

Агрочоведение и агроэкология

УДК 614.876:631/635:631.95:631.4

DOI: 10.31857/S2500262722010082

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АГРОСФЕРЫ В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**А. В. Панов**, доктор биологических наук, **В. К. Кузнецов**, доктор биологических наук, **П. Н. Цыгвинцев**, кандидат биологических наук, **Н. Н. Исамов**, кандидат биологических наук*Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское ш., 109 км
E-mail: riar@mail.ru*

Контроль радиационной обстановки в сельском хозяйстве в зонах влияния атомных электростанций – важный фактор обеспечения безопасности населения, проживающего в районах расположения АЭС. Исследование проводили с целью анализа результатов многолетнего радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем в 30-ки зонах вокруг Белоярской, Курской, Ленинградской и Ростовской атомных электростанций. В районах размещения обследованных АЭС отсутствуют участки сельскохозяйственных угодий, отнесенные к радиоактивно загрязненным (более 37 кБк/м² по ¹³⁷Cs). Средняя плотность загрязнения почв агроэкосистем ¹³⁷Cs варьирует в диапазоне 2...17 кБк/м², ⁹⁰Sr – в пределах 0,9...1,6 кБк/м². Более высокие уровни содержания ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвах лугопастбищных угодий в 1,1...1,6 раз выше, чем пашни, что обусловлено агротехническими мероприятиями на последних. В продукции растениеводства из 30-ки зон влияния АЭС максимальные уровни удельной активности ¹³⁷Cs ниже действующих радиологических нормативов в 67...160 раз, ⁹⁰Sr – в 10...40 раз. В продукции животноводства максимальное содержание ¹³⁷Cs ниже санитарно-гигиенических стандартов в 330...440 раз, ⁹⁰Sr – в 60 раз. Отмечена важность мониторинга радиологически значимых ³H и ¹⁴C в пищевых продуктах в районах АЭС.

RADIATION SAFETY OF AGROSPHERE IN THE VICINITY OF NUCLEAR POWER PLANTS**Panov A.V., Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Isamov N.N.***Russian Institute of Radiology and Agroecology,
249032, Kaluzhskaya obl., Obninsk, Kievskoe sh., 109
E-mail: riar@mail.ru*

Radiation control in agriculture in the zones of influence of Nuclear Power Plants (NPPs) is an important factor in ensuring the safety of the population in the vicinity of NPPs. The aim of the work was to analyze the results of long-term radioecological monitoring of agrarian ecosystems in 30-km zones around the Beloyarsk, Kursk, Leningrad and Rostov NPPs. It is shown that in the vicinity of NPPs, there are no agricultural sites classified as radioactively contaminated (above 37 kBq/m² for ¹³⁷Cs). The average of contamination density of soil in agroecosystems with ¹³⁷Cs varies in the range of 2-17 kBq/m², ⁹⁰Sr in the range of 0.9-1.6 kBq/m². Higher levels of ¹³⁷Cs specific activity in agricultural soil are noted in the vicinity of Leningrad NPP and are determined by the Chernobyl fallout. Contamination density of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the soils of grassland is 1.1-1.6 times higher than that of arable land, which is due to agrotechnical measures on arable land. In crop production from 30-km zones of NPP influence, the maximum levels of specific activity of ¹³⁷Cs are 67-160 times, ⁹⁰Sr are 10-40 times lower than the radiological standards. In livestock products, the maximum content of ¹³⁷Cs are 330-440 times, ⁹⁰Sr is 60 times lower than the sanitary-hygienic standards. The importance of monitoring radiologically significant ³H and ¹⁴C in food products in the nuclear power plant areas was noted.

Ключевые слова: ядерная энергетика, аграрные экосистемы, радиационно-экологический мониторинг, радионуклиды, плотность загрязнения, сельскохозяйственная продукция, продукты питания

Key words: nuclear power, agrarian ecosystems, radioecological monitoring, radionuclides, contamination density, agricultural products, foodstuff

Ключевая проблема развития ядерной энергетики – обеспечение радиационной безопасности человека [1, 2]. Атомные электростанции в ядерном топливном цикле представляют наибольший риск с точки зрения облучения населения в случае возникновения на них аварийных ситуаций. Опыт ликвидации крупнейших радиационных аварий (на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима) показал длительный (десяtkи лет) характер радиологических последствий для окружающей среды, включая агросферу [3, 4, 5].

Многолетняя эксплуатация атомных электростанций в технологически штатном режиме не выявила их отрицательного воздействия на человека и биоту [6, 7, 8]. В то же время, даже в условиях нормальной работы, АЭС осуществляет в строго регламентированных количествах выбросы газоаэрозолей и сбросы технологических вод, содержащих радионуклиды [9]. Поэтому в международных документах по радиационной безопасности подчеркивается необходимость доказательства отсутствия негативных эффектов при эксплуатации атомных электростанций на человека [2]. Такое обоснование возможно только при организации и

ведении радиационно-экологического мониторинга в районах размещения АЭС на основе результатов многолетних наблюдений за выбросами и сбросами радионуклидов в атмосферу, водные и наземные экосистемы [10, 11, 12].

Для оценки динамики поступления в окружающую среду техногенных радиоизотопов от АЭС часто используют наземные (природные и аграрные) экосистемы, а объектом исследования служит почвенно-растительный покров [13]. Почва несет основную техногенную нагрузку и позволяет дать интегральную оценку загрязнения радионуклидами территории в зоне влияния атомной электростанции. Растения, вследствие их аккумулярующей способности, служат индикатором радиоактивного загрязнения наземных экосистем. При этом сельскохозяйственные культуры представляют собой первичное звено в пищевой цепи человека, что важно для оценки формирования доз облучения населения от техногенных радиоизотопов.

Большое количество российских АЭС расположены в зонах интенсивного ведения сельскохозяйственного производства. Например, в районах Курской и Ростовской АЭС

сельскохозяйственные угодья занимают до 90% сухопутной части 30-км зоны влияния атомных станций [14, 15]. Аграрная продукция, производящаяся вблизи атомных электростанций, – основной источник поступления радионуклидов в рационы питания населения, проживающего в районах расположения АЭС. Поэтому радиационный контроль сельскохозяйственной продукции местного производства – одно из обязательных условий корректной оценки последствий воздействия атомных электростанций на человека [10, 11].

Цель исследований – анализ данных многолетнего радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем в районах размещения российских атомных электростанций.

Методика. Для оценки влияния АЭС на агросферу рассмотрены четыре атомные электростанции с конструктивно отличающимися энергоблоками и временем их работы, расположенные в различных почвенно-климатических зонах (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика Российских АЭС (данные на 2021 г.)

АЭС	Тип реактора	Период эксплуатации, годы
Белоярская	АМБ-100	1964–1983
	АМБ-200	1967–1990
	БН-600	с 1980 г. по настоящее время (н.в.)
	БН-800	с 2015 г. по н.в.
Курская	4 РБМК-1000	с 1976, 1979, 1983, 1985 гг. по н.в.
Ленинградская	РБМК-1000	1973–2018 гг.
	РБМК-1000	1975–2020 гг.
	2 РБМК-1000	с 1979, 1981 гг. по н.в.
	2 ВВЭР-1200	с 2018, 2020 гг. по н.в.
Ростовская	4 ВВЭР-1000	с 2001, 2010, 2014, 2018 гг. по н.в.

Это дало возможность максимально учесть комплекс факторов, влияющих на поступление техногенных радионуклидов при эксплуатации атомных электростанций в почвы агроэкосистем, сельскохозяйственную продукцию и продукты питания местного производства, включая типы реакторов, сроки их эксплуатации, природные и хозяйственные особенности территорий, близость других предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и зон радиоактивного загрязнения.

Аграрный сектор в зонах влияния исследуемых атомных электростанций многоотраслевой и включает в себя ведение как земледелия, так и животноводства. Сельскохозяйственная продукция местного производства составляет основу рационов питания населения. Радиологический мониторинг аграрных экосистем проводили в радиусе 30-км от радиационно-опасных объектов. В зоне влияния Белоярской АЭС он был организован в 2013–2019 гг. до и после ввода в эксплуатацию наиболее мощного в мире реактора на быстрых нейтронах БН-800 [16]. В районе расположения Курской АЭС мониторинг осуществляли в 2003–2019 гг. для оценки долговременного влияния эксплуатации реакторов РБМК на агроэкосистемы [14]. Для региона Ленинградской АЭС проанализирован более длительный период наблюдений (1980–2014 гг.), что позволило дать оценку влияния Чернобыльских выпадений на радиологическую обстановку в сельском хозяйстве [17]. В зоне влияния Ростовской АЭС мониторинг агроэкосистем проводили в период работы всех четырех энергоблоков ВВЭР с 2001 по 2018 гг. [15].

Для каждой атомной электростанции в соответствии с действующими требованиями [18] и международными рекомендациями [10, 11] была разработана детализированная программа радиационно-экологического мониторинга агроэкосистем и регламент проведения исследований, которые включали:

- схему сети пунктов (участков) наблюдения с географической привязкой;
- перечень объектов мониторинга;
- наблюдаемые параметры;
- способы и процедуры определения контролируемых параметров (измерения на месте, отбор проб и др.);
- периодичность проведения наблюдений;
- методы анализа отобранных проб.

Все участки сети радиологического мониторинга выбирали с учетом «фозы» ветров на разном расстоянии и направлениях от АЭС так, чтобы на доминирующих типах почв осуществлялось возделывание основных сельскохозяйственных культур и производство преобладающих в рационе питания населения пищевых продуктов растениеводства и животноводства. При этом учитывали однородность рельефа и почвенно-растительного покрова. Количество точек наблюдения, их размещение и число отбираемых проб было достаточным для пространственной характеристики уровня содержания радионуклидов в почве и сельскохозяйственной продукции. В комплексе это обеспечило методическую основу оценки максимально возможного воздействия атомных электростанций на аграрные экосистемы.

Пробы почвы и сельскохозяйственной продукции отбирали на всех сельскохозяйственных угодьях: пашня, пастбища, огороды. Отбор проб почвы на пашне и огородах осуществляли из пахотного слоя (0–20 см), на пастбищах из верхнего почвенного слоя глубиной 10 см [18]. Образцы растительности отбирали сопряженно с почвой. В каждой точке пробоотбора измеряли мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД). Подготовку образцов к измерениям и их анализ на содержание радионуклидов выполняли в лаборатории радиационного контроля ФГБНУ ВНИИРАЭ, сертифицированной в системе Росаккредитация (RA.RU.21AД81). Полученные результаты по удельной активности радиологически значимых ^{137}Cs и ^{90}Sr в пищевых продуктах и кормах сельскохозяйственных животных сравнивали с нормативами [19, 20, 21]. Совместно со специалистами АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (ГК «Росатом») проведены исследования содержания ^3H и ^{14}C в отдельных видах сельскохозяйственной и пищевой продукции, производящихся в районах размещения Белоярской и Ленинградской АЭС.

Результаты и обсуждение. Исследуемые АЭС при работе в штатном режиме выбрасывают в атмосферу широкий спектр техногенных радионуклидов: ^3H , ^{14}C , ^{41}Ar , $^{85,87,88}\text{Kr}$, $^{133,135,138}\text{Xe}$, ^{51}Cr , ^{54}Mn , $^{58,60}\text{Co}$, ^{90}Sr , ^{95}Nb , $^{131,133}\text{I}$, $^{134,137}\text{Cs}$ и др. [22]. Однако наиболее радиологически значимые и нормируемые в почве, сельскохозяйственной и пищевой продукции – долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs . Эти радионуклиды в соотношении $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ равном 1,6 определяют техногенный радиационный фон от глобальных радиоактивных выпадений в результате испытаний ядерного оружия. В ряде регионов России они также влияют на радиационную обстановку после крупных аварий на радиационно-опасных объектах. Так, ^{90}Sr после радиационной аварии на ПО «Маяк» в 1957 г. образовал Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. в большей степени на территории Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей выпал ^{137}Cs [23, 24].

В почвах агроэкосистем Белоярской, Курской, Ленинградской и Ростовской АЭС соотношение $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ составляет в среднем 2,2, 9,1, 9,3 и 2,5, соответственно. Таким образом, если в районах Белоярской и Ростовской АЭС зависимость

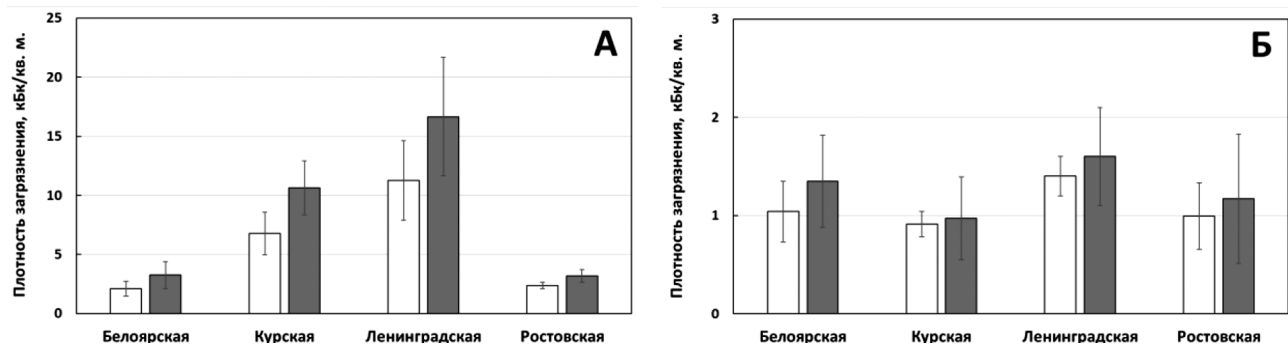


Рис. 1. Плотность загрязнения почв сельскохозяйственных угодий в 30-км зонах влияния атомных электростанций: А – ^{137}Cs , Б – ^{90}Sr ; □ – пашня, ■ – пастбища.

радиоизотопов цезия и стронция близки к уровню глобальных радиоактивных выпадений, то возле Курской и Ленинградской атомных электростанций содержание в почвах ^{137}Cs гораздо выше и определяется аварийными выбросами Чернобыльской АЭС [14, 17]. Выделенные закономерности наглядно видны при сравнении современных уровней загрязнения почв сельскохозяйственных угодий радионуклидами в зонах влияния 4-х атомных электростанций (рис. 1). Для всех АЭС плотность загрязнения почв агроэкосистем ^{90}Sr варьирует в достаточно узких пределах – в среднем 0,9...1,6 kBq/m². Поверхностная активность в почвах сельскохозяйственных угодий ^{137}Cs , напротив, различается по атомным станциям до 5 раз и находится в диапазоне 2...17 kBq/m².

В 30-км зоне влияния Ленинградской АЭС в 1985 г. (до аварии на ЧАЭС) плотность загрязнения почв ^{137}Cs не превышала 3 kBq/m². В первый год после аварии (1986 г.) она возросла до 10 раз. На сегодняшний день (через 35 лет после аварии) уровни загрязнения почв ^{137}Cs значительно снизились из-за распада радионуклида, однако они все еще превышают доаварийный в 2...7 раз [17]. При этом участки агроэкосистем с максимальными уровнями загрязнения ^{137}Cs в районе Ленинградской АЭС нельзя отнести к радиоактивно загрязненным (более 37 kBq/m²).

Данные радиэкологического мониторинга свидетельствуют, что в районах размещения исследуемых АЭС содержание радиоизотопов наведенной активности (^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co и др.), а также ^{131}I и ^{134}Cs в почве агроэкосистем находится на уровнях ниже минимально детектируемых активностей.

Стабильность радиационной обстановки на сельскохозяйственных угодьях в районах атомных электростанций подтверждает низкий уровень мощности амбиентного экви-

валента дозы (МАЭД). Данные многолетнего мониторинга свидетельствуют, что в зоне влияния Белоярской атомной станции МАЭД варьирует в диапазоне 0,08...0,13 мкЗв/ч, в районе Курской АЭС – 0,11...0,15, в регионе Ленинградской АЭС – 0,09...0,15 и вблизи Ростовской АЭС на уровне 0,09...0,17 мкЗв/ч. Природный радиационный фон не превышает 0,3 мкЗв/ч.

Установлены некоторые отличия по плотностям загрязнения техногенными радионуклидами разных типов сельскохозяйственных угодий (см. рис. 1). Так, поверхностная активность в почвах лугопастбищных угодий ^{137}Cs и ^{90}Sr , как правило, в 1,1...1,6 раз выше, чем на пашне. Ежегодная перепашка почв приводит к перераспределению радионуклидов в корнеобитаемом слое и более интенсивной миграции радионуклидов.

Для оценки влияния атомных электростанций на поступление техногенных радионуклидов в агроэкосистемы проанализирована динамика их содержания в почве сельскохозяйственных угодий в районе расположения Ростовской АЭС, где вклад Чернобыльских выпадений, а также других предприятий ядерного топливного цикла минимальны (рис. 2).

За 20-летний период после запуска первого энергоблока ВВЭР содержание ^{90}Sr в почвах агроэкосистем зоны влияния Ростовской АЭС по данным мониторинга снижалось со скоростью, близкой к закону распада радионуклида как на пашне, так и на лугопастбищных угодьях (рис. 2, а). Таким образом, начало работы атомной станции в 2001 г. и ввод новых энергоблоков в 2010, 2014 и 2018 гг. не привели к значимому увеличению содержания ^{90}Sr в почвенном покрове сельскохозяйственных угодий. Уровни удельной активности в почве

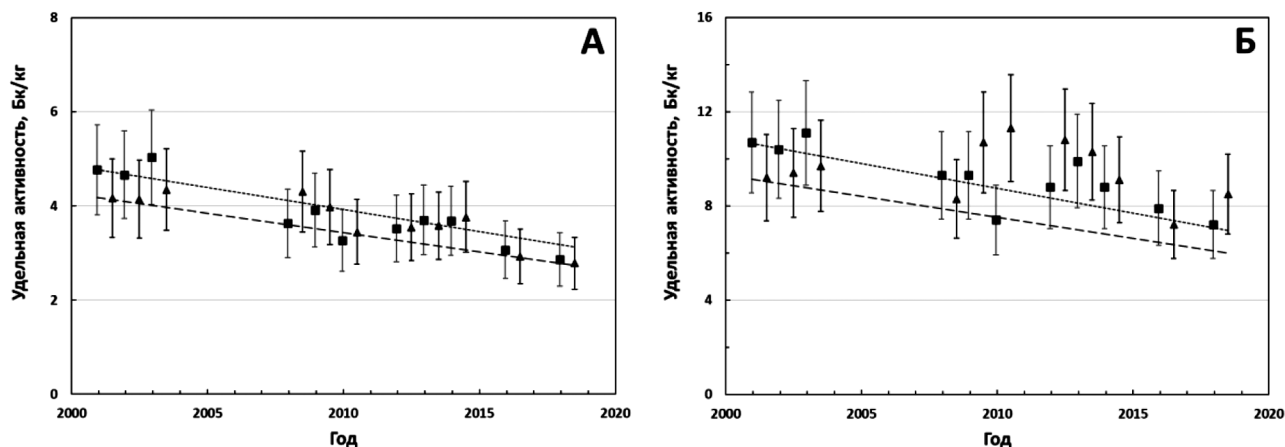


Рис. 2. Динамика удельной активности в почве сельскохозяйственных угодий 30-км зоны влияния Ростовской АЭС: А – ^{90}Sr и Б – ^{137}Cs (■ – данные мониторинга на пашне, ▲ – данные мониторинга на пастбищах, ----- – расчет распада на пашне, ---- – расчет распада на пастбищах).

Табл. 2. Удельная активность ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции в 30-км зоне влияния АЭС, Бк/кг(л)

Вид продукции (норматив)	Белоярская	Курская	Ленинградская	Ростовская
Продукция полеводства				
Зерно (60)	0,54* (0,15...0,84)	0,21 (0,04...0,50)	0,32 (0,14...0,71)	0,34 (0,17...0,90)
Картофель (80)	0,06 (0,03...0,09)	0,08 (0,01...0,48)	0,15 (0,07...0,43)	0,30 (0,11...0,91)
Корнеплоды (80)	0,07 (0,04...0,26)	0,09 (0,05...0,20)	0,34 (0,22...0,50)	0,19 (0,09...0,31)
Овощи (80)	0,06 (0,02...0,08)	0,07 (0,01...0,48)	0,22 (0,07...0,65)	0,12 (0,04...0,21)
Продукция кормопроизводства				
Сенаж (100)	1,83 (0,50...2,40)	2,11 (0,20...6,40)	2,43 (0,40...6,30)	1,72 (1,00...2,60)
Солома (400)	1,50 (0,70...3,90)	0,94 (0,20...3,70)	1,87 (0,88...4,50)	0,97 (0,62...1,78)
Продукция животноводства				
Молоко (100)	0,11 (0,06...0,20)	0,14 (0,02...0,30)	0,10 (0,02...0,21)	0,06 (0,01...0,16)
Говядина (200)	0,12 (0,08...0,15)	0,23 (0,22...0,23)	0,44 (0,33...0,54)	0,07
Свинина (200)	0,26 (0,06...0,45)	-	0,20 (0,19...0,21)	-
Птица (не нормируется)	0,21 (0,10...0,29)	0,04	-	-

* числитель – среднее, знаменатель – мин.-макс.

агрэкоэкоэстем ¹³⁷Cs значительнэ вариабельней, чем радиоэстроэция. Отмечено, что Ростовская АЭС вносит определеннэ вклад в поступление ¹³⁷Cs в окружающую среду. В то же время, это не приводит к достоверному повышению содержания радиоэотопа в почве, а лишь снижает темпы уменьшения его удельной активности путем распада (рис. 2, б). В большей степени такая закономерность характерна для лугопастбищных угодий, где агротехнические мероприятия отсутствуют.

Среди рассмотренных атомных электростанций, в несколько большей степени ¹³⁷Cs содержится в сельскохозяйственной продукции региона Ленинградской АЭС, что обусловлено повышенной плотностью загрязнения радиоэуклидом почвы (табл. 2). Для обеспечения радиационной безопасности населения в районах размещения атомных электростанций важно сравнить содержание техногенных радиоэуклидов в производимой вблизи АЭС сельскохозяйственной продукции с требованиями радиологических стандартов. Средняя удельная активность ¹³⁷Cs в продукции растениеводства из 30-км зон влияния АЭС варьирует в пределах 0,06...0,54 Бк/кг, а максимальные уровни содержания радиоэотопа в 67...160 раз ниже действующих радиологических нормативов [19, 20, 21].

Концентрация ¹³⁷Cs в кормах сельскохозяйственных животных выше, чем в урожае зерновых культур и овощей. Однако диапазон удельных активностей ¹³⁷Cs в продукции растениеводства определяет не только содержание радиоэуклида в почве, но и другие факторы: почвенные характеристики сельскохозяйственных угодий, видовые и сортовые особенности культур, объемы применения агроэелиорантов и др. Так, в районе Белоярской АЭС преобладают дерново-подзолистые почвы, рядом с Курской АЭС – типичные и выщелоченные черноземы, а также серые лесные почвы. В зоне влияния Ленинградской АЭС основу почвенного покро-

ва составляют дерново-подзолистые и дерново-карбонатные почвы, а вблизи Ростовской АЭС – каштановые и темно-каштановые почвы.

В продукции животноводства удельная активность ¹³⁷Cs также не превышает 0,5 Бк/кг(л), при этом максимальное содержание радиоэотопа в 330...440 раз ниже действующих нормативов СанПиН [19, 20].

Несмотря на меньшее содержание в почве, ⁹⁰Sr в ряде случаев накапливается в сельскохозяйственной продукции в большем количестве, чем ¹³⁷Cs (до 1,5...2,0 раз). Однако для региона Белоярской АЭС эта разница достигает 3...4 раз, что обусловлено близостью ВУРСа и повышенным содержанием радиоэстроэция в почве ряда участков агроэкоэстем (табл. 3). Как и радиоэотопо цезия, ⁹⁰Sr в большей степени содержится в кормах сельскохозяйственных животных, чем в урожае зерновых культур и овощей, что определяется биологическими особенностями растений. В целом, максимальные уровни удельной активности ⁹⁰Sr в растениеводческой продукции из 30-км зон влияния АЭС в 10...40 раз ниже санитарно-гигиенических радиологических нормативов, а для молока такая разница составляет 60 раз. В мясе и птице радиоэстроэций не нормируется.

На примере Курской АЭС показано, что с пищевыми продуктами местного производства в рацион питания населения поступает не более 70 Бк/год ⁹⁰Sr и 200 Бк/год ¹³⁷Cs. Это составляет менее 1 % от пределов годового поступления этих радиоэотопопов в организм человека согласно требованиям (НРБ-99/2009) [14]. Таким образом, вклад в формирование доз внутреннегэ облучения населения от ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в составе продуктов питания ничтожно мал.

Необходимо отметить, что на формирование дозовых нагрузок на человека от выбросов АЭС помимо известных и хорошо контролируемых ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs оказывают влияние и другие радиоэотопопы. Так, в последние годы существенно

Табл. 3. Удельная активность ⁹⁰Sr в сельскохозяйственной продукции в 30-км зоне влияния АЭС, Бк/кг(л)

Вид продукции (норматив)	Белоярская	Курская	Ленинградская	Ростовская
Продукция полеводства				
Зерно (не нормируется)	1,57* (1,03...2,80)	0,28 (0,12...0,99)	0,53 (0,41...0,68)	0,16 (0,11...0,27)
Картофель (40)	0,22 (0,08...0,36)	0,05 (0,02...0,08)	0,61 (0,44...0,99)	0,15 (0,06...0,28)
Корнеплоды (40)	0,23 (0,16...0,84)	0,14 (0,05...0,23)	0,91 (0,33...2,09)	0,21 (0,07...0,91)
Овощи (40)	0,17 (0,05...0,61)	0,09 (0,02...0,15)	1,22 (0,28...4,27)	0,07 (0,01...0,17)
Продукция кормопроизводства				
Сенаж (50)	1,78 (1,24...3,51)	1,53 (0,22...4,90)	0,72 (0,60...1,20)	1,21 (0,56...2,30)
Солома (180)	3,12 (2,34...3,60)	0,82 (0,51...3,4)	0,94 (0,85...1,4)	1,34 (0,67...1,71)
Продукция животноводства				
Молоко (25)	0,33 (0,18...0,41)	0,02 (0,01...0,05)	0,04 (0,01...0,08)	0,02 (0,01...0,06)
Говядина (не нормируется)	2,42 (2,10...2,60)	0,08 (0,02...0,14)	–	0,02
Свинина (не нормируется)	0,18 (0,14...0,28)	–	0,38	–
Птица (не нормируется)	0,21 (0,10...0,29)	0,04	–	–

* числитель – среднее, знаменатель – мин.-макс.

возрос интерес к определению накопления в продуктах питания таких малоизученных, но не менее радиологически важных радионуклидов, как ³H и ¹⁴C [7, 25]. Они присутствуют в составе выбросов всех типов реакторов российских АЭС и в ряде случаев могут вносить существенный (до 60...80 %) вклад в дозу облучения человека [22]. Тритий и радиоуглерод достаточно слабо удерживаются фильтрующими установками АЭС. Поступая в атмосферу, они активно мигрируют в природных средах, включаясь в пищевые цепи. Будучи биофильными радионуклидами, ³H и ¹⁴C способны легко проникать в клетки и генные структуры, повышая риск мутагенных нарушений в организме человека.

Табл. 4. Удельная активность ³H и ¹⁴C в сельскохозяйственной продукции в 30-км зоне влияния АЭС, Бк/кг(л)

Вид продукции	Белоярская		Ленинградская	
	³ H	¹⁴ C	³ H	¹⁴ C
Продукция полеводства				
Зерно	71,9* (40,2...85,0)	56,7 (34,2...69,3)	98	–
Картофель	28,3 (18,4...38,2)	18,5 (12,4...24,6)	29,3 (4,1...80,2)	84,6 (36,3...118,1)
Овощи	5,9 (3,2...8,7)	5,7 (4,1...8,0)	15,4 (5,7...40,2)	8,4 (5,4...11,0)
Продукция кормопроизводства				
Сенаж	193,0 (170,0...216,0)	108,0 (100,0...116,0)	31,2	65
Солома	–	–	92,2	95,4 (74,0...116,7)
Продукция животноводства				
Молоко	10,4 (9,5...11,3)	95,1 (57,6...132,6)	13,6 (3,1...34,0)	27,1 (5,4...51,0)

* числитель – среднее, знаменатель – мин.-макс.

Результаты исследования отдельных видов сельскохозяйственной продукции и пищевой продукции, производящейся в районах размещения Белоярской и Ленинградской АЭС, свидетельствуют о схожем характере накопления радиоизотопов ³H и ¹⁴C в аграрных продуктах из регионов обеих атомных электростанций (табл. 4).

По степени снижения удельной активности ³H и ¹⁴C, сельскохозяйственную продукцию можно расположить в следующий ряд: солома ≥ сенаж > зерно > картофель > молоко > овощи. Оценка вклада трития и радиоуглерода в дозоформирование населения – сложная методическая задача, начиная с методов определения форм радиоизотопов в пищевой продукции (например, органически связанный тритий и тритиевая вода) до верификации моделей оценок дозовых нагрузок на человека, учитывающих весь комплекс процессов миграции радионуклидов в экосистемах и по пищевым цепям. Поэтому необходимо совершенствование методов контроля ³H и ¹⁴C в сельскохозяйственной и пищевой продукции, производящейся в районах размещения АЭС, с учетом типов реакторных установок, режимов их эксплуатации и природно-климатических условий.

Таким образом, результаты мониторинговых исследований по оценке радиационной обстановки в сельском хозяйстве в районах расположения типичных российских АЭС свидетельствуют, что многолетняя работа атомных электростанций с разными типами энергоблоков не оказывает негативного влияния на агроферу и дополнительное облучение населения в 30-км зонах их влияния. МАЭД на пашне и лугопастбищных угодьях стабильно находится в пределах 0,08...0,17 мкЗв/час и не превышает природного радиационного фона (до 0,3 мкЗв/ч).

Эксплуатация атомных электростанций в технологически штатном режиме не приводит к значимому накоплению радиологически важных радионуклидов (⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs) в почвах агроценозов. За весь период многолетних

наблюдений не было обнаружено участков агроэкосистем с превышением минимально установленной границы зон радиоактивного загрязнения (37 кБк/м² по ¹³⁷Cs).

Повышенные уровни содержания техногенных радионуклидов в почвенном покрове сельскохозяйственных угодий, в районах расположения ряда атомных станций, обусловлены не их многолетней работой, а загрязнением, сформировавшимся после крупных радиационных аварий и, частично, в результате «радиационного наследия», включая испытания ядерного оружия и прошлую деятельность предприятий ЯТЦ.

Весь спектр производимой в районах размещения АЭС сельскохозяйственной и пищевой продукции (растениеводства и животноводства) полностью отвечает действующим радиологическим стандартам, а максимальные удельные активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в ней на 1...2 порядка ниже уровней вмешательства радиологических нормативов.

Необходимо продолжение радиоэкологического мониторинга агроферы в зонах влияния атомных электростанций, а также расширение спектра исследуемых радиологически значимых радионуклидов (³H, ¹⁴C, ²³⁹,²⁴⁰Pu и др.), изучение закономерностей их миграции по пищевым цепям и влияния на формирование доз облучения человека.

Литература

1. Alexakhin R.M. Topical environmental problems of nuclear power // *Atomic Energy*. 2013. Vol. 114. No. 5. 301–307.
2. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No. GSR. Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.
3. Вероятность получения молока и кормов, не соответствующих допустимым уровням содержанию ¹³⁷Cs на территории юго-запада Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС / Н.М. Беловус, П.В. Прудников, А.М. Щеглов и др. // *Радиация и Риск*. 2019. Т. 28. № 3. С. 36–46.
4. Мерзлова О.А. Прогноз возможности возврата в сельскохозяйственный оборот земель Могилевской области Республики Беларусь, выведенных в связи с высоким радиоактивным загрязнением // *Радиация и Риск*. 2021. Т. 30. № 3. С. 21–31.
5. Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. IAEA TECDOC No. 1927. Vienna: IAEA, 2020. 358 p.
6. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: Издат, 2010. 496 с.
7. Environmental radiation safety assessment in the control area at nuclear facilities / I.I. Kryshch, N.N. Pavlova, T.G. Sazykina, et al. // *Atomic Energy*. 2021. Vol. 130. No. 2. 119–125.
8. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region / U. Lee, C. Lee, M. Kim, et al. // *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51. P. 1626–1632.
9. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2003–2020 годы. Ежегодники Росгидромета. Обнинск: НПО «Тайфун».
10. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. RS-G-1.8. Vienna: IAEA, 2005. 119 p.
11. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. Safety Reports Series No. 64. Vienna: IAEA, 2010. 234 p.
12. Основы радиоэкологического и гигиенического мониторинга окружающей среды / И.П. Коренков, Т.Н. Лазарева, Н.К. Шандала и др. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. 400 с.
13. Djingova R., Kuleff I. Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002. Vol. 59. P. 61–73.
14. Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС / В.К. Кузнецов, А.В. Панов, Н.И. Санжарова и др. // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13. №2. С. 19–30.
15. Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований / А.В. Панов, Н.Н. Исамов, В.К. Кузнецов // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12. №2 (специальный выпуск). С. 54–65.
16. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трапезников, В.К. Кузнецов и др. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. №3. С. 146–157.
17. Анализ результатов радиоэкологического мониторинга в регионе размещения Ленинградской АЭС / В.К. Кузнецов, П.Н. Цыганцев, Н.И. Санжарова и др. // *Радиация и Риск*. 2021. Т. 30. №2. С. 89–100.
18. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. МУ 13.5.13-00. М.: Изд-во РАСХН, 2000. 28 с.
19. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: ФГУП «ИнтерСЭН», 2002. 168 с.
20. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.2650-10. (Дополнения и изменения № 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01). М.: Минздрав РФ, 2010. 13 с.
21. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06-01 // *Ветеринарная патология*. 2002. № 4. С. 44–45.
22. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases / M. Vasyanovich, A. Vasilyev, A. Ekinin et al. // *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51. P. 1176–1179.
23. Итоги многолетнего мониторинга трансграничного воздушного переноса техногенных радионуклидов на территорию Свердловской области с объектов ядерного топливного цикла, расположенных в Челябинской области / В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, А.В. Трапезников и др. // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2017. №1. С. 84–93.
24. Оценка радиоэкологической обстановки на территориях аварийного Чернобыльского следа в России (1986–2020) / И.И. Крышев, А.А. Бурякова, Т.Г. Сазыкина // *Радиация и Риск*. 2021. Т. 30. №2. С. 25–37.
25. Korolevych V.Y., Kim S.B., Davis P.A. OBT/HTO ratio in agricultural produce subject to routine atmospheric releases of tritium // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 129. P. 157–168.

Поступила в редакцию 22.11.2021
После доработки 15.12.2021
Принята к публикации 20.01.2022