

## Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания района Белоярской АЭС

А.В. Панов<sup>1</sup>, А.В. Трапезников<sup>2</sup>, Н.Н. Исамов<sup>1</sup>, А.В. Коржавин<sup>2</sup>, В.К. Кузнецов<sup>1</sup>, И.В. Гешель<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

*В работе представлен анализ многолетних данных по влиянию газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов Белоярской АЭС и Института реакторных материалов на содержание техногенных радионуклидов в местных пищевых продуктах. Отмечено, что расстояние и направления от радиационно опасных объектов значимо не влияют на накопление <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в картофеле и молоке. На примере широкого ряда продуктов питания из частного сектора 23 населенных пунктов, лесов, рек и водохранилища 30-километровой зоны влияния Белоярской АЭС показано, что эксплуатация с 2016 г. реактора БН-800 не привела к регистрируемому увеличению содержания техногенных радионуклидов в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции. Максимальные удельные активности <sup>90</sup>Sr (0,84 Бк/кг) и <sup>137</sup>Cs (0,26 Бк/кг) в корнеплодах, картофеле, бахчевых и овощах отмечались до начала эксплуатации нового энергоблока и были в 45 и 300 раз соответственно ниже действующих нормативов СанПиН. Наиболее высокое содержание в молоке <sup>90</sup>Sr (0,41 Бк/л) было в 60 раз ниже требований СанПиН, <sup>137</sup>Cs (0,11 Бк/л) в 900 раз меньше нормативов. В мясе домашней птицы удельная активность <sup>90</sup>Sr (0,2–0,3 Бк/кг) и <sup>137</sup>Cs (0,13–0,16 Бк/кг) в последние годы остается стабильно низкой, а нормируемое содержание <sup>137</sup>Cs в говядине (максимально – 0,12 Бк/кг) более чем в 1,5 тыс. раз ниже требований СанПиН. Наиболее высокая концентрация <sup>137</sup>Cs в лесных ягодах, обнаруженная в землянике (1,27 Бк/кг), меньше нормативов СанПиН в 125 раз. Содержание <sup>90</sup>Sr в грибах находится на уровне 0,1–2,5 Бк/кг, <sup>137</sup>Cs несколько выше – 0,6–5,8 Бк/кг. Максимально зафиксированная удельная активность <sup>137</sup>Cs в грибах ниже требований СанПиН более чем в 80 раз. Отмечено уменьшение за период наблюдений до 20% и более содержания техногенных радионуклидов в пробах 5 видов рыб; максимальные уровни <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в ней были ниже наиболее жестких нормативов СанПиН (использование рыбы для детского питания) в 14 раз. Выборочный радиационный контроль пищевых продуктов района Белоярской АЭС на <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C показал, что содержание этих радионуклидов в продуктах питания находится на низком, близком к фоновому уровню. В сельскохозяйственной продукции <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C в большей степени накапливаются в картофеле и молоке, из природных продуктов в подберезовике и леще. Отмечена необходимость продолжения исследований по изучению накопления <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C в продуктах питания района Белоярской АЭС.*

**Ключевые слова:** радиационная безопасность, радиационный мониторинг, <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, сельскохозяйственная пищевая продукция, природная пищевая продукция, радиационно-гигиеническая оценка, многолетняя динамика.

### Введение

В районах размещения атомных электростанций оценка и прогноз дозовых нагрузок на население являются неотъемлемой частью комплекса мер по обеспече-

нию радиационной безопасности<sup>1</sup>. При штатном режиме работы радиационное воздействие АЭС на человека определяется газоаэрозольными выбросами и жидкими сбросами, содержащими радиоактивные вещества в раз-

<sup>1</sup> МР 2.6.1.0063-12 Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 55 с. [Methodical recommendations 2.6.1.0063-12 Monitoring of radiation doses of the population living in the observation zone of a radiation facility, in the conditions of its normal operation and radiation accident. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор. 2013:55. (In Russ.)]

**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

решенных количествах. Выбрасываемый из вентиляционной трубы атомной станции воздух с радиоактивными газами и аэрозолями образует факел, который распространяется над земной поверхностью, увеличиваясь в размерах и рассеиваясь. При этом радионуклиды, находящиеся в факеле, оседают на территории вокруг АЭС, поглощаются почвами и водой, накапливаются в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции, тем самым воздействуя на человека. Жидкие сбросы атомной станции влияют на загрязнение радионуклидами рыбы, являющейся частью рациона питания населения [1–2]. Проблема радиационного контроля местных продуктов питания в районе АЭС становится особенно актуальной при увеличении мощности атомной станции, строительстве и вводе в эксплуатацию новых энергоблоков.

В настоящее время на российских АЭС используются несколько типов реакторов (РБМК, ВВЭР, БН, ЭГП) разной мощности. В выполненных ранее исследованиях на примере Ростовской АЭС (реакторы ВВЭР) и Курской АЭС (реакторы РБМК) дана комплексная радиоэкологическая оценка влияния многолетних нормализованных выбросов атомных электростанций на агроэкосистемы и накопление радионуклидов в местных пищевых продуктах [3, 4]. Настоящая работа посвящена анализу влияния работы Белоярской АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (БН) на загрязнение сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов техногенными радионуклидами.

Как и любая атомная станция, Белоярская АЭС (БАЭС) является потенциальным источником загрязнения окружающей среды и облучения населения. Поступление радиоактивных веществ от БАЭС во внешнюю среду происходит воздушным (через вентиляционные трубы, в виде принудительного выхлопа пара из барбатов) и водным (за счет сбросов технологических вод в Белоярское водохранилище и Ольховское болото) путями. Радиоэкологические исследования в районе БАЭС проводятся много лет, и в большей степени они посвящены изучению влияния работы атомной станции на наземные и водные экосистемы [5–7]. Результаты этих исследований показывают, что радиоэкологическая обстановка в районе БАЭС определяется в настоящее время комплексом факторов, включая: выбросы и сбросы эксплуатирующихся реакторов БН-600 и БН-800 атомной станции, а также расположенного рядом с АЭС Института реакторных материалов (ИРМ) с действующим реактором ИВВ-2М; глобальный радиационный фон; выбросы предприятий ФГУП «ПО «Маяк»; радиоактивное загрязнение ВУРСа; чернобыльские выпадения; локальные загрязнения радионуклидами в санитарно-защитной зоне (Ольховская болотно-речная система) и зоне наблюдения БАЭС, образовавшиеся на ранних этапах работы атомной станции во время эксплуатации реакторов АМБ-100 и АМБ-200. Поскольку радионуклидный состав выбросов ИРМ схож с таковыми БАЭС, при оценке воздействия на окружающую среду и человека, обусловленного радиоактивными выпадениями, данные радиационно-опасные объекты рассматриваются вместе.

Все выделенные источники радиоактивного загрязнения в той или иной мере влияют на накопление радионуклидов в местных пищевых продуктах, потребляемых населением в регионе БАЭС. Необходимо отметить, что радиационный контроль в районе размещения атомной

станции обычно проводится для основного набора местных продуктов питания (пшеница, овощи, корнеплоды, молоко, ягоды, грибы, рыба) по суммарной бета-активности и содержанию в них  $^{137}\text{Cs}$  [8–10]. При этом в пищевых продуктах не оцениваются такие радиологически значимые радионуклиды, как  $^{90}\text{Sr}$ , а также органически связанные  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$ , присутствующие в выбросах и сбросах БАЭС и ИРМ [11–13]. Для природных продуктов питания (грибы, ягоды, рыба) не анализируются их видовые особенности, в определенной степени влияющие на накопление радионуклидов, места их произрастания (обитания) [14–15]. Это может в итоге привести к недооценке доз внутреннего облучения населения, проживающего в районе БАЭС. Особенно важно провести анализ динамики содержания техногенных радионуклидов для более широкого набора продуктов питания после начала промышленной эксплуатации в 2016 г. на БАЭС нового реактора БН-800.

**Цель исследования** – оценка влияния работы реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания населения в районе размещения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов.

### Задачи исследования

1. Оценка вклада газоаэрозольных выбросов БАЭС и ИРМ в накопление техногенных радионуклидов в картофеле и молоке местного производства на различном расстоянии от радиационно-опасных объектов.
2. Анализ динамики содержания радионуклидов в сельскохозяйственных и природных продуктах питания населения в зоне влияния Белоярской АЭС до и после начала эксплуатации реактора БН-800.
3. Сравнительная оценка удельной активности техногенных радионуклидов в сельскохозяйственных и природных пищевых продуктах района размещения Белоярской АЭС на соответствие радиологическим требованиям СанПиН.
4. Обобщение результатов многолетних наблюдений (2002–2019 гг.) за содержанием радионуклидов в местных продуктах питания района БАЭС.

### Материалы и методы

Мониторинг содержания радионуклидов в пищевых продуктах для обеспечения эффективного контроля за радиационной обстановкой должен быть оптимизирован до минимального объема, обеспечивающего достоверной и объективной информацией о территории с учетом особенностей региона исследования, например, наличия радиационно-опасных объектов I категории, локальных радиоактивных загрязнений, прошлых аварий и т.д. [16]. В рамках радиоэкологических исследований такой мониторинг может быть расширен как территориально, так и по набору продуктов питания, а также радионуклидному составу с целью установления наиболее «критичных» источников и значимых путей поступления радионуклидов в организм человека, определения основных дозообразующих радиоизотопов.

Площадка БАЭС расположена в 42 км от г. Екатеринбург и в 3,5 км от г. Заречный на берегу водоема-охладителя – Белоярского водохранилища, образованного на реке Пышма. Радиус санитарно-защитной зоны (СЗЗ) атомной станции составляет 3–5 км в границах промпло-

щадки АЭС, включая территорию Ольховского болота (5 км от станции) и трубопровод хозфекального коллектора. Зона наблюдения (ЗН) АЭС ограничена радиусом 13 км от реактора БН-600 [8–10]. Наиболее крупными населенными пунктами, входящими в 30-километровую зону влияния атомной станции, являются г. Заречный (население 30 тыс. чел.) и г. Асбест (население 63 тыс. чел.). С меньшим числом жителей (5–10 тыс. чел.) можно выделить три поселка городского типа: Малышева, Белоярский и Верхнее Дуброво. Остальные населенные пункты являются сельскими с населением менее 5 тыс. человек.

Для оценки степени воздействия выбросов БАЭС и ИРМ на загрязнение радионуклидами местных пищевых продуктов и влияния на этот процесс эксплуатации

нового реактора БН-800 населенные пункты, входящие в 30-километровую зону вокруг атомной станции, и те, где ведется сельское хозяйство в частном секторе, были условно разделены на три зоны: ближняя (радиус не более 5 км от БАЭС), зона наблюдения (5–15 км от станции) и зона влияния (15–30 км от БАЭС). В ближнюю зону вошли 2 населенных пункта, в зону наблюдения – 9 и в зону влияния – 12 поселений (табл. 1). Населенные пункты, включенные в сеть мониторинга, выбирались с учетом розы ветров в регионе исследования, на разном расстоянии и направлениях от энергоблока БН-800.

Мониторинговые исследования проведены в одно время (август) в 2013 г. до физического пуска энергоблока БН-800 и в 2019 г., через три года после начала

Населенные пункты сети радиационного мониторинга продуктов питания в районе Белоярской АЭС

Таблица 1

Settlements of the foodstuff radiation monitoring network in the vicinity of Beloyarsk NPP

[Table 1

| Ближняя зона АЭС<br>[Nearest zone of NPP] |  | Зона наблюдения АЭС<br>[Observation zone of NPP] |  | Зона влияния АЭС<br>[Influence zone of NPP] |  |
|---|--|--|--|---|--|
| Населенный пункт<br>[Settlement]          | Направление и расстояние от АЭС, км<br>[Direction and distance from NPP, km] | Населенный пункт<br>[Settlement]                 | Направление и расстояние от АЭС, км<br>[Direction and distance from NPP, km] | Населенный пункт<br>[Settlement]            | Направление и расстояние от АЭС, км<br>[Direction and distance from NPP, km] |
| Заречный [Zarechny]                       | Ю, 3,5 [S, 3,5]  | Шеелит [Sheelite]                                | Ю, 8 [S, 8]  | Малобрусаянское [Malobrusyanskoe]           | Ю-З, 17 [S-W, 17]  |
| Режик [Rezhik]                            | В, 4,5 [E, 4,5]  | Муранитный [Muranitny]                           | Ю-В, 8,5 [S-E, 8,5]  | Асбест [Asbest]                             | С-В, 19 [N-E, 19]  |
| –   | –  | Ялунина [Yalunina]                               | Ю-В, 9,5 [S-E, 9,5]  | Становая [Stanovaya]                        | С-З, 20 [N-W, 20]  |
| –   | –  | Гагарка [Gagarka]                                | Ю-З, 10 [S-W, 10]  | Верхнее Дуброво [Verhnee Dubrovo]           | Ю-З, 20 [S-W, 20]  |
| –   | –  | Малиновка [Malinovka]                            | В, 11,5 [E, 11,5]  | Рассоха [Rassoha]                           | Ю-З, 23 [S-W, 23]  |
| –   | –  | Мезенское [Mezenskoe]                            | Ю, 12 [S, 12]  | Бобровка [Bobrovka]                         | Ю-З, 24 [S-W, 24]  |
| –   | –  | Белоярский [Beloyarsky]                          | Ю-В, 12,5 [S-E, 12,5]  | Измоденова [Izmodenova]                     | Ю-В, 24 [S-E, 24]  |
| –   | –  | Баженово [Bazhenovo]                             | Ю, 14,5 [S, 14,5]  | Изумруд [Izumrud]                           | С-В, 24 [N-E, 24]  |
| –   | –  | Сарапулка [Sarapulka]                            | З, 15 [W, 15]  | Большебрусаянское [Bolshebrusyanskoe]       | Ю-З, 24,5 [S-W, 24,5]  |
| –   | –  | –  | –  | Косулино [Kosulino]                         | Ю-З, 25 [S-W, 25]  |
| –   | –  | –  | –  | Грязновское [Gryaznovskoye]                 | Ю-В, 25,5 [S-E, 25,5]  |
| –   | –  | –  | –  | Кочнево [Kochnevo]                          | Ю-В, 27 [S-E, 27]  |
| –   | –  | –  | –  | Исток [Istok]                               | Ю-З, 27,5 [S-W, 27,5]  |
| –   | –  | –  | –  | Орлова [Orlova]                             | Ю-В, 27,8 [S-E, 27,8]  |
| –   | –  | –  | –  | Малышева [Malysheva]                        | С-В, 28 [N-E, 28]  |
| –   | –  | –  | –  | Бараба [Baraba]                             | Ю-В, 29,5 [S-E, 29,5]  |

его промышленной эксплуатации. Это дало возможность оценить влияние работы нового реактора на динамику содержания радионуклидов в местных продуктах питания района БАЭС. На частных подворьях, рынках и в садовых участках населенных пунктов сети мониторинга отбирались пробы сельскохозяйственных продуктов питания местного производства (табл. 2).

В 2013 г. отобрано 40 проб бахчевых, овощей и корнеплодов, в 2019 г. – 21 проба продукции растениеводства. Фруктов и садовых ягод в 2013 г. отобрано 6 проб, в 2019 г. – 2 пробы. Продукция животноводства и птицеводства в ближней зоне БАЭС не производится, поэтому пробы данного вида отбирались в населенных пунктах зон наблюдения и влияния БАЭС в радиусе 5–30 км от станции. В 2013 г. отобрано 12 проб, в 2019 г. – 9 проб молока, мяса и домашней птицы.

Пробы природной продукции наземных экосистем (грибы, лесные ягоды) отбирались в лесах, занимающих 85% территории вокруг БАЭС, в окрестностях населенных пунктов сети мониторинга (табл. 3). Грибов разных видов отобрано в 2013 г. – 4 пробы, в 2019 г. – 3 пробы, лесных ягод в 2013 г. и 2019 г. – по 4 пробы. Рыбу вылавливали из Белоярского водохранилища, а также 6 рек, входящих в 30-километровую зону влияния БАЭС. В 2013 г. отобрано 38 проб рыбы, в 2019 г. – 19 проб разных видов. Из-за большой протяженности Белоярского водохранилища (длина около 20 км, ширина рядом с БАЭС – 3 км) участки водоема, где проводился отлов рыбы, расположены на разном расстоянии от атомной станции. Поэтому, с учетом миграции рыбы, идентифицировать степень влияния БАЭС и ИРМ на содержание в ней радионуклидов можно с достаточной степенью приближения.

Таблица 2

**Объем мониторинговых исследований сельскохозяйственных продуктов питания местного производства в районе размещения Белоярской АЭС, число проб**

[Table 2

**The scope of monitoring investigations of locally produced agricultural foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP, number of samples]**

| Продукт питания<br>[Foodstuff]                                       | Ближняя зона АЭС<br>[Nearest zone of NPP] |                      | Зона наблюдения АЭС<br>[Observation zone of NPP] |                      | Зона влияния АЭС<br>[Influence zone of NPP] |                      |
|--|---|----------------------|--|----------------------|---|----------------------|
|  | 2013 г.<br>[2013 y.]                      | 2019 г.<br>[2019 y.] | 2013 г.<br>[2013 y.]                             | 2019 г.<br>[2019 y.] | 2013 г.<br>[2013 y.]                        | 2019 г.<br>[2019 y.] |
| Овощи [Vegetable]  |   |                      |  |                      |   |                      |
| Кабачки [Zucchini]   | –   | –                    | 3  | –                    | 4   | 5                    |
| Капуста [Cabbage]  | 3   | 1                    | 1  | –                    | –   | –                    |
| Картофель [Potato]   | 2   | 1                    | 7  | 3                    | 1   | 2                    |
| Лук [Onion]  | –   | –                    | 1  | –                    | –   | –                    |
| Морковь [Carrot]   | 1   | 1                    | 1  | –                    | 4   | 2                    |
| Огурцы [Cucumber]  | 1   | 1                    | –  | –                    | 4   | 1                    |
| Свекла [Beetroot]  | 1   | 1                    | 2  | –                    | –   | –                    |
| Томаты [Tomato]  | 1   | 1                    | 1  | –                    | –   | 1                    |
| Тыква [Pumpkin]  | –   | –                    | 1  | 1                    | 1   | –                    |
| Фрукты и ягоды [Fruit and berry]                                     |   |                      |  |                      |   |                      |
| Вишня [Cherry]   | –   | –                    | 1  | –                    | –   | –                    |
| Крыжовник<br>[Gooseberry]  | –   | –                    | –  | –                    | –   | 1                    |
| Смородина [Currant]  | –   | –                    | 1  | –                    | 2   | 1                    |
| Яблоки [Apple]   | 1   | –                    | 1  | –                    | –   | –                    |
| Продукция животноводства и птицеводства [Animal product and poultry] |   |                      |  |                      |   |                      |
| Молоко [Milk]  | –   | –                    | 6  | 4                    | 4   | 3                    |
| Говядина [Beef]  | –   | –                    | –  | –                    | –   | 1                    |
| Свинина [Pork]   | –   | –                    | –  | –                    | 1   | –                    |
| Мясо кур<br>[Chicken meat]   | –   | –                    | 1  | 1                    | –   | –                    |
| МАЭД, мкЗв/ч<br>[Ambient dose equivalent rate, $\mu\text{Sv/h}$ ]    | 0,11±0,01                                 | 0,09±0,03            | 0,10±0,02  | 0,08±0,02            | 0,10±0,02                                   | 0,11±0,01            |

Таблица 3  
**Объем мониторинговых исследований природных продуктов питания в районе размещения Белоярской АЭС**  
 [Table 3  
**The scope of monitoring investigations of natural foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP, number of samples]**

| Продукт питания<br>[Foodstuff]      | Год отбора проб<br>[Sampling year] | Число проб<br>[Number of samples] | Место отбора проб<br>[Sampling location]   |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Грибы [Mushroom]                    |                                    |                                   |  |
| Маслята [Yellow boletus]            | 2013                               | 1                                 | Лес рядом с Верхнее Дуброво<br>[Forest near Verhnee Dubrovo]   |
| Подосиновик<br>[Orange-cap boletus] | 2013                               | 1                                 | Лес рядом с Муранитный [Forest near Muranitny]   |
| Подберезовик<br>[Rough boletus]     | 2013                               | 1                                 | Ольховское болото [Olkhov swamp]   |
| Белый [Сер]                         | 2013                               | 1                                 | Лес рядом с Измоденова [Forest near Izmodenova]  |
| Маслята<br>[Yellow boletus]         | 2019                               | 3                                 | Леса рядом с Заречный, Верхнее Дуброво, Орлово<br>[Forests near Zarechny, Verhnee Dubrovo, Orlovo]   |
| Ягоды [Berry]                       |                                    |                                   |  |
| Малина<br>[Raspberry]               | 2013                               | 2                                 | Леса рядом с Малобрусянское, Измоденова<br>[Forests near Malobrusyanskoe, Izmodenova]  |
| Черника<br>[Blueberry]              | 2013                               | 1                                 | Лес рядом с Баженово [Bazhenovo]   |
| Земляника<br>[Strawberry]           | 2013                               | 1                                 | Лес рядом с Измоденова [Forest near Izmodenova]  |
| Черника<br>[Blueberry]              | 2019                               | 3                                 | Леса рядом с Режик, Ялунина, Косулино [Forests<br>near Rezhik, Yalunina, Kosulino]   |
| Малина [Raspberry]                  | 2019                               | 1                                 | Лес рядом с Заречный [Forest near Zarechny]  |
| Рыба [Fish]                         |                                    |                                   |  |
| Карп [Carp]                         | 2013                               | 2                                 |  |
| Плотва [Roach]                      | 2013                               | 17                                |  |
| Судак [Pikeperch]                   | 2013                               | 1                                 |  |
| Лещ [Bream]                         | 2013                               | 4                                 |  |
| Окунь [Perch]                       | 2013                               | 8                                 |  |
| Щука [Pike]                         | 2013                               | 6                                 | Белоярское водохранилище, реки: Режик,<br>Ольховка, Каменка, Мезенка, Камышенка, Гагарка<br>[Beloyarsk reservoir, rivers: Regik, Olkhovka, Kamenka,<br>Mezenka, Kamyshenka, Gagarka] |
| Плотва [Roach]                      | 2019                               | 6                                 |  |
| Судак [Pikeperch]                   | 2019                               | 1                                 |  |
| Лещ [Bream]                         | 2019                               | 4                                 |  |
| Окунь [Perch]                       | 2019                               | 6                                 |  |
| Щука [Pike]                         | 2019                               | 2                                 |  |

Пробоподготовку и измерения проб пищевой продукции проводили в лаборатории радиационного контроля ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.21AД81). Для анализа содержания радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) в продуктах питания 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).  $^{90}\text{Sr}$  из проб выделяли радиохимическим способом. Альфа- и бета-активность препаратов измеряли на жидкосцинтилляционном спектрометре TRI-CARB 4810 TR («Perkin Elmer», США), жид-

косцинтилляционном спектрометрическом комплексе СКС-07П-Б11 («Green Star», Россия) и альфа-бета-радиометре с кремниевым детектором УМФ-2000 (НПП «Доза», Россия). Относительная погрешность измерений активности радионуклидов составляла 6–30% в зависимости от используемого прибора и метода измерения. Оценка содержания в некоторых пробах сельскохозяйственной и природной пищевой продукции  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$  проведена в сотрудничестве со специалистами АО «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина» Госкорпорации «Росатом».

### Результаты и обсуждение

При отборе проб пищевых продуктов в населенных пунктах измеряли мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД). Отмечено, что как до пуска энергоблока БН-

800, так и после начала его промышленной эксплуатации МАЭД в населенных пунктах 30-километровой зоны влияния БАЭС и ИРМ оставалась на уровне фоновых значений и варьировала в пределах 0,09–0,11 мкЗв/ч (см. табл. 2).

На первом этапе анализа результатов исследования оценены степень влияния БАЭС и ИРМ по отношению от этих радиационно-опасных объектов на загрязнение радиологически значимыми  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  основных сельскохозяйственных продуктов питания, используемых для оценки доз внутреннего облучения населения: картофеля (рис. 1) и молока (рис. 2).

Видно, что по мере удаления от БАЭС и ИРМ удельная активность техногенных радионуклидов в картофеле не только не снижается, но даже несколько возрастает, что говорит об отсутствии значимого влияния газоаэрозольных выбросов радиационно-опасных объектов на загрязнение продукции растениеводства. Такая закономерность прослеживается как до, так и после начала эксплуатации реактора БН-800 на БАЭС. Стоит отметить,

что вариации содержания в картофеле радионуклидов на разном расстоянии от БАЭС и ИРМ незначительны и составляют 0,5–0,8% от норматива СанПиН 2.3.2.2650-10<sup>2</sup> по  $^{90}\text{Sr}$  и 0,05–0,1% по  $^{137}\text{Cs}$ .

В молоке при удалении от БАЭС и ИРМ содержание техногенных радионуклидов несколько снижается. До пуска БН-800 это было более выражено для  $^{137}\text{Cs}$ , а после начала эксплуатации нового реактора – для  $^{90}\text{Sr}$ . Однако эти изменения оказались минимальны. Уровни концентрации радионуклидов в молоке двух рассматриваемых зон варьировали в пределах 0,7–2% от допустимого уровня СанПиН 2.3.2.1078-01<sup>3</sup> по  $^{90}\text{Sr}$  и 0,03–0,2% по  $^{137}\text{Cs}$ . Поскольку диапазон данных активности радионуклидов в продуктах питания по выделенным зонам укладывался в ошибку измерений и значимо между собой не отличался, при дальнейшем анализе влияния эксплуатации реактора БН-800 результаты радиационного контроля за каждый год рассматривались вместе, без выделения зон влияния БАЭС.

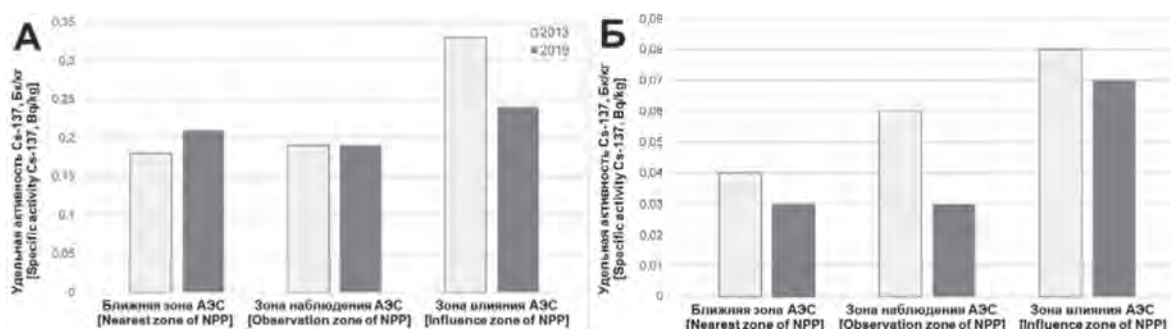


Рис. 1. Содержание техногенных радионуклидов (А –  $^{90}\text{Sr}$ , Б –  $^{137}\text{Cs}$ ) в картофеле, произведенном на разном расстоянии от Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/кг

[Fig. 1. Content of artificial radionuclides (A –  $^{90}\text{Sr}$ , B –  $^{137}\text{Cs}$ ) in potato produced in different distance from Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/kg]

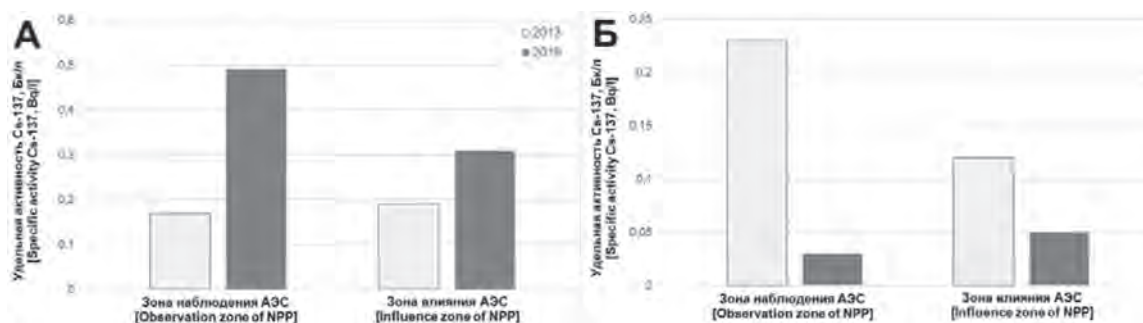


Рис. 2. Содержание техногенных радионуклидов (А –  $^{90}\text{Sr}$ , Б –  $^{137}\text{Cs}$ ) в молоке, произведенном на разном расстоянии от Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/л

[Fig. 2. Content of artificial radionuclides (A –  $^{90}\text{Sr}$ , B –  $^{137}\text{Cs}$ ) in milk produced in different distance from Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/l]

<sup>2</sup> СанПиН 2.3.2.2650-10 Дополнения и изменения № 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». М.: Минздрав РФ, 2010. 13 с. [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10 Additions and changes № 18 to Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01 "Hygienic requirements for food safety and nutritional value". Moscow: Ministry of Health of the Russian Federation. 2010:13. (In Russ.)]

<sup>3</sup> СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов // Бюллетень нормативных и методических документов госсанэпиднадзора. 2002. №4(10). С. 9–144. [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01 Hygienic requirements for food safety and nutritional value. Bulletin of regulations and methodological documents of the state sanitary and epidemiological supervision. 2002;4(10): 9-144. (In Russ.)]

За весь период наблюдений (2013 и 2019 гг.) содержание природного  $^{40}\text{K}$  в картофеле, овощах и корнеплодах варьировало в пределах 48–157 Бк/кг, во фруктах и садовых ягодах на уровне 58–168 Бк/кг, в продукции животноводства в диапазоне 18–97 Бк/кг, что является средним региональным показателем для сельскохозяйственной пищевой продукции (табл. 4).

Удельная активность техногенных радионуклидов в бахчевых, картофеле, овощах и корнеплодах была низкой как до, так и после начала эксплуатации

БН-800. Работа нового энергоблока БАЭС не привела к увеличению содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в данных видах пищевой продукции, а в некоторых из них (например, в свекле и тыкве) отмечено снижение концентрации обоих радионуклидов. Из всех продуктов растениеводства даже максимальные уровни содержания  $^{90}\text{Sr}$  (0,84 Бк/кг) и  $^{137}\text{Cs}$  (0,26 Бк/кг), отмеченные в свекле в 2013 г., были в 45 и 300 раз соответственно ниже действующих нормативов (СанПиН 2.3.2.1078-01<sup>4</sup> и СанПиН 2.3.2.2650-10<sup>5</sup>).

Таблица 4

**Содержание радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах, произведенных в районе Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/кг(л)**

[Table 4

**Content of radionuclides in agricultural foodstuff produced in the vicinity of Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/kg(l)]**

| Продукт питания [Foodstuff]  | $^{40}\text{K}$                     | $^{90}\text{Sr}$                      | $^{137}\text{Cs}$                        | Допустимые уровни [Permissible levels] |                   |
|--|-------------------------------------|---------------------------------------|--|--|-------------------|
|  |                                     |                                       |  | $^{90}\text{Sr}$                       | $^{137}\text{Cs}$ |
| Овощи [Vegetables]   |                                     |                                       |  |  |                   |
| Кабачки [Zucchini]   | $\frac{56 \pm 9^*}{78 \pm 14^{**}}$ | $\frac{0,15 \pm 0,07}{0,05 \pm 0,02}$ | $\frac{0,05 \pm 0,04}{0,04 \pm 0,03}$    |  |                   |
| Капуста [Cabbage]  | $\frac{56 \pm 11}{72 \pm 6}$        | $\frac{0,4 \pm 0,03}{0,6 \pm 0,02}$   | $\frac{0,04 \pm 0,03}{0,012 \pm 0,006}$  |  |                   |
| Картофель [Potato]   | $\frac{139 \pm 58}{157 \pm 60}$     | $\frac{0,22 \pm 0,14}{0,21 \pm 0,09}$ | $\frac{0,06 \pm 0,03}{0,05 \pm 0,04}$    |  |                   |
| Лук [Onion]  | $52 \pm 21^*$                       | $0,46 \pm 0,04^*$                     | $0,08 \pm 0,06^*$                        |  |                   |
| Морковь [Carrot]   | $\frac{129 \pm 18}{125 \pm 81}$     | $\frac{0,16 \pm 0,01}{0,23 \pm 0,15}$ | $\frac{0,05 \pm 0,02}{0,06 \pm 0,01}$    | 40                                     | 80                |
| Огурцы [Cucumber]  | $\frac{48 \pm 12}{72 \pm 2}$        | $\frac{0,04 \pm 0,02}{0,03 \pm 0,01}$ | $\frac{0,076 \pm 0,064}{0,01 \pm 0,001}$ |  |                   |
| Свекла [Beetroot]  | $\frac{128 \pm 28}{96 \pm 10}$      | $\frac{0,84 \pm 0,08}{0,1 \pm 0,03}$  | $\frac{0,26 \pm 0,22}{0,07 \pm 0,02}$    |  |                   |
| Томаты [Tomato]  | $\frac{113 \pm 27}{70 \pm 1}$       | $\frac{0,08 \pm 0,06}{0,18 \pm 0,03}$ | $\frac{0,13 \pm 0,05}{0,05 \pm 0,03}$    |  |                   |
| Тыква [Pumpkin]  | $\frac{91 \pm 1}{62 \pm 5}$         | $\frac{0,17 \pm 0,02}{0,08 \pm 0,02}$ | $\frac{0,03 \pm 0,01}{0,01 \pm 0,006}$   |  |                   |
| Фрукты и ягоды [Fruit and berry]                                     |                                     |                                       |  |  |                   |
| Крыжовник [Gooseberry]   | $58 \pm 5^{**}$                     | $0,35 \pm 0,09^{**}$                  | $0,03 \pm 0,02^{**}$                     |  |                   |
| Смородина [Currant]  | $\frac{89 \pm 10}{69 \pm 6}$        | $\frac{0,49 \pm 0,05}{0,19 \pm 0,06}$ | $\frac{0,48 \pm 0,05}{0,013 \pm 0,006}$  | –                                      | –                 |
| Яблоки [Apple]   | $168 \pm 80^*$                      | $1,9 \pm 0,03^*$                      | $0,57 \pm 0,35^*$                        |  |                   |
| Продукция животноводства и птицеводства [Animal product and poultry] |                                     |                                       |  |  |                   |
| Молоко [Milk]  | $\frac{57 \pm 14}{39 \pm 4}$        | $\frac{0,18 \pm 0,14}{0,41 \pm 0,21}$ | $\frac{0,11 \pm 0,09}{0,04 \pm 0,02}$    | 25                                     | 100               |
| Говядина [Beef]  | $35 \pm 3^{**}$                     | $2,4 \pm 0,1^{**}$                    | $0,12 \pm 0,03^{**}$                     |  | 200               |
| Свинина [Pork]   | $97 \pm 10^*$                       | $0,18 \pm 0,1^*$                      | $0,26 \pm 0,2^*$                         | –                                      | –                 |
| Мясо кур [Chicken meat]  | $\frac{56 \pm 3}{18 \pm 2}$         | $\frac{0,29 \pm 0,02}{0,2 \pm 0,1}$   | $\frac{0,13 \pm 0,1}{0,16 \pm 0,1}$      |  | –                 |

\* – 2013 г., \*\* – 2019 г.

<sup>4</sup> СанПиН 2.3.2.1078-01. 2002. С. 44 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01. 2002. P. 44. (In Russ.)]

<sup>5</sup> СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 4 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 4. (In Russ.)]

Концентрация  $^{90}\text{Sr}$  во фруктах и садовых ягодах в районе БАЭС и ИРМ находится в пределах 0,19–1,9 Бк/кг,  $^{137}\text{Cs}$  – 0,013–0,57 Бк/кг. На примере данных по смородине видно, что после начала эксплуатации реактора БН-800 содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в этих ягодах снизилось в 2,5 и более раз.

Как было отмечено выше, после начала работы реактора БН-800 динамика объемной активности техногенных радионуклидов в молоке, производящемся в зоне влияния БАЭС и ИРМ, была разнонаправленной: по  $^{90}\text{Sr}$  она немного возросла, по  $^{137}\text{Cs}$  снизилась. В то же время сравнение максимальных значений по содержанию  $^{90}\text{Sr}$  (0,41 Бк/л) и  $^{137}\text{Cs}$  в молоке (0,11 Бк/л) с требованиями СанПиН<sup>6</sup> показывает, что они в 60 раз по стронцию и в 900 раз по цезию ниже граничных уровней, установленных действующими нормативами. Эксплуатация нового реактора не привела к значимому увеличению содержания техногенных радионуклидов и в мясной продукции, а также птице. В мясе кур удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в последние годы остается

стабильно низкой, а нормируемое содержание  $^{137}\text{Cs}$  в говядине, по данным обследования 2019 г., оказалось более чем в 1,5 тыс. раз ниже требований СанПиН<sup>7</sup> (см. табл. 4). Стоит отметить, что, в отличие от других российских АЭС [3–4], в данном регионе в продукции животноводства в большей степени накапливается  $^{90}\text{Sr}$ , а не  $^{137}\text{Cs}$ . Это обусловлено аварийными выпадениями 1957 г., образующими Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). В целом, можно заключить, что содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственной продукции, производящейся в зоне влияния БАЭС и ИРМ, в последние годы находится на очень низком уровне, начало эксплуатации реактора БН-800 не привело к регистрируемому увеличению содержания в ней техногенных радионуклидов.

Радиационный контроль природных компонентов рациона питания населения в районе БАЭС и ИРМ показывает, что содержание  $^{40}\text{K}$  в лесных ягодах находится на уровне 30–300 Бк/кг, что шире аналогичного диапазона для садовых ягод (табл. 5). На эти отличия влияют

Таблица 5  
Содержание радионуклидов в природных пищевых продуктах района Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/кг  
[Table 5  
Content of radionuclides in natural foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/kg]

| Продукт питания [Foodstuff]      | $^{40}\text{K}$                     | $^{90}\text{Sr}$                    | $^{137}\text{Cs}$                   | Допустимые уровни [Permissible levels] |                                |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------|
|                                  |                                     |                                     |                                     | $^{90}\text{Sr}$                       | $^{137}\text{Cs}$              |
| Ягоды [Berry]                    |                                     |                                     |                                     |  |                                |
| Земляника [Strawberry]           | 89±13*                              | 1,14±0,1*                           | 1,27±0,6*                           |  |                                |
| Малина [Raspberry]               | $\frac{90\pm 16^*}{102\pm 25^{**}}$ | $\frac{0,47\pm 0,05}{0,3\pm 0,07}$  | $\frac{0,18\pm 0,01}{0,02\pm 0,01}$ | –                                      | 160                            |
| Черника [Blueberry]              | $\frac{300\pm 100}{30\pm 2}$        | $\frac{1,2\pm 0,2}{0,18\pm 0,02}$   | $\frac{0,9\pm 0,7}{0,2\pm 0,09}$    |  |                                |
| Грибы [Mushroom]                 |                                     |                                     |                                     |  |                                |
| Маслята [Yellow boletus]         | $\frac{76\pm 8}{64\pm 5}$           | $\frac{0,10\pm 0,01}{0,06\pm 0,03}$ | $\frac{1,7\pm 0,4}{3,7\pm 1,5}$     |  |                                |
| Подосиновик [Orange-cap boletus] | 110±20*                             | 0,08±0,01*                          | 0,6±0,1*                            | –                                      | 500                            |
| Подберезовик [Rough boletus]     | 115±34*                             | 0,07±0,01*                          | 5,8±1,5*                            |  |                                |
| Белый [Cep]                      | 79±29*                              | 2,4±0,2*                            | 2,2±1,1*                            |  |                                |
| Рыба [Fish]                      |                                     |                                     |                                     |  |                                |
| Карп [Carp]                      | 105±22*                             | 1,5±1,2*                            | 7,1±3,3*                            |  |                                |
| Плотва [Dace]                    | $\frac{94\pm 17}{21\pm 2}$          | $\frac{2,9\pm 2,4}{2,3\pm 1,4}$     | $\frac{3,1\pm 2,5}{1,8\pm 1,2}$     |  |                                |
| Судак [Pikeperch]                | 93±19*                              | 0,1±0,01*                           | $\frac{3,9\pm 0,3}{2,1\pm 0,6}$     |  |                                |
| Лещ [Bream]                      | 90±14*                              | $\frac{4,36\pm 0,25}{4,0\pm 0,4}$   | $\frac{1,99\pm 0,47}{1,4\pm 0,6}$   | 100 (для детского питания 60)          | 130 (для детского питания 100) |
| Окунь [Perch]                    | 85±22*                              | $\frac{1,95\pm 1,2}{1,95\pm 0,2}$   | $\frac{4,4\pm 1,3}{3,5\pm 0,9}$     |  |                                |
| Щука [Pike]                      | 91±19*                              | 2,9±1,5*                            | $\frac{1,5\pm 0,6}{0,7\pm 0,1}$     |  |                                |

\* – 2013 г., \*\* – 2019 г.

<sup>6</sup> СанПиН 2.3.2.1078-01. 2002. С. 24 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01. 2002. P. 24. (In Russ.)]

<sup>7</sup> СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 2 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 2. (In Russ.)]



как места произрастания ягодных культур, так и видовые особенности растений. Например, по кустарниковым (крыжовник, смородина, малина) результаты мониторинга содержания  $^{40}\text{K}$  в ягодах лесных и садовых растений оказались близки (60–100 Бк/кг). Содержание природного калия в грибах отмечено в пределах 64–115 Бк/кг, в рыбе – от 21 до 105 Бк/кг.

Данные радиационного контроля показывают, что после начала работы реактора БН-800 содержание техногенных радионуклидов в лесных ягодах не увеличилось. Максимальные уровни концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в землянике (1,27 Бк/кг), отмеченные до пуска нового энергоблока, были ниже требований СанПиН<sup>8</sup> в 125 раз (см. табл. 5). Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в грибах в период наблюдений находилось на уровне 0,1–2,5 Бк/кг,  $^{137}\text{Cs}$  несколько выше – 0,6–5,8 Бк/кг. На разброс данных по содержанию техногенных радионуклидов в грибах большое влияние оказывают как место их сбора (в СЗЗ и ЗН БАЭС есть участки с повышенными плотностями загрязнения), так и видовые особенности грибов, являющихся абсорбентами загрязняющих веществ [15]. Максимально зафиксированная удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  отмечена в пробе подберезовиков, отобранных в лесу в районе Ольховского болота, однако и она была ниже норматива СанПиН<sup>9</sup> более чем в 80 раз.

В работе [2], по данным мониторинга 2005–2008 гг., до пуска реактора БН-800 содержание  $^{90}\text{Sr}$  в грибах и ягодах отмечалось на уровне 0,07 Бк/кг. Средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в грибах составляла 2,9, в ягодах 0,19 Бк/кг, что близко к результатам, полученным в настоящем исследовании.

Рыба, представляющая в водных экосистемах высший трофический уровень, непосредственно связана с пищевой цепочкой человека. Большую практическую значимость в этом плане приобретают работы по ее радиационному контролю, проводимые на водоемах-охладителях, которые широко используются для рыболовства и рыбозахвата [17]. В условиях Белоярского водохранилища на подогретых водах много лет функционирует рыбное хозяйство по выращиванию садкового карпа. Кроме того, в водоеме ведется промышленный и любительский отлов рыбы. Радиоэкологические исследования рыбы Белоярского водохранилища проводятся с 1980-х гг. [5, 14]. Они были направлены на оценку роли температурного фактора при накоплении радионуклидов ихтиофауной, радиационной чистоты рыбной продукции, выращиваемой в условиях садкового хозяйства на подогретых водах, и уровней накопления радионуклидов различными видами свободноживущей рыбы Белоярского водохранилища. Проведена сравнительная оценка концентраций  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в плотве двух зон водоема-охладителя – Теплому заливу и верховью. Как показали полученные результаты, в зоне подогрева водохранилища сбросными водами БАЭС (Теплый залив) концентрация обоих радионуклидов в рыбе во все периоды наблюдений была в среднем выше, чем в верховье. Аналогичные данные получены по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в щуке и леще. Оба вида рыб, отловленных в зоне подогрева, содержали примерно в 2 раза боль-

ше радионуклида, чем в контрольном районе [14]. В результате многолетних исследований также показано, что концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в садковом карпе, выращиваемом на теплых водах Белоярского водохранилища с использованием искусственного корма, несколько ниже, чем в плотве. С одной стороны, это обусловлено видовыми особенностями рыб (при прочих равных условиях свободноживущий карп накапливает  $^{137}\text{Cs}$  меньше, чем плотва), а с другой – способом их питания. Садковый карп питается искусственным кормом с фоновым содержанием радионуклидов, а плотва, свободно обитающая в водоеме, использует корм, обогащенный техногенными радионуклидами. Таким образом, основным путем поступления  $^{137}\text{Cs}$  в организм рыб является пищевой канал.

По данным мониторинга 2013 и 2019 гг., за 6 лет во всех выловленных образцах рыб произошло снижение содержания техногенных радионуклидов, которое составило по  $^{90}\text{Sr}$  – 8–20%, по  $^{137}\text{Cs}$  – более 20% в зависимости от вида ихтиофауны (см. табл. 5). Динамика по снижению накопления техногенных радионуклидов в рыбе отмечена также в более ранних исследованиях [14] и обусловлена значительным уменьшением поступления радионуклидов в водные экосистемы после остановки на БАЭС реакторов АМБ-100 и АМБ-200. В ходе текущих исследований максимальные уровни содержания  $^{90}\text{Sr}$  были зафиксированы в леще, но и они были ниже наиболее жестких нормативов СанПиН (использование рыбы для детского питания) в 14 раз. Максимальные уровни загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  зафиксированы в свободно живущем карпе до пуска реактора БН-800, и они были меньше наиболее жестких нормативов СанПиН для детского питания в 14 раз. В работе [2] содержание  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе оценивается на уровне 0,12 Бк/кг,  $^{137}\text{Cs}$  – 1,3 Бк/кг, что сопоставимо с результатами данной работы.

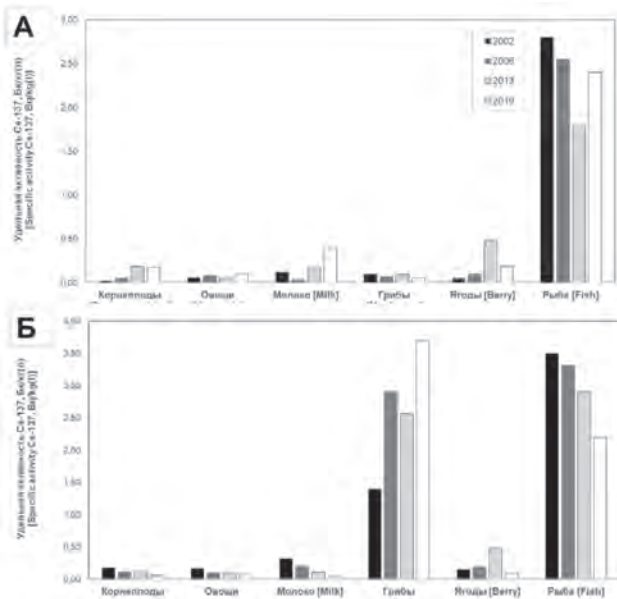
Основываясь на многолетних данных статистики, водные экосистемы района БАЭС и ИРМ можно расположить в следующем ряду по снижению содержания  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе: реки ЗН БАЭС (Камышенка, Гагарка, Режик, Мезенка, Каменка) (3,7±1,8 Бк/кг) > Белоярское водохранилище (2,8±0,5 Бк/кг). По снижению содержания  $^{137}\text{Cs}$  в рыбе ряд выглядит следующим образом: Белоярское водохранилище (5,8±3,4 Бк/кг) > реки ЗН БАЭС (1,5±0,3 Бк/кг).

В исследуемом регионе БАЭС и ИРМ важно проанализировать многолетнюю динамику накопления техногенных радионуклидов в пищевой продукции. Такая оценка выполнена для 2002, 2006, 2013 и 2019 гг. (рис. 3).

В течение последних 17 лет вариации содержания  $^{90}\text{Sr}$  во всех рассмотренных продуктах, кроме рыбы, не превышают 0,5 Бк/кг. Концентрация радиоизотопа стронция в рыбе выше, в пределах 1,8–2,8 Бк/кг. Ни в одном из пищевых продуктов не отмечен значимый рост содержания  $^{90}\text{Sr}$  в период 2002–2019 гг. Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в корнеплодах, овощах, молоке и ягодах также менее 0,5 Бк/кг. Более высокая, по сравнению с другими продуктами, удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в рыбе (2,2–3,5 Бк/кг) и грибах (1,4–

<sup>8</sup> СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 5 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 5. (In Russ.)]

<sup>9</sup> СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 5 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 5. (In Russ.)]



**Рис. 3.** Динамика содержания техногенных радионуклидов (А – <sup>90</sup>Sr, Б – <sup>137</sup>Cs) в пищевых продуктах района Белоярской АЭС, Бк/кг(л)

**[Fig. 3.** Dynamic of content artificial radionuclides (A – <sup>90</sup>Sr, Б – <sup>137</sup>Cs) in foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP, Bq/kg(l)]

3,7 Бк/кг) объясняется особенностями их местообитания (произрастания). Учитывая низкое, относительно требований СанПин, содержание техногенных радионуклидов

в грибах и рыбе, а также их небольшой вклад в рацион питания населения, нельзя говорить о значимом влиянии на дозоформирование населения от этих пищевых продуктов.

По данным многолетних (2002–2019 гг.) наблюдений, основные пищевые продукты в районе БАЭС по накоплению <sup>90</sup>Sr можно расположить в ряд: рыба (2,4 Бк/кг) > ягоды (0,21 Бк/кг) > молоко (0,19 Бк/л) > корнеплоды (0,11 Бк/кг) > грибы (0,08 Бк/кг) > овощи (0,07 Бк/кг). По содержанию <sup>137</sup>Cs ряд продуктов питания будет выглядеть иначе: рыба (2,9 Бк/кг) > грибы (2,6 Бк/кг) > ягоды (0,23 Бк/кг) > молоко (0,17 Бк/л) > корнеплоды (0,12 Бк/кг) > овощи (0,11 Бк/кг).

Большое значение для обеспечения радиационной безопасности в районе БАЭС и ИРМ имеет контроль в продуктах питания таких важных биофильных радионуклидов, как <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C. Тритий (<sup>3</sup>H) – сверхтяжелый изотоп водорода, характеризуется большой подвижностью как в водной, так и воздушной среде. Данный радионуклид непрерывно образуется при делении ядер урана и плутония в технологическом цикле работы энергоблоков БН-600 и БН-800 БАЭС и присутствует в составе выбросов и сбросов атомной станции [18]. Углерод-14 (<sup>14</sup>C) является одним из изотопов в линейке продукции ИРМ [19]. При работе АЭС <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C поступают в окружающую среду, включаются в состав биологической ткани, вызывая мутагенные нарушения как посредством β-излучения, так и за счет нарушения молекулярных связей (трансмутации). В 2013 г. совместно с АО «Радиевый институт» были выполнены оценки накопления органически связанных <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C в отдельных видах пищевой продукции района размещения БАЭС и ИРМ (табл. 6).

**Содержание органически связанных <sup>3</sup>H и <sup>14</sup>C в пищевых продуктах района Белоярской АЭС в 2013 г., Бк/кг**

Таблица 6

**Content of organically bound <sup>3</sup>H and <sup>14</sup>C in foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP in 2013, Bq/kg**

[Table 6

| Продукт питания [Foodstuff]                           | Число проб [Number of samples] | <sup>3</sup> H | <sup>14</sup> C |
|---|--------------------------------|----------------|-----------------|
| Сельскохозяйственные продукты [Agricultural products] |                                |                |                 |
| Кабачки [Zucchini]                                    | 3                              | 3,2±1,3        | 6,1±4,6         |
| Капуста [Cabbage]                                     | 2                              | 8,7±4,2        | 4,1±0,8         |
| Картофель [Potato]                                    | 5                              | 28,3±9,9       | 18,5±6,1        |
| Огурцы [Cucumber]                                     | 2                              | 5,9±4,5        | 4,6±3,9         |
| Тыква [Pumpkin]                                       | 1                              | 5,8±2,3        | 8,0±2,4         |
| Молоко [Milk]   | 2                              | 10,4±0,9       | 95,1±37,5       |
| Вишня [Cherry]  | 1                              | 8,6±3,4        | 5,2±1,6         |
| Природные продукты [Natural products]                 |                                |                |                 |
| Малина [Raspberry]                                    | 1                              | 13,8±5,5       | 9,4±3,0         |
| Черника [Blueberry]                                   | 1                              | 2,5±0,8        | 6,1±1,8         |
| Подосиновик [Orange-cap boletus]                      | 1                              | 5,8±2,3        | 6,7±2,0         |
| Подберезовик [Rough boletus]                          | 1                              | 25,9±10,4      | 18,4±6,1        |
| Карп [Carp]   | 1                              | 8,1±2,4        | –               |
| Окунь [Perch]   | 1                              | 7,9±2,3        | –               |
| Лещ [Bream]   | 1                              | 23,6±7,1       | 72,6±36,1       |

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что, несмотря на наличие техногенного вклада, содержание радионуклидов  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$  в пищевых продуктах находится на низком, близком к фоновому уровню Уральского региона [12, 20]. В то же время отмечено, что в сельскохозяйственных продуктах питания района БАЭС и ИРМ эти радионуклиды в большей степени накапливаются в картофеле и молоке. Природными продуктами с более высокими накопительными характеристиками являются пробы подберезовика и леща, в которых было отмечено и повышенное содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

### Заключение

Анализ результатов многолетних мониторинговых исследований динамики содержания техногенных радионуклидов в местной пищевой продукции района Белоярской АЭС и Института реакторных материалов позволяет сделать вывод о том, что эксплуатация данных радиационно-опасных объектов в штатном режиме не приводит к регистрируемому увеличению содержания в продуктах питания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Производимая в частном секторе населенных пунктов зоны влияния Белоярской АЭС пищевая продукция, а также природные продукты питания региона полностью соответствуют установленным в СанПиН нормативам по содержанию радионуклидов с большими коэффициентами запаса и не оказывают значимого влияния на формирование дополнительных дозовых нагрузок на население. Оценка первых лет эксплуатации реактора БН-800 также показывает, что нормализованные газоарозольные выбросы и жидкие сбросы нового энергоблока не привели к увеличению содержания техногенных радионуклидов в местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктах.

Предварительные исследования содержания  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$  в продуктах питания района БАЭС показывают необходимость расширения мониторинговых работ по изучению накопления данных радиоизотопов в пищевой продукции. Научным комитетом по действию атомной радиации (НКДАР ООН)  $^3\text{H}$  и  $^{14}\text{C}$  отнесены к числу наиболее радиологически значимых в глобальном масштабе долгоживущих радионуклидов в ядерно-энергетическом цикле. В настоящее время проблему тритиевого и углеродного загрязнения экосистем в районах размещения предприятий ЯТЦ можно считать одной из ключевых в радиоэкологии. Поэтому изучение миграции этих радионуклидов в экосистемах и их накопление в пищевых продуктах следует продолжить.

Полученные результаты исследований можно использовать для информирования заинтересованных сторон о современной радиационной обстановке в районе БАЭС и ИРМ, расчета дозовых нагрузок на население от потребления местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов, содержащих радионуклиды, а также оценки радиационных рисков от газоарозольных выбросов и жидких сбросов при эксплуатации радиационно-опасных объектов.

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

### Литература

1. Алексахин Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2013. Т. 114, №5. С. 243-248.

2. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: Издат, 2010. 496 с.
3. Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К. Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, №2 (специальный выпуск). С. 54-65.
4. Кузнецов В.К., Панов А.В., Санжарова Н.И., и др. Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, №2. С. 39-51.
5. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. Динамика радиозоологического состояния пресноводных экосистем, подверженных многолетнему воздействию атомной электростанции в границах наблюдаемой зоны // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 3. С. 302-313.
6. Михайловская Л.Н., Гусева В.П., Рукавишникова О.В., Михайловская З.Б. Техногенные радионуклиды в почвах и растениях наземных экосистем в зоне воздействия атомных предприятий // Экология. 2020. № 2. С. 110-118.
7. Чеботина М.Я., Лисовских В.Г., Реч Т.А., и др. О динамике прохождения жидких сбросов Белоярской АЭС через Ольховское болото // Экология. 1993. №2. С. 88-90.
8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2004 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2005. 287 с.
9. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2014. 357 с.
10. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2019. 324 с.
11. 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.
12. Янов А.Ю., Востротин В.В., Финашов Л.В. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16, № 2. С. 85-99.
13. Крышев И.И., Булгаков В.Г., Крышев А.И., и др. Мониторинг радиоактивности приземного слоя воздуха и атмосферных выпадений в районе расположения АЭС // Атомная энергия. 2019. Т. 126, № 4. С. 228-234.
14. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. Радиоэкология пресноводных экосистем. Екатеринбург: Изд-во УрГЭСХА, 2006. 390 с.
15. Кадука М.В., Шутов В.Н., Брук Г.Я., Балонев М.И. Роль физико-химических свойств почвы в формировании радиоактивного загрязнения грибов // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 1. С. 32-35.
16. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Сапрыкин К.А., Титов Н.В. Оптимизация радиационного мониторинга, проводимого в субъектах Российской Федерации в рамках радиационно-гигиенической паспортизации // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 36-48.
17. Трапезникова В.Н., Трапезников А.В., Куликов Н.В. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  в промысловых рыбах водоема-охладителя Белоярской АЭС // Экология. 1984. № 6. С. 36-40.
18. Линге И.И., Крышев И.И. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. М.: «САМ полиграфист», 2015. 296 с.
19. Институт реакторных материалов. Отчет об экологической безопасности за 2013 г. Заречный, 2014. 27 с.
20. Чеботина М.Я., Пономарева Р.П. Особенности накопления радиоуглерода в компонентах природной среды // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4 (13). С. 86-94.

Поступила: 09.06.2020 г.

**Панов Алексей Валерьевич** – доктор биологических наук, профессор Российской академии наук, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Министерство образования и науки России. **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 радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, Россия

**Исамов Низаметдин Низаметдинович** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Министерство образования и науки России, Обнинск, Россия

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

**Кузнецов Владимир Константинович** – доктор биологических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Министерство образования и науки России, Обнинск, Россия

**Гешель Ирина Викторовна** – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Министерство образования и науки России, Обнинск, Россия

**Для цитирования:** Панов А.В., Трапезников А.В., Исамов Н.Н., Коржавин А.В., Кузнецов В.К., Гешель И.В. 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

---

## Assessment of the impact of the BN-800 reactor operation on the radionuclides content in local foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP

Alexey V. Panov <sup>1</sup>, Aleksandr V. Trapeznikov <sup>2</sup>, Nizametdin N. Isamov <sup>1</sup>, Aleksandr V. Korzhavin <sup>2</sup>, Vladimir K. Kuznetsov <sup>1</sup>, Irina V. Geshel <sup>1</sup>

<sup>1</sup>All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

<sup>2</sup>Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

*The research results are presented as an analysis of long-term data on the effect of gas-aerosol emissions and liquid discharges of Beloyarsk NPP and the Institute of Reactor Materials on the content of artificial radionuclides in local foodstuffs. It was noted that the distance and directions from radiation-hazardous facilities do not significantly affect the accumulation of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in potatoes and milk. The investigation of a wide range of foodstuffs from the private households of 23 settlements, forests, rivers, and a reservoir of the 30-km zone of the Beloyarsk NPP influence showed that the operation of the BN-800 reactor since 2016 did not lead to a registered increase in the content of artificial radionuclides in agricultural and natural foodstuffs. The maximum specific activities of <sup>90</sup>Sr (0.84 Bq/kg) and <sup>137</sup>Cs (0.26 Bq/kg) in root vegetables, potatoes, melons and vegetables were noted before the start of operation of the new power unit and were 45 and 300 times, respectively, lower than the current SanPiN standards. The highest content of <sup>90</sup>Sr in milk (0.41 Bq/l) was 60 times lower than the requirements of SanPiN, <sup>137</sup>Cs (0.11 Bq/l) was 900 times less than the permissible levels. In poultry, the specific activity of <sup>90</sup>Sr (0.2–0.3 Bq/kg) and <sup>137</sup>Cs (0.13–0.16 Bq/kg) has remained stable low in recent years, and the standardised content of <sup>137</sup>Cs in beef (maximum 0.12 Bq/kg) more than 1.5 thousand times lower than the requirements of SanPiN. The highest concentration of <sup>137</sup>Cs in wild berries, found in strawberries (1.27 Bq/kg), was 125 times less than SanPiN standards. The content of <sup>90</sup>Sr in mushrooms was at the level of 0.1–2.5 Bq/kg, the content of <sup>137</sup>Cs is slightly higher than – 0.6–5.8 Bq/kg. The maximum recorded specific activity of <sup>137</sup>Cs in mushrooms was more than 80 times lower than the requirements of SanPiN. During the observation period, a decrease of up to 20% or more in the content of artificial radionuclides in samples of 5 fish species was noted; the maximum levels of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in it were 14 times lower than the*

---

**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

strictest SanPiN standards (using fish for baby food). Selective radiation monitoring of foodstuffs of Beloyarsk NPP area aimed at  $^3\text{H}$  and  $^{14}\text{C}$  showed that the content of these radionuclides in foodstuffs was low, close to the background level. In agricultural products,  $^3\text{H}$  and  $^{14}\text{C}$  accumulated to a greater extent in potatoes and milk, and in natural products – in rough boletus and bream. There was noted a need to continue research on the accumulation of  $^3\text{H}$  and  $^{14}\text{C}$  in foodstuffs of Beloyarsk NPP vicinity.

**Key words:** radiation safety, radiation monitoring,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ , agricultural foodstuffs, natural foodstuffs, radiation-hygienic assessment, long-term dynamics.

## References

- Alexakhin RM. Topical environmental problems of nuclear power. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2013;114(5): 243-248. (In Russian).
- Kryshev II, Ryazantsev EP. Environmental safety of Russia's nuclear power complex. M.: Izdat; 2010: 496. (In Russian).
- Panov AV, Isamov NN, Kuznetsov VK. Radioecological monitoring in the vicinity of Rostov NPP. The analysis of results of long-term investigations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2(special issue)): 54-65. (In Russian).
- Kuznetsov VK, Panov AV, Sanzharova NI, Isamov NN, Andreeva NV, Geshel IV, et al. The analysis of radioecological monitoring results in the vicinity of Kursk Nuclear Power Plant. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 39-51. (In Russian).
- Trapeznikov AV, Trapeznikova VN, Korzhavin AV. Dynamics of radioecological state of the fresh-water ecosystems affected by a long-term impact from nuclear power plant in the frontiers of the zone under observation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2015;55(3): 302-313. (In Russian).
- Mikhailovskaya LN, Guseva VP, Rukavishnikova OV, Mikhailovskaya ZB. Technogenic Radionuclides in Soils and Plants of Terrestrial Ecosystems in the Zone of Impact from Nuclear Enterprises. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*. 2020;51: 127-135. (In Russian).
- Chebotina MYu, Lisovskikh VG, Rech TA, Kononovich AL, Luppov VA, Rafikov EM, et al. On the Dynamics of Passage of Liquid Waste Discharge from the Beloyarskaya Nuclear Power Plant through the Olkhovskoe Bog. *Ekologiya = Ecology*. 1993;2: 88-90. (In Russian).
- The radiation situation in Russia and neighboring states in 2004. Yearbook. Obninsk: FSBI NPO «Typhoon»; 2005: 287. (In Russian).
- The radiation situation in Russia and neighboring states in 2013. Yearbook. Obninsk: FSBI NPO «Typhoon»; 2014: 357. (In Russian).
- The radiation situation in Russia and neighboring states in 2018. Yearbook. Obninsk: FSBI NPO «Typhoon»; 2019: 332. (In Russian).
- Chebotina MYa, 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).
- Yanov AYu, Vostrotnin VV, Finashov LV. Environmental Tritium in the Ural Region: Current Situation and Radiation Protection Analysis of Research Perspectives. *Chelovek. Sport. Meditsina = Human. Sport. Medicine*. 2016;16(2): 85-99. (In Russian).
- Kryshev II, Bulgakov VG, Kryshev AI, Katkova MN, Sazykina TG, Pavlova NN, et al. Radioactivity monitoring of the surface air layer and atmospheric fallout near NPP. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2019;126(4): 264-271. (In Russian).
- Trapeznikov AV, Trapeznikova VN. Radioecology of freshwater ecosystems. – Ekaterinburg: Publishing House of the Ural State Agricultural Academy; 2006: 390. (In Russian).
- Kaduka MV, Shutov VG, Bruk GYa, Balonov MI. Role of soil and climate characteristics in the formation of radioactive contamination of mushroom. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 33-35. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Saprykin KA, Titov NV. Optimization of radiation monitoring conducted in the subjects of the Russian Federation in the framework of radiation-hygienic certification. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 36-48. (In Russian).
- Trapeznikova VN, Trapeznikov AV, Kulikov NV. The accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  by commercial fish in the cooling reservoir of the Beloyarsk Nuclear Power Plant. *Ekologiya = Ecology*. 1984;6: 36-40. (In Russian).
- Linge II, Kryshev II. Radioecological situation in the regions where Rosatom enterprises are located. Moscow: «SAM polygraphist»; 2015: 296. (In Russian).
- Institute of Reactor Materials. Environmental Safety Report 2013. Zarechny; 2014: 27. (In Russian).
- Chebotina MYa, Ponomareva RP. Peculiarities of radiocarbon accumulation in environmental components. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik = Ural Geophysical Bulletin*. 2007;4(13): 86-94. (In Russian).

Received: June 09, 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

**Nizametdin N. Isamov** – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, 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

**Vladimir K. Kuznetsov** – Doctor of Biological Sciences, principal researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

**Irina V. Geshel** – Researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

**For citation: Panov A.V., Trapeznikov A.V., Isamov N.N., Korzhavin A.V., Kuznetsov V.K., Geshel I.V. 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. Vol. 13, No. 3. P. 38-50. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50**