевых водах составляет 0,44 Бк/кг при варируемости 0,02–6,3 Бк/кг [3, 18], т.е.

результаты оценки качества подземных вод для района размещения БАЭС по данному критерию, так же, как и по A_α , находятся в нижней части диапазона, характерного для Российской Федерации.

Стоит отметить, что в ряде стран (например, в Канаде) скрининговые уровни удельной суммарных альфа- и бета-активностей радионуклидов в питьевых водах на практике используются мало, поскольку приведенные в нормативных документах значения референтных (ориентировочных) уровней иногда трактуются как жесткие и их возможное превышение вызывает тревогу в обществе [2].

Важной задачей настоящего исследования является определение типа источника водоснабжения в районе БАЭС, из которого в организм местных жителей поступает наибольшее количество радионуклидов с питьевой водой. На рисунке 1 показан сравнительный анализ A_α и A_β , а также удельной активности ряда природных (²³⁴U, ²¹⁰Po, ²¹⁰Pb) и техногенных (⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ³H) радионуклидов в воде водопроводов, скважин и колодцев тестовых населенных пунктов. Видно, что содержание в питьевой воде колодцев некоторых природных радионуклидов на 28–86% выше, чем в водопроводной и скважинной воде. Концентрация основных радиологически значимых техногенных радионуклидов в колодезной воде также больше по сравнению с их концентрацией в воде из водопроводов и скважин на 4–67%. В то же время удельная суммарная бета-активность радиоизотопов в питьевой воде колодцев до 50% ниже, чем в воде водопроводов и скважин. Таким образом, содержание радионуклидов в питьевой воде из различных источников водоснабжения в регионе БАЭС характеризуется широкой варируемостью, а повышенные концентрации радиоизотопов, отмеченные в питьевой воде колодцев, можно объяснить более активной миграцией радионуклидов в грунтовых водах.

Второй немаловажный аспект анализа радиационной безопасности питьевой воды в районе БАЭС и ИРМ – это оценка сбросов техногенных радионуклидов от радиационно-опасных объектов в водные экосистемы (Белоярское водохранилище и Ольховскую болотно-речную систему), их миграция по водоносным горизонтам и накопление

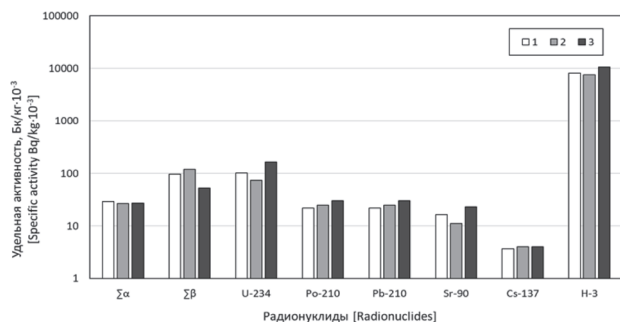


Рис. 1. Удельная активность радионуклидов в питьевой воде: 1 – водопроводов, 2 – скважин, 3 – колодцев населенных пунктов района Белоярской АЭС

[Fig. 1. Specific activity of radionuclides in drinking water: 1 – tap water, 2 – water borehole, 3 – water well of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP]

в водовмещающих породах на различном расстоянии от атомной электростанции. Такой анализ провели для биофильного, радиологически значимого радионуклида – трития, который присутствует в составе выбросов и сбросов АЭС и является одним из ведущих загрязнителей водной среды от предприятий ядерной энергетики. Питьевая вода при этом может стать важным источником поступления данного техногенного радионуклида в организм человека. В работе [19] на примере протечек ^3H из регионального хранилища РАО показано, что, несмотря на хорошую миграционную способность, даже при высоких начальных концентрациях радионуклида (37 000 Бк/кг) его содержание в подземных водах падает до 290 Бк/кг через 2–4 км от источника загрязнения, а в водопроводной воде ближайших населенных пунктов составляет уже 3–5 Бк/кг.

Результаты измерений удельной активности трития в питьевой воде из различных источников водоснабжения в зоне наблюдения БАЭС как в 2013 г., так и в 2019 г. показали отсутствие прямой корреляции между содержанием данного радионуклида в подземных водах и расстоянием от атомной электростанции (рис. 2). Значения удельных активностей ^3H в питьевой воде колебались в пределах 5–13 Бк/кг и с увеличением расстояния от БАЭС в ряде населенных пунктов даже несколько возрастали. Это говорит о том, что даже в случае наличия тритиевого загрязнения на площадке БАЭС и ИРМ в пределах санитарно-защитной зоны дополнительный вклад данного радионуклида в уже существующий техногенный фон будет минимален.

В работе [15] были проведены аналогичные исследования в конце 1990-х – начале 2000-х гг. 20 лет назад содержание трития в питьевой воде скважин населенных пунктов Боярка (8 Бк/кг), Гагарка (14 Бк/кг), Мезенское (12 Бк/кг) было в среднем на 20% выше, чем в последние годы. В воде колодцев ситуация оказалась аналогичной. За последние 20 лет содержание трития в колодезной воде населенных пунктов Режик (9 Бк/кг в начале 2000-х гг.), Ялунина (11 Бк/кг), Курманка (19 Бк/кг) уменьшилось до 35%, что обусловлено как распадом радионуклида ($T = 12,3$ лет), так и значительно меньшими его сбросами и выбросами в окружающую среду от эксплуатации реакторов типа БН по сравнению с первыми энергоблоками АМБ.

Завершая рассмотрение аспектов влияния работы БАЭС на поступление техногенных радионуклидов в ис-

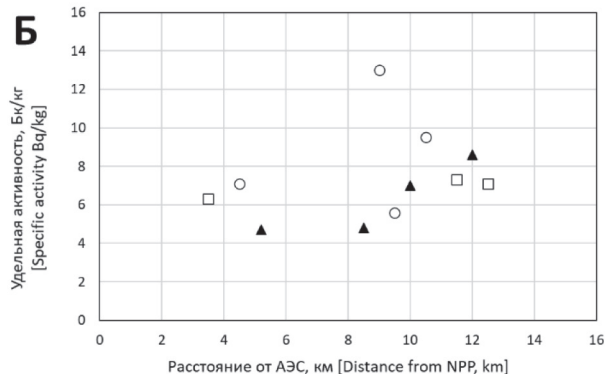
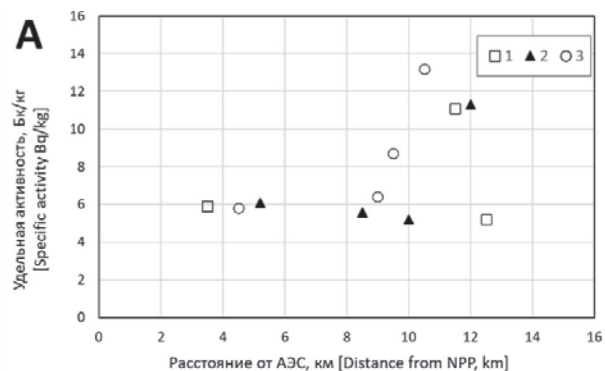


Рис. 2. Удельная активность ^3H (А – 2013 г., Б – 2019 г.) в питьевой воде: 1 – водопроводов, 2 – скважин, 3 – колодцев населенных пунктов района Белоярской АЭС

[Fig. 2. Specific activity of ^3H (А – 2013, Б – 2019) in drinking water: 1 – tap water, 2 – water borehole, 3 – water well of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP]

точники водопользования региона атомной станции, остановимся на динамике содержания наиболее радиологически значимых радиоизотопов в питьевой воде за последние годы. Так, результаты 2013 г. дают информацию о влиянии на техногенное загрязнение питьевых вод от эксплуатации реактора БН-600, а данные 2019 г. демонстрируют сочетанный вклад в такое загрязнение от работы энергоблоков БН-600 и БН-800 (рис. 3).

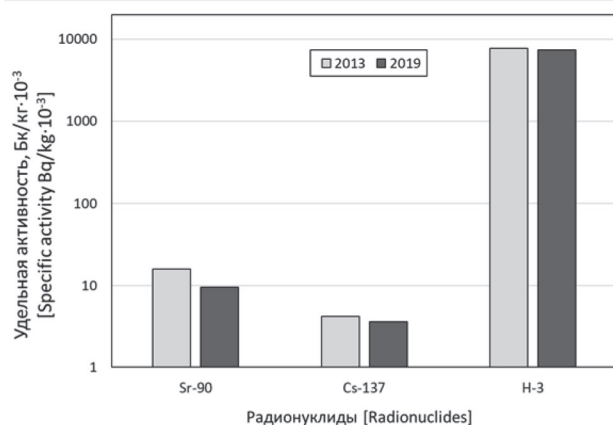


Рис. 3. Удельная активность техногенных радионуклидов в питьевой воде населенных пунктов района Белоярской АЭС в разные годы отбора проб

[Fig. 3. Specific activity of artificial radionuclides in drinking water of settlements in the vicinity of Beloyarsk the NPP in different years of taking samples]

Из данных, приведенных на рисунке 3, видно, что после начала промышленной эксплуатации реактора БН-800 удельная активность техногенных радионуклидов в питьевой воде несколько уменьшилась: ^{90}Sr до 39%, ^{137}Cs на 14%, ^3H около 4% (с учетом ошибок измерений). Эти результаты также показывают отсутствие значимого дополнительного поступления техногенных радиоизотопов в подземные воды после начала эксплуатации в 2016 г. нового реактора БН-800.

Несмотря на важность техногенного вклада в дозу внутреннего облучения населения от потребления питьевой воды, более значимым фактором дозоформирования будет являться содержание в подземных водах природных радионуклидов [9]. При этом необходимо учитывать не только радиационную опасность природных радиоизотопов, но и их роль как радиотоксикантов [5, 11]. Например, показатели удельной активности ^{234}U в пробах питьевой воды района расположения БАЭС варьируют от 0,07 Бк/кг до 0,19 Бк/кг при среднем значении 0,12 Бк/кг, а другого изотопа урана ^{238}U – в пределах 0,0082–0,0088 Бк/кг (среднее – 0,0084 Бк/кг). Соотношение удельных активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в среднем составляет 14,3, т.е. содержание изотопов урана в питьевой воде рассмотренного Уральского региона может отличаться до десяти раз. Аналогичные исследования, проведенные в Ленинградской области, показали, что если удельная активность ^{238}U в питьевой воде была сопоставима с нашими данными (в среднем 0,007 Бк/кг), то содержание изотопов урана ^{234}U в питьевой воде Ленинградской области было в 9 раз ниже (среднее 0,013 Бк/кг) по сравнению с Уралом, а соотношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ составляло 2,1 [11]. По всей видимости, на такие отличия оказывает влияние состав горных пород Уральского региона, с повышенными по сравнению с Ленинградской областью запасами ^{234}U .

Существенный вклад в формирование дозовой нагрузки на человека могут вносить изотопы природного радионуклида – радона. Поскольку на Урале отмечаются территории с высоким содержанием ^{222}Rn («радоновые аномалии»), при радиационном мониторинге подземных вод региона БАЭС необходимо обращать внимание на содержание в питьевой воде данного радионуклида. В измеренных пробах воды района БАЭС удельная активность ^{222}Rn находилась на уровне 2–4 Бк/кг вне зависимости от источника водоснабжения, что более чем в 15 раз ниже УВ для данного радионуклида. Радон является короткоживущим радионуклидом ($T_{1/2} = 3,82$ сут.), и при его распаде образуется долгоживущий изотоп ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ лет). Рассчитано, что при полном распаде радона, содержащегося в пробах питьевой воды региона БАЭС, в них накопится дополнительно 0,001–0,002 Бк/кг ^{210}Pb ,

что составит не более $6,1 \cdot 10^{-3}\%$ к уже присутствующему в воде радионуклиду и значимо не повлияет на риск превышения допустимого уровня вмешательства (0,2 Бк/кг) для данного радионуклида.

В 2012 г. параллельно с нашими исследованиями изучалось содержание радона в источниках питьевой воды г. Екатеринбурга [13]. В водопроводной воде столицы Свердловской области удельная активность ^{222}Rn находится на уровне 6,0 Бк/кг, что сопоставимо с полученными нами данными в регионе БАЭС, в воде скважин существенно выше – 21,4 Бк/кг. Максимальные уровни данного радионуклида отмечены в родниках вокруг Екатеринбурга (15–89 Бк/кг). Высокая удельная активность радона в родниковой воде ставит задачу в будущем провести радиационное обследование родников в районе БАЭС и по его результатам принять решение о необходимости включения данного типа источников питьевого водоснабжения населения в перечень контролируемых объектов водопользования данного региона.

При радиационном нормировании качества питьевой воды числовые значения уровней вмешательства (УВ) рассчитаны для каждого радионуклида так, чтобы при их не превышении среднегодовая эффективная доза облучения человека (СГЭД) от питьевой воды с учетом ее стандартного потребления (2 л/сут.) была ниже или равнялась порогу, равному 0,1 мЗв. Данный предел СГЭД рекомендован ВОЗ [1]. Для учета всего набора природных и техногенных радионуклидов, присутствующих в питьевой воде, сумма отношений удельной активности радиоизотопов к их уровням вмешательства не должна превышать 1, согласно формуле:

$$\sum_i^N A_i / \text{УВ}_i \leq 1$$

где A_i – удельная активность i -го радионуклида в питьевой воде, Бк/кг;

УВ_i – соответствующие уровни вмешательства, Бк/кг;

N – число радионуклидов, одновременно присутствующих в питьевой воде.

Удельная активность достаточно распространенного природного радионуклида ^{40}K во всех отобранных пробах питьевой воды региона БАЭС была ниже минимально детектируемых значений (1,5 Бк/кг). Сравнительный анализ содержания радионуклидов в питьевой воде района размещения БАЭС и ИРМ с соответствующими уровнями вмешательства показал, что ни по одному из них не было превышений УВ с большими коэффициентами запаса (табл. 6).

Так, максимальные зафиксированные значения удельной активности природных радионуклидов были ниже УВ:

Таблица 6

Диапазон величин суммы отношений удельных активностей радионуклидов в питьевой воде района Белооярской АЭС к соответствующим уровням вмешательства

[Table 6

The range of radionuclides specific activities ratios in drinking water of the Beloyarsk NPP area to the corresponding of intervention levels]

Радионуклид [Radionuclide]	Источник водоснабжения [Source of water supply]		
	Водопровод [Tap water]	Скважина [Water borehole]	Колодец [Water well]
Природные радионуклиды [Natural radionuclides]			
^{234}U	0,03–0,04	0,03	0,05–0,07

Радионуклид [Radionuclide]	Источник водоснабжения [Source of water supply]		
	Водопровод [Tap water]	Скважина [Water borehole]	Колодец [Water well]
²³⁸ U	0,0027–0,0028	0,0028	0,0027–0,0029
²²⁶ Ra	0,02–0,05	0,01–0,05	0,02–0,04
²²⁸ Ra	0,005–0,13	0,005–0,13	0,005
²¹⁰ Po	0,18–0,22	0,23	0,23–0,31
²²² Rn	0,04–0,05	0,05–0,07	0,05–0,07
²¹⁰ Pb	0,10–0,12	0,13	0,13–0,17
²²⁸ Th	0,007–0,009	0,005	0,007–0,016
²³⁰ Th	0,012–0,02	0,034	0,035–0,049
²³² Th	0,023–0,024	0,009	0,015–0,028
$\Sigma(A_i/UB_i)$	0,42–0,66	0,49–0,67	0,55–0,74
Техногенные радионуклиды [Technogenic radionuclides]			
³ H	0,0008–0,002	0,0007–0,0015	0,0009–0,0017
¹⁴ C	0,00003	0,00003	0,00003
⁶⁰ Co	0,00001–0,0002	0,000008	0,00001–0,00003
⁹⁰ Sr	0,002–0,005	0,0001–0,004	0,004–0,005
¹³⁴ Cs	0,00005	0,00003	0,00013–0,00014
¹³⁷ Cs	0,0003–0,0004	0,0002–0,0006	0,0002–0,0006
²³⁸ Pu	0,00002–0,00004	0,00004	0,00001–0,00002
^{239,240} Pu	0,00003–0,00004	0,00003	0,00002–0,00003
²⁴¹ Am	0,0006–0,0008	0,0003	0,0007–0,0013
$\Sigma(A_i/UB_i)$	0,004–0,008	0,002–0,007	0,006–0,009

²³⁴U в 15 раз, ²³⁸U в 340, ²²⁶Ra в 20, ²²⁸Ra в 8, ²¹⁰Po в 3, ²²²Rn в 15, ²¹⁰Pb в 6, ²²⁸Th в 60, ²³⁰Th в 20 и ²³²Th в 35 раз. Наиболее высокие уровни содержания в питьевой воде техногенных радионуклидов оказались меньше соответствующих УВ: ³H в 575 раз, ¹⁴C в 32,9 тыс., ⁶⁰Co в 33,3 тыс., ⁹⁰Sr в 190, ¹³⁴Cs в 7,2 тыс., ¹³⁷Cs в 1,7 тыс., ²³⁸Pu в 25 тыс., ^{239,240}Pu в 27,5 тыс. и ²⁴¹Am в 790 раз. Стоит отметить, что по всем трем рассмотренным источникам водоснабжения сумма отношений удельных активностей природных и техногенных радионуклидов к соответствующим уровням вмешательства была ниже 1. Это говорит о радиационной безопас-

ности питьевой воды в районе расположения БАЭС и ИРМ из всех рассмотренных источников водопотребления.

Результаты мониторинга дали возможность оценить СГЭД внутреннего облучения населения, проживающего в регионе БАЭС, от потребления питьевой воды из обследованных водоисточников (табл. 7). Расчеты выполнены в соответствии с МУ 2.6.1.1981-05 и МУ 2.6.1.2713-10 с учетом ошибки измерений и допущением о потреблении жителями только местной питьевой воды. Из данных таблицы 7 видно, что даже в случае гипотетического (маловероятного) сценария потребления населением питьевой

Таблица 7

СГЭД внутреннего облучения населения за счет потребления питьевой воды из различных источников в районе Белоярской АЭС, мЗв/год

[Table 7

Average annual effective dose of internal exposure of the population due to the consumption of drinking water from various sources in the vicinity of the Beloyarsk NPP, mSv/a]

Источник водоснабжения [Source of water supply]	Среднее значение СГЭД [Mean of average annual effective dose of internal exposure]	Диапазон СГЭД [Range of average annual effective dose of internal exposure]
Природные радионуклиды [Natural radionuclides]		
Водопровод [Tap water]	0,047	0,038–0,061
Скважина [Water borehole]	0,052	0,044–0,060
Колодец [Water well]	0,058	0,049–0,067

Источник водоснабжения [Source of water supply]	Среднее значение СГЭД [Mean of average annual effective dose of internal exposure]	Диапазон СГЭД [Range of average annual effective dose of internal exposure]
Техногенные радионуклиды [Technogenic radionuclides]		
Водопровод [Tap water]	0,00057	0,00037–0,00081
Скважина [Water borehole]	0,00040	0,00015–0,00068
Колодец [Water well]	0,00077	0,00064–0,00090

воды с максимальной удельной активностью радионуклидов СГЭД их внутреннего облучения от питьевой воды не превысит рекомендованный ВОЗ референтный дозовый уровень 0,1 мЗв/год. В реальных условиях формируемая дозовая нагрузка от потребления питьевой воды ниже референтного уровня в 1,5–2 раза, при этом максимальные дозы формируются при потреблении воды из колодцев, чуть меньше от воды из скважин и минимальная СГЭД будет при употреблении питьевой воды из водопроводов.

По данным работы [18], СГЭД от потребления питьевой воды населением Северо-Западного региона России (включая 5 субъектов РФ) составляет 0,19 мЗв/год при диапазоне 0,01–3,0 мЗв/год. В работе [9] даны оценки СГЭД населения 9 субъектов РФ, где рассчитана формируемая доза внутреннего облучения населения в диапазоне 0,012–0,1 мЗв/год. СГЭД населения в Челябинской области, наиболее близко расположенной к исследуемому в настоящей работе региону Урала, оценивается на уровне 0,044 мЗв/год при разбросе данных в пределах 0,012–0,086 мЗв/год, что очень близко к полученным нами значениям (0,039–0,068 мЗв/год).

Расчеты показали, что роль природных радионуклидов в формировании СГЭД внутреннего облучения населения при потреблении питьевой воды в регионе Белоярской АЭС является доминирующей – около 99%. Основной вклад в дозу вносит ^{210}Po – 43%, несколько меньший ^{210}Pb – 25% (рис. 4А). На третьем месте в дозоформировании находится ^{234}U – 8%. Роль радионуклидов радия в формировании дозы внутреннего облучения примерно одинакова: от 6% (^{226}Ra) до 7% (^{228}Ra). Тот же вклад в СГЭД вносит и ^{230}Th – 6%. Роль остальных природных радионуклидов в формировании дозы внутреннего облучения от потребления питьевой воды незначительна (не выше 2–3%).

Техногенные радионуклиды, содержащиеся в питьевой воде района размещения Белоярской АЭС, дают пренебрежимо малый вклад в СГЭД внутреннего облучения местного населения – не более 0,9 мкЗв/год, или 1,2%. Среди искусственных радионуклидов максимальный вклад в дозу внутреннего облучения (около 60% от техногенной компоненты) вносит ^{90}Sr (рис. 4Б). На втором месте в формировании дозы внутреннего облучения от техногенных радионуклидов в питьевой воде находится ^3H – 20%, на третьей позиции ^{241}Am – 12% и далее ^{137}Cs – 6%. Роль остальных техногенных радионуклидов (^{14}C , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$) в формировании дозы внутреннего облучения пренебрежимо мала и не превышает в отдельных случаях 5% от всей техногенной компоненты. В других регионах России вклад искусственных радионуклидов в СГЭД также минимален и составляет 0,2–2,2 мкЗв/год [9].

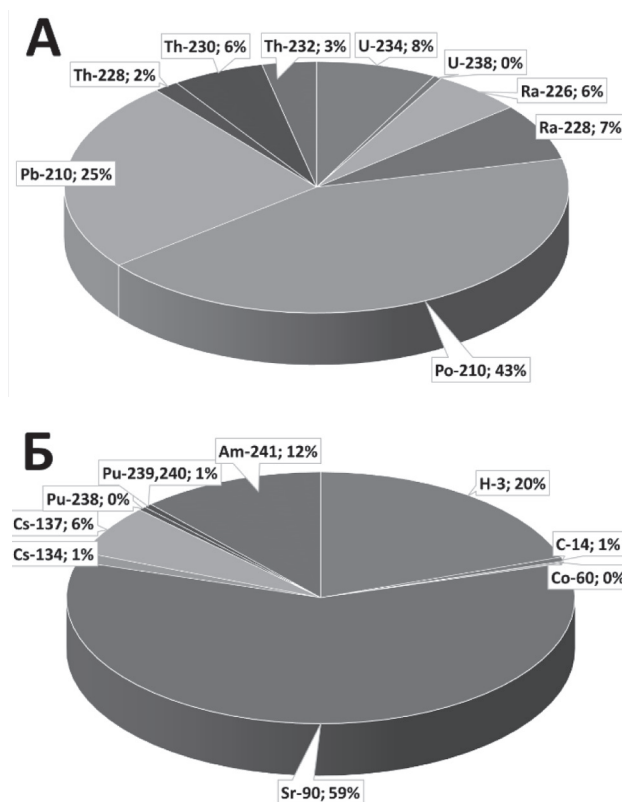


Рис. 4. Вклад природных (А) и техногенных (Б) радионуклидов в формирование СГЭД внутреннего облучения населения района Белоярской АЭС за счет потребления питьевой воды [Fig. 4. Contribution of natural (A) and technogenic (B) radionuclides to the formation of the average annual effective dose of internal exposure of the population in the vicinity of the Beloyarsk NPP due to consumption of drinking water]

В исследовании [20] на примере питьевой водопроводной воды Словении показано, что основным дозообразующим радионуклидом в этом регионе является ^{210}Po (вклад в СГЭД 41%), несколько менее значимы ^{210}Pb и ^{228}Ra (вклад в СГЭД по 23%), на четвертом месте по значимости находится ^{226}Ra (9%). Схожие результаты по оценке вклада природных радионуклидов в СГЭД от потребления питьевой воды были получены в работе [21] для Финляндии, где отмечается, что до 90% СГЭД формируется за счет трех радионуклидов: ^{222}Rn (75%), ^{210}Po (12%) и ^{210}Pb (5%).

В регионах добычи минеральных питьевых вод основной вклад (более 97%) в дозу облучения пациентов

за счет потребления такой лечебной воды вносят 3 природных радионуклида: ^{226}Ra , ^{228}Ra и ^{222}Rn [11, 18]. Также в работе [9] отмечен высокий вклад данных радионуклидов в областях с повышенными уровнями СГЭД: Тверской (до 0,5 мЗв/год) и Курской (до 0,25 мЗв/год). В Республике Хакасия, где наблюдаются повышенные уровни удельной суммарной альфа-активности в питьевой воде (на уровне 0,3–3,5 Бк/кг при максимуме 5,6 Бк/кг), значительная роль в формировании СГЭД обусловлена радионуклидами ^{234}U и ^{238}U [22]. Таким образом, каждая территория характеризуется определенным набором 3–4 специфических природных радионуклидов, определяющих до 80–90% дозы внутреннего облучения при потреблении населением местной питьевой воды.

Результаты настоящего исследования, включающего мониторинг полного спектра контролируемых природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде влияния Белоярской АЭС, могут являться основой для дальнейшей радиационной оценки качества источников питьевого водоснабжения в районе расположения атомной электростанции, анализа изменения радиологических показателей подземных вод по удельной суммарной альфа- и бета-активности с целью оптимизации ресурсов без проведения дорогостоящих радиохимических исследований состава и удельной активности радионуклидов в питьевой воде.

Выводы

1. Скрининговые исследования питьевой воды водопроводов, скважин и колодцев тестовых населенных пунктов в зоне влияния Белоярской АЭС и Института реакторных материалов в 2012–2013 гг. показали, что максимальные значения удельной суммарной альфа-активности радионуклидов ниже контрольного уровня по данному показателю (0,2 Бк/кг) в 3,9 раза, максимальное значение удельной суммарной бета-активности радионуклидов в 5,7 раза ниже контрольного уровня (1 Бк/кг), что говорит о радиационной безопасности источников питьевого водоснабжения обследованной территории.

2. Нив одной из проб питьевых вод региона Белоярской АЭС, отобранных с 2012 по 2019 гг., не превышены как уровни вмешательства по отдельным природным и техногенным радионуклидам, так и значения для условия соответствия воды требованиям радиационной безопасности по сумме отношений удельных активностей к уровням вмешательства (1), что подтверждает радиационную безопасность источников водопотребления.

3. По степени уменьшения удельной активности природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде района размещения Белоярской АЭС источники водопользования можно расположить в ряд: колодцы > скважины > водопроводы.

4. Показано снижение за последние 20 лет содержания трития в питьевой воде региона БАЭС на 20–35% в зависимости от источника водоснабжения. Отмечено, что начало эксплуатации нового реактора БН-800 не привело к увеличению содержания техногенных радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H) в подземных водах.

5. На основе результатов мониторинговых исследований рассчитана СГЭД внутреннего облучения населения от потребления питьевой воды в районе расположения Белоярской АЭС, которая составляет 0,05 мЗв. По

наиболее консервативным оценкам, значение данного показателя составляет 0,07 мЗв/год. Эта доза не превышает порог 0,1 мЗв/год, являющийся приемлемым, согласно российским нормативам (НРБ-99/2009) и рекомендации ВОЗ, что говорит о радиационной безопасности источников водоснабжения в зоне влияния атомной электростанции.

6. Показано, что основную роль в формировании СГЭД внутреннего облучения населения (98,9%) от потребления питьевой воды в районе размещения Белоярской АЭС играют природные радионуклиды. По величине вклада в формируемую дозу внутреннего облучения радионуклиды природного происхождения можно расположить в ряд: $^{210}\text{Po} > ^{210}\text{Pb} > ^{234}\text{U} \geq ^{226}\text{Ra} \geq ^{226}\text{Ra} \geq ^{230}\text{Th} > ^{232}\text{Th} > ^{228}\text{Th} > ^{238}\text{U}$.

7. Вклад техногенных радионуклидов в дозоформирование от потребления питьевой воды в зоне влияния Белоярской АЭС ничтожно мал (около 1%). По степени вклада в СГЭД внутреннего облучения от потребления питьевой воды все техногенные радионуклиды можно расположить в ряд $^{90}\text{Sr} > ^3\text{H} > ^{241}\text{Am} > ^{137}\text{Cs} > ^{134}\text{Cs} > ^{14}\text{C} \geq ^{238}\text{Pu} \geq ^{239,240}\text{Pu} \geq ^{60}\text{Co}$.

8. Результаты многолетних мониторинговых наблюдений свидетельствуют об отсутствии за последние 10 лет значимого влияния сбросов и выбросов Белоярской АЭС и Института реакторных материалов на радиоактивное загрязнение источников питьевого водоснабжения в зоне влияния этих радиационно-опасных объектов.

9. Для уточнения перечня потенциальных путей поступления природных и техногенных радионуклидов в организм местного населения с питьевой водой необходимо провести радиационное обследование родников в районе расположения БАЭС для принятия решения о целесообразности включения данного типа водопользования в сеть мониторинга источников питьевого водоснабжения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №18-19-00016).

Литература

1. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality – 4th ed. ISBN 978 92 4 154815 1. Geneva; 2011. 541 p.
2. Овсянникова Т.М. Радиационный контроль питьевых вод: нормирование и методы определения суммарных активностей (мировой опыт и тенденции) // АНРИ. 2011. №2(65). С. 2-15.
3. Романович И.К., Кадука М.В., Гончарова Ю.Н., и др. К обоснованию числового значения критерия предварительной оценки качества питьевой воды по удельной суммарной альфа-активности // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 3. С. 11-14.
4. Статат И.П., Романович И.К., Горский Г.А. Обоснование к введению нормирования содержания радионуклидов в питьевой воде по взрослому населению // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 3. С. 20-25.
5. Вредные химические вещества: справочник / под ред. В.А. Филова. СПб: Химия, 1994. 686 с.
6. Статат И.П., Ступина В.В. О нормировании показателей радиационной безопасности минеральных природных вод // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 2. С. 30-36.
7. Салдан И.П., Баландович Б.А., Поцелуев Н.Ю. Гигиеническая оценка удельной активности природных радионуклидов в воде источников питьевого водоснабжения // Здоровье населения и среда обитания. 2015. №10 (271). С. 29-34.

8. United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York, 2000. P. 84-156.
9. Гончарова Ю.Н., Басалаева Л.Н., Кадука М.В., и др. Оценка доз внутреннего облучения населения различных регионов Российской Федерации природными и техногенными радионуклидами за счет потребления питьевой воды // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 2. С. 39-44.
10. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 286 с.
11. Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А., и др. Содержание изотопов урана в подземных источниках водоснабжения населения Ленинградской области и Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 74-82. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-74-82
12. Чеботина М.Я., Николин О.А., Бондарева Л.Г., Ракитский В.Н. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87-92. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92>
13. Семенищев В.С., Воронина А.В., Никифоров А.Ф. Определение Радона-222 в природных источниках питьевой воды в окрестностях города Екатеринбурга // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. №4. С. 95-101.
14. Чеботина М.Я., Николин О.А. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 91 с.
15. Чеботина М.Я. Поступление трития из водоема-охладителя в источники питьевого водоснабжения путем фильтрации через глубинные слои подстилающих пород // Доклады академии наук. 2011. Т. 438, №5. С. 675-677.
16. Панов А.В., Трапезников А.В., Исамов Н.Н., и др. Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания района Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 38-50. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50
17. Гончарова Ю.Н., Швыдко Н.С., Кадука А.Н. Исследование сезонной и долгосрочной вариабельности удельной активности природных радионуклидов подземных вод // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 1. С. 17-23.
18. Кадука М.В., Швыдко Н.С., Шутов В.Н., и др. Оценка доз облучения населения северо-западного региона России за счет потребления питьевой воды // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 23-27.
19. Момот О.А., Силян И.И., Сынзыныс Б.И., Козьмин Г.В. Оценка радиационного риска для здоровья населения при наличии трития в питьевой воде. Идентификация опасности // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2007. № 2. С. 84-91.
20. Benedik L., Jeran Z. Radiological of natural and mineral drinking waters in Slovenia // Radiation Protection Dosimetry. 2012. Vol. 151, No 2. P. 306-313.
21. Vesterbacka P. ²³⁸U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses. Academic Dissertation. Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK. University of Helsinki, Faculty of Science. Department of Chemistry, Laboratory of Radiochemistry, 2005. 94 p.
22. Пивоварова Е.А., Пивоваров А.А. Радиационно-гигиеническая оценка источников хозяйственно-питьевого водоснабжения населения на территории Республики Хакасия // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 61-68. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-3-61-68>

Поступила: 05.10.2020 г.

Панов Алексей Валерьевич – доктор биологических наук, профессор Российской академии наук, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии. **Адрес для переписки:** 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: riar@mail.ru

Трапезников Александр Викторович – доктор биологических наук, заведующий отделом континентальной радиологии Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, Россия

Коржавин Александр Васильевич – кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Гешель Ирина Викторовна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Коровин Сергей Владимирович – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Эдомская Мария Александровна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Для цитирования: Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., Гешель И.В., Коровин С.В., Эдомская М.А. Радиационный мониторинг питьевой воды в районе Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 86-101. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101

Radiation monitoring of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP

Alexey V. Panov ¹, Aleksandr V. Trapeznikov ², Aleksandr V. Korzhavin ², Irina V. Geshel ¹, Sergey V. Korovin ¹, Maria A. Edomskaia ¹¹Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia²Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

The article provides a radiation-hygienic assessment of the current state of drinking water supply sources for the population in the observation area of the Beloyarsk NPP and the Institute of Nuclear Materials. We determined the content of natural (²³⁴U, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²¹⁰Po, ²²²Rn, ²¹⁰Pb, ²²⁸Th, ²³⁰Th, ²³²Th) and technogenic (³H, ¹⁴C, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ^{239,240}Pu, ²⁴¹Am) radionuclides in drinking water of tap water, water boreholes and water wells in test settlements located at different distances and directions from radiation hazardous facilities. Results of monitoring of water sources in 2012–2013 and 2019 showed the radiation safety of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP according to several criteria. Thus, the maximum levels of the gross specific alpha-activity of radionuclides in water samples were 3.9 times lower than the control level (0.2 Bq/kg), the gross specific beta-activity was 5.7 times lower than the control level (1 Bq/kg). Over the entire observation period, none of the drinking water samples exceeded the control levels both for individual radionuclides and for the sum of the ratios of specific activities to control levels. The content of natural and artificial radionuclides in drinking water near the Beloyarsk NPP decreases in the following order: water wells > water boreholes > tap water. For the past 20 years, there was a decrease in tritium specific activity in drinking water of the Beloyarsk NPP region by 20–35%, depending on the source of water supply. It was noted that the launch of the BN-800 reactor also did not lead to an increase in the content of other artificial radionuclides (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs) in groundwater. The average annual effective dose of internal exposure of the population due to drinking water consumption in the vicinity of the Beloyarsk NPP is 0.05 mSv, according to conservative estimates – 0.07 mSv, which is below the radiation safety threshold (0.1 mSv/a) recommended by the WHO. Natural radionuclides play the primary role in the formation of the annual average effective dose for internal irradiation (98.9%) due to drinking water consumption on the considered territories. ²¹⁰Po makes the largest contribution to the dose from natural radioisotopes – 43%, somewhat less is made by ²¹⁰Pb – 25%. The third place in the dose formation from natural radionuclides belongs to ²³⁴U (8%), ²²⁸Ra (7%), ²²⁶Ra (6%) and ²³⁰Th (6%). The contribution of other natural radioisotopes in the formation of the internal radiation dose from drinking water consumption does not exceed 2–3%. The contribution of technogenic radionuclides to the annual average effective dose from the consumption of drinking water is negligible (about 1%). Of the technogenic components, ⁹⁰Sr (60%), ³H (20%), and ²⁴¹Am (12%) play the most significant role in the formation of the internal exposure dose.

Key words: radiation control, underground water, tap water, water well, water hole, natural and technogenic radionuclides, specific activity, radiation-hygienic assessment, intervention level, exposure doses from drinking water consumption.

References

- World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality – 4th ed. ISBN 978 92 4 154815 1. Geneva; 2011. 541 p.
- Ovsyannikova TM. The radioactive monitoring of drinking water: guidelines and methods of measuring of gross alpha and beta activities (worldwide practice and trends). *ANRI = ANRI*. 2011;2(65): 2-15 (In Russian)
- Romanovich IK, Kaduka MV, Goncharova YuN, Shvydko NS, Shutov VN. On the substantiation of initial screening gross alpha activity concentration level for drinking water safety assessment establishment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 11-14 (In Russian)
- Stamat IP, Romanovich IK, Gorsky GA. Justification to the introduction of regulation for radionuclide content in the drinking water according to adult population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 20-25 (In Russian)
- Harmful chemicals: a handbook. Ed. by Filov VA. Saint-Petersburg: Chemistry; 1994. 686 p. (In Russian)
- Stamat IP, Stupina VV. On standardization of radiation protection indexes of natural mineral waters. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(2): 30-36 (In Russian)
- Saldan IP, Balandovich BA, Potseluev NYu. Hygienic evaluation of the specific activity of natural radionuclides in water of potable water supply. *Zdorovye naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment*. 2015;10(271): 29-34 (In Russian)
- United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York; 2000. P. 84-156.

Alexey V. Panov

All Russian Institute of Radiology and Agroecology

Address for correspondence: Kiev highway, 109 km, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia; E-mail: riar@mail.ru

9. Goncharova YuN, Basalaeva LN, Kaduka MV, Shvydko NS, Kaduka AN. Estimation of the population exposure doses from natural and artificial radionuclides due to drinking-water consumption for the inhabitants of different areas of Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(2): 39-44 (In Russian)
10. Sapozhnikov YuA, Aliev RA, Kalmykov SN. Environmental radioactivity. Moscow, BINOM. Laboratory of knowledge; 2006. 286 p. (In Russian)
11. Kaduka MV, Basalaeva LN, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV, et al. Content of uranium isotopes in the groundwater supplies used for population of Leningrad region and St-Petersburg. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 74-82. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-74-82.
12. Chebotina MY, Nikolin OA, Bondareva LG, Rakitsky VN. Tritium in urine of people living in the area of influence of the Beloyarskaya NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 87-92. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92>.
13. Semenischev VS, Voronina AV, Nikiforov AF. Determination of Radon-222 in natural drinking water sources in outskirts of Ekaterinburg. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2014;4: 95-101 (In Russian)
14. Chebotina MY, Nikolin OA. Radioecological studies of tritium in the Ural region. Ekaterinburg: UB RAS; 2005. 91 p.
15. Chebotina MYa. Tritium inflow from the cooling pond to the sources of drinking water supply by filtration through the deep layers of the underlying rocks. *Doklady akademii nauk = Academy of Sciences Reports*. 2011;438(5): 675-677 (In Russian)
16. Panov AV, Trapeznikov AV, Isamov NN, Korzhavin AV, Kuznetsov VK, Geshel IV. Assessment of the impact of the BN-800 reactor operation on the radionuclides content in local foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 38-50. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50.
17. Goncharova YuN, Shvydko NS, Kaduka AN. Investigation of season and long-term variations of natural radionuclides specific activity in underground water. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(1): 17-23. (In Russian)
18. Kaduka MV, Shvydko NS, Shutov VN, Basalaeva LN, Goncharova YuN, Salazkina NV, et al. Estimation of the population exposure doses from drinking-water consumption for the inhabitants of north-eastern area of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 23-27 (In Russian)
19. Momot OA, Silin II, Synzynys BI, Kozmin GV. Assessment of radiation risk for public health in the presence of tritium in drinking water. Hazard identification. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika = Nuclear Energy and Technology*. 2007;2: 84-91 (In Russian)
20. Benedik L, Jeran Z. Radiological of natural and mineral drinking waters in Slovenia. *Radiation Protection Dosimetry*. 2012;151(2): 306-313.
21. Vesterbacka P. ²³⁸U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses. Academic Dissertation. Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK. University of Helsinki, Faculty of Science. Department of Chemistry, Laboratory of Radiochemistry; 2005. 94 p.
22. Pivovarova EA, Pivovarov AA. The Radiological Hygienic Assessment of the Sources of Utility and Drinking Water Supply for the Population of Khakasia Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(3): 61-68. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-3-61-68>.

Received: October 05, 2020

For correspondence: Alexey V. Panov – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director, All Russian Institute of Radiology and Agroecology (Kiev highway, 109 km, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia; E-mail: riar@mail.ru)

Aleksandr V. Trapeznikov – Doctor of Biological Sciences, Head of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

Aleksandr V. Korzhavin – PhD. Veterinary Sciences, Chief Science Officer of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

Irina V. Geshel – Researcher of All Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Sergey V. Korovin – Researcher of All Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Maria A. Edomskaya – Researcher of All Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Geshel I.V., Korovin S.V., Edomskaya M.A. Radiation monitoring of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 86-101. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101