DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-89-100

УДК 614.876:621.039.5(470.23)

Анализ результатов радиоэкологического мониторинга в регионе размещения Ленинградской АЭС

Кузнецов В.К., Цыгвинцев П.Н., Санжарова Н.И., Панов А.В.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, Обнинск

Представлены данные многолетних наблюдений за влиянием Ленинградской АЭС на радиоэкологическую обстановку в регионе размещения станции. Учитывая роль радиоактивных выпадений после аварии на Чернобыльской АЭС в изменении радиационной ситуации в районе Ленинградской АЭС, выделено три периода мониторинговых исследований: доаварийный (1980-1985 гг.), ближний послеаварийный (1986-1992 гг.) и отдалённый период (2013-2014 гг.). На примере контрольных участков в 30-км зоне наблюдения Ленинградской АЭС показано, что в 1985 г. плотность загрязнения ^{137}Cs почв не превышала 3 кБк/м². В 1986 г. после аварии на ЧАЭС она выросла в 10 раз. К 2013 г. уровни загрязнения почв ^{137}Cs значительно снизились, однако ещё превышали аналогичные показатели доаварийного периода в 2,6-7,3 раза. Плотность загрязнения почв ^{90}Sr в 1985-1992 гг. составляла 1,4-1,6 кБк/м² и после аварии на ЧАЭС существенно не изменилась. Содержание техногенных радионуклидов в сельскохозяйственной продукции в 1985 г. было обусловлено глобальными выпадениями, а радионуклиды выбросов Ленинградской АЭС не обнаруживались. В 1986 г. среднее содержание ^{137}Cs в зерновых и пропашных культурах в 19-44 раза превышало аналогичные показатели доаварийного периода и определялось аэральным загрязнением растений. К настоящему времени содержание ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции все ещё выше значений, отмеченных до аварии на ЧАЭС в 1,4-2,1 раза, однако они в 300 и более раз ниже действующих радиологических нормативов. Из всех местных продуктов питания в районе Ленинградской АЭС превышение нормативов отмечено только в отдельных случаях для дикорастущих ягод, собранных в заболоченных лесах при плотностях загрязнения ^{137}Cs 3-9 кБк/м². Оценена динамика коэффициентов перехода ^{90}Sr и ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию в зоне воздействия Ленинградской АЭС. Показано влияние на этот показатель почвенных характеристик и чернобыльских выпадений. Отмечено, что эксплуатация Ленинградской АЭС в штатном режиме не оказывает существенного влияния на радиационную обстановку в 30-км зоне вокруг станции.

Ключевые слова: ЛАЭС, радиационно-экологический мониторинг, радиационная безопасность, радионуклиды, плотность загрязнения, сельскохозяйственная продукция, продукты питания, наземные экосистемы, аграрные экосистемы, коэффициенты перехода.

Введение

Многолетний мировой опыт эксплуатации атомных электростанций в нормальном режиме работы не выявил отрицательного воздействия АЭС на человека и окружающую среду. Однако даже в условиях штатной работы атомных электростанций выброс газообразных и сброс жидких отходов могут привести к аккумуляции радионуклидов в отдельных звеньях трофических цепочек, что может повлиять на формирование дополнительных дозовых нагрузок на население. Сельскохозяйственная продукция, производимая в регионе размещения АЭС, во всех случаях является одним из основных источников поступления радионуклидов в организм человека, проживающего на территориях, прилегающих к атомным электростанциям. При этом особое внимание к агроэкосистемам, как объекту воздействия предприятий ядерной энергетики, связано со строительством АЭС в районах интенсивного ведения агропромышленного производства. В связи с многообразием почвенно-климатических условий, спецификой ведения АПК и особенностями пищевого рациона населения критические звенья сельскохозяйственных цепочек могут

Кузнецов В.К. – гл. науч. сотр., д.б.н.; Цыгвинцев П.Н. – вед. науч. сотр., к.б.н.; Санжарова Н.И. – директор, д.б.н., проф., чл.-корр. РАН; Панов А.В.* – зам. директора, д.б.н., проф. РАН. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

*Контакты: 249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км. Тел. (484) 399-69-59; e-mail: riar@mail.ru.

отличаться для разных регионов страны. Особенности воздействия АЭС на сферу сельского хозяйства и важность их последствий для обеспечения безопасного проживания населения ставят задачи организации системы радиационно-экологического мониторинга агроэкосистем, которая должна дать необходимую информацию для оценки последствий эксплуатации АЭС. Радиоэкологический мониторинг аграрных экосистем в зоне воздействия атомных станций является частью комплексного мониторинга всех сред, проводимого на этих территориях, на основе которого принимаются решения по оздоровлению экологической обстановки в регионе размещения АЭС [1]. В число основных задач радиоэкологического мониторинга агроэкосистем входит оценка уровней радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель и продукции [2, 3].

Северо-западный регион России является одним из самых насыщенных в нашей стране по количеству размещённых радиационно-опасных объектов, что определяет особое отношение к степени их воздействия на компоненты окружающей среды, включая агроэкосистемы. Одним из таких объектов является Ленинградская АЭС (ЛАЭС). Территория ЛАЭС занимает площадь более 5 км² и расположена в промышленной зоне в 4 км от г. Сосновый Бор и в 2 км от побережья Копорской губы Финского залива. АЭС состоит из 6 энергоблоков, из которых 4 – типа РБМК-1000 (годы пуска: 1973, 1975, 1979, 1981). Наиболее старый из них в конце 2018 г. выведен из эксплуатации. Для сохранения и развития производства электрической и тепловой энергии и замещения действующих мощностей ЛАЭС построены 2 более совершенных энергоблока ВВЭР-1200 общей мощностью свыше 2 ГВт. Первый из них в 2018 г. введён в эксплуатацию. Радиус санитарно-защитной зоны ЛАЭС составляет 1,5 км, зоны наблюдения – 17 км. В зоне наблюдения проживает около 70 тыс. человек, а наиболее крупными населёнными пунктами являются г. Сосновый Бор и п. Лебяжье [4, 5].

В регионе размещения ЛАЭС основными источниками техногенных радионуклидов в окружающей среде являются: газоаэрозольные выбросы атомной станции, а также глобальные и чернобыльские выпадения радиоактивных веществ. Основным путём поступления радионуклидов в окружающую среду с выбросами в атмосферу на ЛАЭС являются вентиляционные трубы станции. В состав газоаэрозольных выбросов входят инертные радиоактивные газы (ИРГ), долгоживущие (ДЖН) и короткоживущие (КЖН) радионуклиды. В выбросах ИРГ ЛАЭС в основном присутствуют изотопы ксенона и криптона. Из долгоживущих радионуклидов в составе выбросов регистрируются ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ^{58,60}Co, ⁵⁹Fe, ⁵⁴Mn, ⁶⁵Zn, ⁵¹Cr. В течение 1980-1985 гг. выбросы ИРГ в среднем составляли 30%, ДЖН – 1,5% и КЖН – 30% от допустимых выбросов (ДВ) [6]. В 2018 г. выбросы по контролируемым радионуклидам оставались на уровне значительно ниже допустимых: 10,2% от ДВ для ИРГ; 12,4% – для ⁶⁰Co; 4,2% – для ¹³⁴Cs; 2,5% – для ¹³⁷Cs; менее 1% – для ¹³¹I; менее 0,001% – для ³H [5].

Основными радионуклидами, поступившими в окружающую среду после испытаний ядерного оружия, стали ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr при их соотношении – 1,6. В 1982-1985 гг. уровни глобальных выпадений в регионе ЛАЭС характеризовались минимальными значениями с начала испытаний [7]. В результате аварии на Чернобыльской АЭС в апреле-мае 1986 г. на квадратный километр площади водосборного бассейна Копорской губы поступило в среднем около 8,5 ГБк долгоживущего ¹³⁷Cs. Удельная активность данного радионуклида в депонирующих звеньях экосистем (почва, сельскохозяйственная продукция, продукты питания местного производства, мох, грибы, донные отложения, рыба) в настоящее время превышает уровни 1985 г. [6]. Вместе с тем исследования, проведённые с 1987 по 2016 гг. ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, не выявили превышений допус-

тимых уровней по содержанию ^{137}Cs в пищевых продуктах и продовольственном сырье местного производства. В то же время в дикорастущей продукции периодически обнаруживались превышения нормативов по ^{137}Cs [8]. В 1985 и 1998 гг. при работе объектов ядерного комплекса в г. Сосновый Бор в штатном режиме эффективная доза для населения находилась на уровне 0,02-0,05 мЗв/год. При этом в 1998 г. дозовая нагрузка на население снизилась до 0,02 мЗв/год и определялась, главным образом, потреблением местных продуктов питания, загрязнённых ^{137}Cs «чернобыльского происхождения» [9].

Целью работы является анализ данных многолетних наблюдений за уровнями радиоактивного загрязнения компонентов наземных (преимущественно аграрных) экосистем в регионе размещения Ленинградской АЭС, выявление тенденций возможного негативного воздействия атомной станции на окружающую среду и установление закономерностей поведения радионуклидов в различных почвенных и хозяйственных условиях на исследуемой территории.

Материалы и методы

Изучение накопления радионуклидов в объектах окружающей среды в зоне воздействия ЛАЭС проводилось с начала 80-х годов специалистами ФГБНУ ВНИИРАЭ (ранее ВНИИСХР) совместно с лабораторией радиационного мониторинга Радиевого института им. В.Г. Хлопина. Учитывая существенный вклад в радиационную обстановку данного региона от аварии на Чернобыльской АЭС, все мониторинговые исследования можно условно разделить на три периода: доаварийный (1980-1985 гг.), ближний послеаварийный (1986-1992 гг.) и отдалённый периоды (2013-2014 гг.) после аварии на ЧАЭС.

Контрольная сеть радиозоологического мониторинга агроэкосистем создавалась согласно требованиям и рекомендациям [2, 3] на основе данных обследования 15- и 30-км зон влияния ЛАЭС с учётом возможного воздействия источника загрязнения, «розы ветров» в весенне-летний период (период вегетации сельскохозяйственных культур и пастбищного содержания животных), структуры землепользования, характеристик почвенного покрова, вида угодий (пашня, пастбище, луг, залежь и др.) и отраслей сельскохозяйственного производства (растениеводство или животноводство). При организации сети мониторинга агроэкосистем использовалась картографическая основа хозяйств, входящих в зону наблюдения ЛАЭС. Контрольные участки выбирались таким образом, чтобы ежегодно на преобладающих типах почв отбирать образцы основных возделываемых сельскохозяйственных культур и продукции. Объектами мониторинга являлись: почва, сельскохозяйственные растения (сопряжённые с отбором почв), молоко, мясо и корма сельскохозяйственных животных. На частных подворьях и садовых участках, расположенных в зоне наблюдения ЛАЭС, отбирались пробы овощных культур, мяса и молока. На контрольных участках, расположенных на пашне, отбирался пахотный горизонт (0-20 см), а на лугах и пастбищах верхний слой почвы глубиной 10 см. Отобранная при мониторинге продукция растениеводства разделялась на хозяйственно-ценную (зерно, клубне- и корнеплоды, овощи) и побочную часть продукции (солома и др.). Дополнительно на территории лесных массивов и заболоченных участков вёлся отбор проб дикорастущих грибов и ягод. Во всех отобранных образцах определяли содержание естественных (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и наиболее радиологически значимых техногенных (^{90}Sr , ^{137}Cs) радионуклидов. Для анализа содержания радионуклидов использовали высокочувствительные спектрометрические и радиометрические комплексы. Гамма-излучающие радионуклиды определяли на спектрометре ГАММА-1П с полупроводниковыми детекторами из особо

чистого германия и многоканальном гамма-спектрометре CANBERRA. ^{90}Sr из проб выделяли радиохимическим способом. Измерения проводили на альфа-бета радиометре с кремниевым детектором УМФ-2000. Относительная погрешность измерений активности радионуклидов составляла не более 30% в зависимости от используемого прибора и метода измерения. Одновременно с отбором почвенных образцов проводились измерения МАЭД гамма-излучения дозиметром ДРГ-01Т и на различном расстоянии от ЛАЭС с использованием дозиметра МКС-01 «Сталкер» (в 2013 г.), установленного на транспортном средстве и регистрацией мощности дозы по маршруту движения. Направления от станции определялись в соответствии с масштабом съёмки обследуемой территории, технической возможностью и местными условиями. Таким образом, сформированная сеть наблюдений учитывала как почвенные и ландшафтные особенности территории, так и специфику ведения сельского хозяйства.

Район размещения Ленинградской АЭС характеризуется интенсивным ведением агропромышленного производства. В 30-км зоне ЛАЭС (по состоянию на 2013-2014 гг.) расположены несколько крупных хозяйств, относящихся к 3 районам Ленинградской области: все земли ЗАО «Копорье» (Ломоносовский район), частично угодья ЗАО «Котельское» (Кингисеппский район) и ЗАО «Гомонтово» (Волосовский район). В структуре их землепользования более 50% занимают пашня и кормовые угодья. Почвенный покров сельскохозяйственных земель в пределах 30-км зоны влияния ЛАЭС представлен более чем 10 разновидностями трёх типов почвообразования: подзолистого, дернового и торфяного (табл. 1). Преобладающие дерново-подзолистые почвы занимают 65,7% сельхозугодий. В ЗАО «Копорье» на долю дерново-подзолистых почв приходится до 70%, а дерново-карбонатных – 22%, в ЗАО «Гомонтово» карбонатных почв 49%, а в ЗАО «Котельское» они отсутствуют [10].

Таблица 1

Структура почвенного покрова в 30-км зоне Ленинградской АЭС, %

Группа почв	Район			% от общей площади
	Ломоносовский	Волосовский	Кингисеппский	
Дерново-слабоподзолистая	28,9	51,0	23,0	35,7
Дерново-среднеподзолистая	17,8	1,5	37,7	16,0
Дерново-подзолистая глеевая	20,3	-	23,5	14,0
Дерново-карбонатная насыщенная	11,8	19,4	-	12,1
Дерново-карбонатная выщелоченная	5,1	21,7	-	10,0
Дерново-карбонатная оподзоленная	8,0	6,4	-	5,5
Дерново-подзолистая	4,9	-	9,4	4,1
Пойменная дерново-глеевая	1,5	-	6,2	1,9
Торфяно-подзолистая глеевая	1,2	-	-	0,6
Дерново-карбонатная глеевая	0,5	-	-	<0,1
Пойменная дерновая	-	-	0,2	<0,1

Все три хозяйства имеют мясомолочное направление производства и собственную кормовую базу; выращивают корне-клубнеплоды и многолетние травы, а среди зерновых культур преобладают яровые колосовые (овёс, ячмень) и озимые (рожь). Помимо приусадебных участков в населённых пунктах значительная часть сельскохозяйственной продукции для личного потребления производится местными жителями в 54 садоводческих товариществах.

К природно-климатическим особенностям региона ЛАЭС можно отнести:

- преобладание в вегетационный период ветров, способствующих переносу газоаэрозольных выбросов ЛАЭС в сторону сельскохозяйственных угодий;

- расположение сельхозугодий на отрогах Семейской возвышенности, высота которой соизмерима с высотой вентиляционных труб энергоблоков ЛАЭС;
- высокая комплексность почвенного покрова;
- климат в районе расположения сельскохозяйственных угодий, характеризуется большим количеством осадков и коротким вегетационным периодом.

Результаты

Анализ данных многолетних наблюдений показал, что радиоактивность почв сельскохозяйственных угодий в регионе размещения ЛАЭС обусловлена как естественными, так и техногенными радионуклидами, среди которых наиболее значимыми являются долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs . Необходимо отметить, что уровни содержания в почве данных радионуклидов менялись во времени и, главным образом, на это повлияла авария на Чернобыльской АЭС.

До аварии на ЧАЭС (1985 г.) для оценки пространственной неоднородности загрязнения почв ^{137}Cs в зоне влияния Ленинградской АЭС обследования проводились в пределах одного поля, хозяйства и 30-км зоны наблюдения в целом. Содержание ^{137}Cs в почвенном покрове на уровне одного поля исследовано на примере окультуренного пастбища, где был отобран 21 почвенный образец. Плотность загрязнения ^{137}Cs составила $1,97 \pm 0,33$ кБк/м². В пределах хозяйства данный показатель был оценен на примере совхоза «Копорье», где было отобрано 103 почвенных образца. Средняя плотность загрязнения всех сельскохозяйственных угодий хозяйства была $2,78 \pm 0,78$ кБк/м². Плотность загрязнения почв ^{137}Cs в 30-км зоне влияния ЛАЭС, определённая для 3-х хозяйств, составила $2,95 \pm 0,63$ кБк/м². Распределение значений плотности загрязнения почв ^{137}Cs в пределах поля, хозяйства и 30-км зоны подчинялось логнормальному закону, что указывало на однородный характер выпадения радионуклидов техногенного происхождения [10].

Продолжение мониторинга в районе ЛАЭС показало влияние аварийного чернобыльского выброса на изменение радиационной обстановки в регионе размещения станции. Летом 1986 г. средняя плотность загрязнения сельскохозяйственных угодий ^{137}Cs в исследуемых хозяйствах увеличилась до $30,3 \pm 2,4$ кБк/м², т.е. в 10 раз по сравнению с доаварийным периодом. Плотность загрязнения почв сельскохозяйственных угодий ^{90}Sr в 1985-1992 гг. составляла 1,38-1,62 кБк/м² и после аварии на ЧАЭС значительно не изменилась [10].

Результаты измерения содержания радионуклидов в пробах почвы 9 контрольных участков (КУ) в 2013 г. позволили оценить плотности загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий исследуемых хозяйств (табл. 2). Уровни загрязнения почв ^{137}Cs , обусловленные чернобыльскими выпадениями, в 2,6-7,3 раза превысили средние значения по хозяйствам в доаварийный период и составили для ЗАО «Копорье» 7,7-14,8 кБк/м², для ЗАО «Котельское» – 19,8-21,5 кБк/м², а для ЗАО «Гомонтово» – в среднем 21,6 кБк/м². При этом не было отмечено достоверной разницы в уровнях загрязнения ^{137}Cs почвы участков на различном удалении от ЛАЭС. Содержание естественных радионуклидов в почвах сельскохозяйственных угодий региона ЛАЭС остаётся стабильным в течение многих лет и составляет для ^{40}K 750-990 Бк/кг, для ^{226}Ra 25-57 Бк/кг, для ^{232}Th 34-46 Бк/кг, что соответствует среднероссийским показателям [11]. Наименьшая удельная активность ^{226}Ra и ^{232}Th отмечена для супесчаной почвы СНТ «Строитель», а более высокие значения – для суглинистой почвы трёх хозяйств.

Таблица 2

**Удельная активность радионуклидов в почве сельскохозяйственных угодий
зоны наблюдения Ленинградской АЭС в 2013 г., Бк/кг**

№ КУ	Хозяйство	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs
1	ЗАО «Копорье»	989±105	27,2±6,5	37,6±7,7	64,3±8,7
2		937±157	28,4±5,1	42,4±7,6	33,4±4,8
3		850±143	25,3±4,9	36,1±5,4	39,8±5,7
4		911±160	28,8±4,5	37,9±9,3	45,8±6,9
5		934±159	27,5±4,7	39,6±4,5	38,2±5,7
6		898±150	31±3,8	41,3±7,9	52,7±7,3
7	ЗАО «Котельское»	663±174	56,8±14,3	40,7±13,4	93,4±16
8		752±215	33,4±13,5	45,9±17,1	86,1±16,7
9	ЗАО «Гомонтово»	841±198	33±11	34±12,6	92,3±14,9
По данным работы [11]		100-1400	1-76	2-79	-

Измерения МАЭД на территории 30-км зоны ЛАЭС не выявили достоверных различий в величине мощности дозы (табл. 3). Наблюдалось незначительное (до 10%) увеличение средних значений МАЭД в южном и юго-западном направлениях на расстоянии свыше 20 км от ЛАЭС, что обусловлено как геофизическим фактором (повышенное содержание естественных радионуклидов на Ижорской возвышенности), так и чернобыльским следом. Из данных табл. 3 видно, что уровень МАЭД на территории в радиусе 30 км от ЛАЭС находился в пределах 0,09-0,15 мкЗв/ч. Данный диапазон соответствует изменчивости радиационного фона с учётом чернобыльских выпадений и не превышает нормативных значений (ОСПОРБ-99/2010). Схожие результаты измерений МАЭД для исследуемого региона получены в 2018 г. в рамках ЕГАСМРО [5].

Таблица 3

МАЭД на различном расстоянии от Ленинградской АЭС в 2013 г., мкЗв/ч

Расстояние от ЛАЭС, км	Среднее	Минимальная	Максимальная
1-3	0,12	0,09	0,14
3-5	0,11	0,10	0,12
5-10	0,12	0,09	0,14
10-15	0,12	0,09	0,15
15-30	0,11	0,09	0,14
>30	0,11	0,08	0,14
По данным работы [5]	0,11	0,10	0,23

Накопление радионуклидов сельскохозяйственными культурами зависит от свойств радиоизотопов, типов почв, биологических особенностей растений и технологий их возделывания. Так, содержание техногенных радионуклидов в сельскохозяйственной продукции в 1985 г. было обусловлено глобальными выпадениями, на фоне которых радиоизотопы в составе газоаэрозольных выбросов ЛАЭС зафиксировать не удалось. Не было также отличий в содержании радионуклидов в травостое на участках с различным удалением от ЛАЭС. В 1986 г. удельная активность ¹³⁷Cs в сельскохозяйственных культурах была значительно выше, чем в предыдущие годы наблюдений и составила в период уборки урожая для трав 31,8-165 Бк/кг, для зерновых – 2,1-4,2 Бк/кг, для картофеля и корнеплодов – 2,1-7,5 Бк/кг. Среднее содержание ¹³⁷Cs в зерновых и пропашных культурах в 19-44 раза превышало аналогичные показатели доаварийного периода [10]. При этом накопление ¹³⁷Cs в растениях часто не зависело от типа почв, что указывает на влияние аэраль-ного пути загрязнения (табл. 4).

Таблица 4

Содержание радионуклидов в основных продуктах питания, производящихся в зоне наблюдения Ленинградской АЭС, в разные годы исследований, Бк/кг(л)

Вид пищевой продукции	1985 г.		1986 г.	2013-2014 гг.		2018 г. по данным [5]
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Зерно	0,15	0,30	3,3* 2,1-4,2	0,32 0,14-0,71	0,53 0,41-0,68	-
Картофель	0,11	0,15	2,1 1,1-2,6	0,15 0,07-0,43	0,61 0,44-0,99	<0,4
Корнеплоды	0,17	0,17	7,5 3,1-9,3	0,34 0,22-0,50	0,91 0,33-2,09	<0,4
Листовые овощи	-	-	-	0,22 0,07-0,65	1,22 0,28-4,27	-
Молоко	0,15	0,05	-	0,10 0,02-0,21	0,04 0,01-0,08	<0,6
Мясо (говядина)	-	-	-	0,44 0,33-0,54	-	<0,7
Мясо (свинина)	-	-	-	0,20 0,19-0,21	0,38	<0,7
Грибы лесные	-	-	-	125,6 11,9-405,8	-	2,5-3,2
Ягоды лесные	-	-	-	168,5 5,0-712,0	-	6,4-7,0
Ягоды садовые	-	-	-	0,25 0,2-0,3	0,28 0,27-0,29	-

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

В 1985-1992 гг. содержание ⁹⁰Sr в зерновых культурах колебалось в диапазоне 0,18-0,92 Бк/кг воздушно-сухого веса, в корнеплодах – 0,15-0,48 и в картофеле – 0,07-0,9 Бк/кг сырого веса. Концентрация ⁹⁰Sr в травостое в этот период варьировала от 0,89 до 10,1 Бк/кг в зависимости от вида растений и типа почв, а содержание ⁹⁰Sr в молоке составляло 0,02-0,08 Бк/л [10].

Результаты мониторинга 2013-2014 гг. показали, что содержание ¹³⁷Cs в молоке не превышает 0,2 Бк/л, а ⁹⁰Sr – 0,08 Бк/л, что ниже действующих нормативов СанПиН более чем в 300 раз по обоим рассматриваемым радионуклидам. Удельная активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в сене и кормовых травах находится в пределах 0,4-6,3 Бк/кг и 0,6-1,2 Бк/кг соответственно. В зерне содержание ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr отмечено на уровне 0,14-0,71 Бк/кг и 0,41-0,68 Бк/кг соответственно. В целом, во всех пробах сельскохозяйственной продукции концентрация ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr была во много раз ниже действующих радиологических стандартов. В тоже время, по данным мониторинга последних лет видно, что среднее содержание ¹³⁷Cs в урожае сельскохозяйственных культур в 1,4-2,1 раза выше значений, зафиксированных до аварии на ЧАЭС. Из всех продуктов рациона питания населения превышение нормативов, установленных в СанПин, отмечено в отдельных случаях только для дикорастущих ягод: черники, собранной в заболоченном лесу при плотности загрязнения ¹³⁷Cs около 9 кБк/м², и морошки при плотности загрязнения этим радионуклидом выше 3 кБк/м². Мониторинг продуктов питания в зоне влияния ЛАЭС в 2018 г., по данным работы [5], показал по сельскохозяйственным продуктам схожие результаты, а отличия по содержанию ¹³⁷Cs в грибах и ягодах связаны, по всей видимости, с местом отбора проб, что в значительной степени влияет на содержание радионуклидов в природной продукции (табл. 4).

Для оценки перехода радионуклидов из почвы в сельскохозяйственные растения широко используют коэффициенты перехода (Кп) – отношение концентрации радионуклида в культурах или продукции (Бк/кг) к плотности загрязнения почвы (кБк/м²). В зависимости от свойств почв различия в накоплении радионуклидов в растениях могут достигать 100 и более раз. Максимальные

коэффициенты перехода радионуклидов наблюдаются на торфяных почвах и минеральных почвах лёгкого механического состава – песчаных и супесчаных. Поэтому особенно высок риск производства молока цельного и мяса говядины с превышением допустимых норм по содержанию ^{90}Sr и ^{137}Cs при скормливания животным зеленой массы трав, заготовленной на торфяно-болотной и пойменных почвах с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения.

Поступление радионуклидов в урожай сельскохозяйственных культур может проходить внекорневым (аэральным) путём, если их выпадение происходит на вегетирующие растения и травостой лугов в весенне-летний период (как это было в первый год после аварии на ЧАЭС). Накопление радионуклидов в травостое при аэральном загрязнении зависит от характеристик выпадений, метеоусловий, площади листовой поверхности, фитомассы на единицу площади, относительной влажности во время и после выпадений и некоторых параметров, характеризующих взаимодействие радиоактивной примеси и растений.

В 1986 г. какой-либо определённой закономерности в распределении K_p ^{137}Cs в урожае сельскохозяйственных культур в зависимости от структуры почвенного покрова не наблюдалось, что указывает на преобладающее влияние в этот период аэрального загрязнения вегетирующих растений (табл. 5). В последующие годы происходила стабилизация радиоэкологической обстановки и снижение коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры, которые в травостое естественных и окультуренных пастбищ в 1987 г. были в 1,2-4,1 раза ниже по сравнению с 1986 г. [10]. Для зерновых и пропашных культур соответствующие изменения составляли 1,3-2,3 и 1,3-2,0 раза. При этом в большинстве случаев наблюдалось повышенное накопление ^{137}Cs из торфяно-подзолистых глеевых и торфяно-подзолистых почв. С 1991 по 2013-2014 гг. статистически достоверных различий в коэффициентах перехода ^{137}Cs вследствие минимальных уровней содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции зафиксировать не удалось. Однако в ряде случаев прослеживается тенденция повышенного накопления ^{137}Cs в урожае сельскохозяйственных культур из торфяно-подзолистых почв. Коэффициенты перехода ^{90}Sr значительно не отличались как до, так и после аварии на ЧАЭС. Таким образом, содержание данного радионуклида в сельскохозяйственной продукции связано только с глобальными выпадениями (табл. 6).

Таблица 5

**Коэффициенты перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры в 30-км зоне
Ленинградской АЭС, (Бк/кг)/(кБк/м²)**

Культура	Группа почв	Годы исследований					
		1986	1987	1988	1990	1991	2013-2014
Травостой естественных лугов	дерново-подзолистая	2,07±0,88	0,75±0,44	0,39±0,09	0,54±0,43	0,46±0,38	0,38±0,23
	дерново-карбонатная	-	0,66±0,08	-	0,41±0,19	0,47±0,45	-
	торфяно-подзолистая глеевая	1,98±0,65	0,86±0,44	0,43±0,34	-	0,55±0,23	-
	торфяно-подзолистая	-	3,30±0,76	-	-	1,89±0,12	0,86±0,22
Травостой окультуренных пастбищ	дерново-подзолистая	1,32±1,10	1,19±0,50	0,99±0,05	0,42±0,21	-	0,28±0,11
	дерново-карбонатная	1,34±0,23	0,57±0,02	0,67±0,34	0,39±0,40	0,49±0,33	0,33±0,13
	торфяно-подзолистая глеевая	3,63±3,40	1,23±0,21	1,04±0,67	0,64±0,33	0,64±0,25	-
	торфяно-подзолистая	3,57±2,84	1,69±0,30	2,04±0,40	0,89±0,57	0,64±0,34	0,55±0,14
Сеяные злаковые травы	дерново-подзолистая	5,5±4,7	0,77±0,30	0,42±0,08	0,34±0,39	0,31±0,28	0,18±0,09
	дерново-карбонатная	1,1±0,18	0,75±0,16	0,37±0,02	0,39±0,34	-	0,06±0,04
	торфяно-подзолистая глеевая	1,06±0,23	0,81±0,72	0,37±0,16	0,51±0,35	0,49±0,33	0,55±0,14
Зерновые колосовые	дерново-подзолистая	0,08±0,05	0,06±0,05	0,06±0,01	0,05±0,01	0,04±0,02	0,02±0,01
	дерново-карбонатная	0,14±0,03	0,06±0,02	0,06±0,02	0,03±0,02	0,02±0,03	0,02±0,01
Картофель	дерново-подзолистая	0,25±0,17	0,08±0,03	0,03±0,03	0,02±0,01	0,04±0,05	0,01±0,01
	дерново-карбонатная	0,09±0,07	0,07±0,06	0,04±0,02	0,03±0,03	0,03±0,01	-
	торфяно-подзолистая глеевая	0,15±0,11	0,11±0,01	0,12±0,07	-	0,07±0,03	0,03±0,02
Корнеплоды	дерново-подзолистая	0,07±0,01	0,14±0,02	0,09±0,07	-	0,04±0,01	0,02±0,02
	дерново-карбонатная	0,07±0,02	0,09±0,02	-	0,04±0,01	0,05±0,06	-
	торфяно-подзолистая глеевая	0,15±0,07	0,23±0,01	0,14±0,01	0,09±0,17	0,12±0,11	0,04±0,03

Таблица 6

**Коэффициенты перехода ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры в 30-км зоне
Ленинградской АЭС, (Бк/кг)/(кБк/м²)**

Культура	Группа почв	Годы исследований					
		1986	1987	1988	1989	1990	1991
Травостой естественных лугов	дерново-подзолистая	1,1±0,50	0,9±0,6	0,7±0,6	1,5±0,88	0,96±0,6	1,8±0,27
	дерново-карбонатная	-	2,4±0,04	-	-	3,7±2,43	1,4±1,23
	торфяно-подзолистая глеевая	4,0±0,48	-	5,6±3,7	4,9±3,22	-	-
	торфяно-подзолистая	-	6,5±0,4	-	8,5±4,86	-	5,7±4,22
Травостой окультуренных пастбищ	дерново-подзолистая	1,2±0,55	1,04±0,08	0,78±0,65	1,4±0,54	1,34±0,76	-
	дерново-карбонатная	2,4±0,14	2,5±1,1	1,3±0,34	3,0±1,2	-	1,06±0,33
	торфяно-подзолистая глеевая	5,8±3,40	3,9±3,2	2,1±1,76	-	3,6±2,4	3,4±2,45
	торфяно-подзолистая	-	4,9±3,0	-	3,3±0,22	5,1±2,88	4,5±3,8
Сеяные злаковые травы	дерново-подзолистая	-	0,9±0,3	0,8±0,7	1,2±0,5	0,99±0,5	1,5±0,7
	дерново-карбонатная	1,9±0,7	1,0±0,6	1,7±0,2	1,1±0,4	1,3±0,77	-
	торфяно-подзолистая глеевая	-	3,7±2,33	6,5±0,08	-	4,1±2,1	-
Зерновые колосовые	дерново-подзолистая	0,4±0,3	0,04±0,01	0,25±0,1	0,6±0,33	0,27±0,21	0,4±0,25
	дерново-карбонатная	0,3±0,1	0,24±0,1	0,18±0,02	0,15±0,07	0,15±0,06	0,19±0,03
Картофель	дерново-подзолистая	0,13±0,05	0,16±0,03	0,09±0,07	0,19±0,1	0,11±0,08	0,12±0,05
	дерново-карбонатная	0,09±0,07	0,06±0,03	0,10±0,09	0,08±0,01	0,05±0,03	0,06±0,01
	торфяно-подзолистая глеевая	0,15±0,10	-	0,19±0,11	0,22±0,17	-	0,24±0,03
Корнеплоды	дерново-подзолистая	0,16±0,11	0,16±0,02	0,19±0,07	0,15±0,1	0,17±0,01	-
	дерново-карбонатная	0,18±0,02	0,29±0,22	-	0,19±0,08	0,14±0,07	0,19±0,06
	торфяно-подзолистая глеевая	0,29±0,07	0,23±0,01	-	0,34±0,06	0,19±0,17	0,33±0,21

Наибольшие коэффициенты перехода характерны для грибов и ягод, произрастающих на болоте. В целом гидроморфные условия произрастания увеличивают коэффициенты перехода ^{137}Cs в несколько раз. Для автоморфных условий коэффициенты перехода ^{137}Cs для грибов, ягод и кустарничков находятся на уровне $17\text{--}31 \times 10^{-3}$, для травянистой растительности – $0,16\text{--}1,69 \times 10^{-3}$ (Бк/кг)/(кБк/м²).

Заключение

Проведённый анализ данных многолетних наблюдений позволяет сделать вывод, что Ленинградская АЭС не оказывает существенного влияния на радиационную обстановку в 30-км зоне воздействия. В то же время, значительная часть территории в регионе размещения ЛАЭС загрязнена ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС, и, хотя по содержанию в сельскохозяйственной продукции и продуктах питания местного производства не отмечено значимого накопления данного радионуклида, в таких компонентах наземных природных экосистем, как грибы и дикорастущие ягоды, наблюдаются показатели загрязнения на уровне и даже несколько выше нормативов СанПин. Представленные в работе результаты могут быть использованы не только для обеспечения радиационной безопасности населения, но и для оценки экологических рисков от воздействия ЛАЭС на референтные организмы биоты в соответствии с методологией, представленной в обзоре [12].

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

Литература

1. **Санжарова Н.И., Панов А.В., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н., Карпенко Е.И., Гордиенко Е.В., Микаилова Р.А.** Комплексный радиационно-экологический мониторинг в районе расположения радиационно-опасных объектов как составная часть Единой системы государственного экологического мониторинга //Известия вузов. Ядерная энергетика. 2019. № 1. С. 131-142.
2. МУ 13.5.13-00. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно опасных объектов. М.: Изд-во РАСХН, 2000. 28 с.
3. Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварии на ЧАЭС /под ред. проф. Н.И. Санжаровой. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. 276 с.
4. Отчёт по экологической безопасности Ленинградской АЭС за 2018 г. АО «Концерн Росэнергоатом», филиал «Ленинградская атомная станция». Сосновый Бор, 2019. 38 с.
5. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2019. 324 с.
6. Радиоактивное загрязнение районов АЭС /под ред. И.И. Крышева. М.: ЯО СССР, 1991. 126 с.
7. **Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.** Глобальное и региональное радиоактивное загрязнение цезием-137 европейской территории бывшего СССР //Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С. 5-9.
8. **Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Историк О.А., Еремина Л.А.** Радиационная обстановка на территориях Ленинградской области, пострадавших вследствие аварии на Чернобыльской АЭС //Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 103-112.
9. **Блинова Л.Д., Зимина Л.М., Виногорова В.Т., Зимин В.Л., Голубева Л.В., Мичурина Т.Г., Земскова С.В., Щукина Т.Н.** Экологический мониторинг в районе расположения ядерного комплекса Сосновый Бор в 1997 году //Экологическая химия. 2000. Т. 9, № 1. С. 49-63.
10. **Санжарова Н.И.** Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем и ведение сельского хозяйства в зоне воздействия атомных электростанций: дисс. ... докт. биол. наук: 03.00.01. Обнинск, 1997. 366 с.
11. United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1. Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). New York: UN, 2000. P. 84-156.
12. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.** Радиационная безопасность окружающей среды. Обзор //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 3. С. 113-131.

Radioecological monitoring of the area surrounding the Leningrad NPP: results evaluation

Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Sanzharova N.I., Panov A.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk

The paper presents results of long-term monitoring of radioecological situation in the area surrounding the Leningrad NPP (LNPP), that covers the periods before the Chernobyl accident (1980-1985), during and immediately after the accident (1986-1992) and the late period (2013-2014). After the Chernobyl accident the enhanced radioactivity level in the environment including soil and vegetation was registered in the area surrounded the Leningrad NPP. Several test points for sampling were selected inside the 30-km zone around the LNPP. Before the accident, in 1985, ^{137}Cs soil contamination density was 3 kBq/m²; immediately after the accident, in 1986, the contamination density increased by 10 fold. In the late period, in 2013, the ^{137}Cs soil contamination density reduced significantly, however it exceeded the levels registered in 1985 by 2.6-7.3 times. ^{90}Sr soil contamination density was 1.4-1.6 kBq/m² both before and after the accident (1985-1992). The presence of artificial radionuclides in agricultural produce before 1985 was caused by global radioactive fall-outs, however no radionuclides emissions from the Leningrad NPP were registered. Average ^{137}Cs content in grain and intertilled crops exceeded their content before 1986 by 19-44 times; the high content was associated with the contamination of the vegetation by airway. The ^{137}Cs content in agricultural produce is still higher than the level registered before the Chernobyl accident by 1.4-2.1 times, but the current levels are many times less than the current acceptable level. The levels exceeding the acceptable magnitude are found in wild berries only, that grow in some swampland with ^{137}Cs soil contamination density of 3-9 kBq/m² near the LNPP. Dynamics of transfer factors of ^{90}Sr and ^{137}Cs from soil to agricultural produce in the LNPP area was evaluated. The soil properties and the Chernobyl fall-out are shown to affect the factor magnitude. Presented data demonstrate that the Leningrad NPP operating in the standard way does not influence strongly on radiological situation in the 30-km zone around the NPP.

Keywords: Leningrad NPP, radioecological monitoring, radiation safety, radionuclides, density contamination, agricultural products, foodstuffs, terrestrial ecosystems, agrarian ecosystems, transfer factor.

References

1. Sanzharova N.I., Panov A.V., Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Karpenko E.I., Gordienko E.V., Mikailova R.A. Complex radioecological monitoring in the vicinity of radiation hazardous facilities as an integral part of the unified system of state environmental monitoring. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika – Proceedings of Universities. Nuclear Energy*, 2019, no. 1, pp. 131-142. (In Russian).
2. MU 13.5.13-00. Organizatsiya gosudarstvennogo radioekologicheskogo monitoringa agroekosistem v zone vozdeystviya radiatsionno-opasnykh ob"yektov [Organization of state radioecological monitoring of agroecosystems in the zone of influence to radiation hazardous objects. Guidelines]. Moscow, Publisher of the RAAS, 2000. 28 p.
3. Methods of organization and management of agroecological monitoring of agricultural lands in zones of technogenic pollution and assessment of the environmental situation in agriculture in the vicinities of the NPP's and Chernobyl NPP accident. Ed.: Prof. N.I. Sanzharova. Obninsk, RIARAE, 2010. 276 p. (In Russian).
4. Environmental Safety Report of Leningrad NPP for 2018. Rosenergoatom Concern JSC, branch of the Leningrad Nuclear Power Plant. Sosnovy Bor, 2019. 38 p. (In Russian).
5. The radiation situation in Russia and neighboring countries in 2018. Annual Report. Obninsk, NPO Typhoon, 2019. 332 p. (In Russian).

Kuznetsov V.K. – Chief Researcher, D. Sc., Biol.; Tsygvintsev P.N. – Lead. Researcher, C. Sc., Biol.; Sanzharova N.I. – Director, D. Sc., Biol., Prof., Corresponding member of RAS; Panov A.V.* – Deputy Director, D. Sc., Biol., Prof. RIRAE.

*Contacts: 109 km, Kievskoe Sh., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249032. Tel.: +7(484) 399-69-59; e-mail: riar@mail.ru.

6. Radioactive contamination of NPP areas. Ed.: I.I. Kryshev. Moscow, NS of the USSR, 1991. 126 p. (In Russian).
7. **Israel Yu.A., Kvasnikova E.V., Nazarov I.M., Fridman Sh.D.** Global and regional radioactive contamination with cesium-137 of the European territory of the former USSR. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology*, 1994, no. 5, pp. 5-9. (In Russian).
8. **Brook G.Ya., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Historian O.A., Eremina L.A.** Radiation situation in the territories of the Leningrad region affected by the Chernobyl accident. *Radiacionnaya gigiena – Radiation Hygiene*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 103-112. (In Russian).
9. **Blinova L.D., Zimina L.M., Vinogorova V.T., Zimin V.L., Golubeva L.V., Michurina T.G., Zemskova S.V., Schukina T.N.** Environmental monitoring in the area of the Sosnovy Bor nuclear complex in 1997. *Ekologicheskaya himiya – Ecological Chemistry*, 2000, vol. 9, no. 1, pp. 49-63. (In Russian).
10. **Sanzharova N.I.** Radioecological monitoring of agroecosystems and provide of agriculture in the zone of influence of NPP's. Diss... Dr. Bio. Sci. Obninsk, 1997. 366 p. (In Russian).
11. United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources, Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), New York, UN, 2000, pp. 84-156.
12. **Kryshev I.I., Sazykina T.G.** Radiation safety of the environment. Overview. *Radiaciya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 113-131. (In Russian).