**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В РЕГИОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ РОСТОВСКОЙ АЭС**

А.В. Панов, Н.Н. Исамов, В.К. Кузнецов

*ФГБНУ ВНИИРАЭ, г. Обнинск*

*эл. почта:* *riar@mail.ru*

Перспективы развития ядерной энергетики, как важной составляющей энергобезопасности государства, во многом определяются решением ряда экологических задач, одной из которых является обоснование радиационной безопасности человека при эксплуатации атомных электростанций и связанных с этим выбросов и сбросов радионуклидов в окружающую среду [1-2]. Это обоснование возможно только при организации и ведении радиационно-экологического мониторинга в районах расположения АЭС на основе результатов многолетних наблюдений за поступающими от электростанции радионуклидами в окружающую среду. При эксплуатации АЭС в технологически штатном режиме происходят выбросы и сбросы строго контролируемого количества радиоизотопов, которые, попадая в окружающую среду, включаются в пищевые цепочки миграции и формируют дополнительное к естественному фону облучение человека. Сельскохозяйственная продукция (и в первую очередь продукты питания), производимая в регионе размещения АЭС, во всех случаях является одним из основных источников поступления радионуклидов в организм человека, проживающего на территории, прилегающей к атомной электростанции. Это обуславливает особое внимание к аграрным экосистемам, как объекту воздействия на население предприятий ядерной энергетики [3]. Учитывая, что в Российской Федерации в 30-км зонах влияния АЭС от 50 до 90% территории занимают сельскохозяйственные угодья, становится очевидной необходимость организации системы радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций для обеспечения безопасного проживания населения и снабжения его продуктами питания, соответствующими санитарно-гигиеническим нормативам [4]. Для исследования была выбрана Ростовская (с 2001 по 2010 гг. Волгодонская) АЭС суммарной мощностью 4,03 ГВт, которая является крупнейшим на аграрном юге России предприятием энергетики, вырабатывая около 30% годового регионального объема электроэнергии. Цель исследования - анализ результатов многолетних наблюдений за влиянием Ростовской АЭС на радиоэкологическую обстановку в регионе размещения станции, полученных на сети радиационно-экологического мониторинга.

Площадка Ростовской АЭС (РАЭС) расположена в Дубовском районе Ростовской области в 13,5 км от г. Волгодонск и в 19,8 км от г. Цимлянск. Ближайшие населенные пункты - хутор Харсеев и станица Подгоренская, находятся вне санитарно-защитной зоны РАЭС на расстоянии 4,0 и 5,0 км, соответственно. Тридцатикилометровая зона наблюдения РАЭС, занимающая площадь 282,6 тыс. га, включает 91,3 га водной поверхности юго-западной части Цимлянского водохранилища. В 30-км зону входят два города – Волгодонск и Цимлянск, 38 сельских поселений, а также сельскохозяйственные угодья 24 коллективных фермерских хозяйств Волгодонского, Цимлянского, Зимовниковского и Дубовского районов. В структуре землепользования агропредприятий преобладают пахотные угодья – 68,5% и пастбища – 21,6%. Сельскохозяйственными землями занято 93% сухопутной части 30-км зоны наблюдения РАЭС. Окружающие электростанцию сельскохозяйственные угодья, в основном, используются под пашню, где возделываются зерновые, овощные, а также кормовые культуры. Основной почвенный фонд данного региона составляют каштановые почвы и южные черноземы тяжелого гранулометрического состава. Совместно со средне-, тяжелосуглинистыми и глинистыми по механическому составу почвами они формируют 92-100% почвенного покрова от общей площади сельскохозяйственных угодий в зоне наблюдения РАЭС [4]. На основе анализа данных по характеристикам почв агроэкосистем и структуре землепользования, в 2001 г. была заложена сеть радиационно-экологического мониторинга в зоне влияния РАЭС, включающая семь контрольных участков (КУ) и два контрольных пункта (КП).

Контрольные участки и контрольные пункты, расположенные в 15-км зоне размещения РАЭС, выбирались в соответствии с требованиями МУ-13.5.13-00 [3] по «розе ветров» таким образом, чтобы на преобладающих типах почв были представлены основные возделываемые в регионе сельскохозяйственные культуры, при этом отдельно анализировались данные для пахотных и лугопастбищных угодий. Площадь сельскохозяйственных угодий, где были заложены контрольные участки, варьировала от 20 до 192 га, а территория садовых обществ составляла 10 га. При выборе контрольных участков на пастбищах оценивалась информация по направлениям и отраслевой структуре ведения животноводства. В связи с преобладанием в регионе мясного скотоводства, с одной стороны, и молока, как критического продукта, с которым поступает наибольшее количество радионуклидов в рацион питания населения, с другой, было выбрано два контрольных пункта (КП-1 и КП-2), где имеется молочное стадо коров. Для оценки радиационно-экологической ситуации в водной экосистеме Цимлянского водохранилища в 2018 г. были определены три контрольных пункта (КП-3 – КП-5).

Мониторинговые исследования проводились в соответствии с требованиями МУ-13.5.13-00 [3] и рекомендациями [5] в период 2001-2018 гг. на всем промежутке времени за исключением отдельных лет. На контрольных участках, расположенных на пашне, отбирался пахотный горизонт (0-20 см), а на лугах и пастбищах верхний слой почвы глубиной 10 см. При сопряженном отборе растительных и почвенных образцов для определения содержания радионуклидов, агрохимических показателей почв и коэффициентов накопления радионуклидов в продукции растениеводства, одновременно проводилось и измерение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД). На контрольном участке КУ-2 в 2008 и 2018 гг. дополнительно отбирались пробы почвы послойно, что дало возможность оценить динамику вертикального распределения радионуклидов в почвенном профиле. Отобранная при мониторинге продукция растениеводства разделялась на хозяйственно-ценную (зерно, клубне- и корнеплоды, овощи) и побочную часть продукции (солома и др.). На контрольных пунктах, где ведется наблюдение за миграцией радионуклидов по животноводческой цепочке (КП-1 и КП-2), был проведен отбор проб почвы, рациона сельскохозяйственных животных, молока и говядины. В водной экосистеме Цимлянского водохранилища отбирались пробы воды, донных отложений и рыбы. Во всех образцах определяли содержание естественных (40K, 226Ra, 232Th) и наиболее радиологически значимых техногенных (90Sr, 137Cs) радионуклидов.

Работа Ростовской АЭС обеспечивается эксплуатацией четырех энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000: энергоблок №1 запущен в 2001 г., №2 в 2010 г, №3 в 2015 г. и №4 в 2018 г., соответственно. Поэтому ведение радиоэкологического мониторинга в регионе РАЭС в течение 18 лет дало возможность оценить влияние атомной электростанции на человека и окружающую среду от работы всех четырех энергоблоков.

На первом этапе анализа данных мониторинга была выполнена оценка динамики удельной активности радионуклидов техногенного происхождения в почвенных образцах. За весь 18-летний период наблюдений содержание 90Sr в почве варьировало в достаточно узких пределах 1,1-8,7 Бк/кг, а 137Cs от 5,4 до 18,8 Бк/кг. Вариабельность данных по контрольным участкам и пунктам составляла 1,2-4,0 раза для 90Sr и 1,4-3,0 раза для 137Cs. При этом, нигде не было обнаружено трендов на увеличение содержания техногенных радионуклидов в отобранных почвенных образцах на всей рассматриваемой территории. Таким образом, начиная с 2001 г. ввод в эксплуатацию новых энергоблоков РАЭС не оказал значимого влияния на увеличение содержания техногенных радионуклидов в почвах агроэкосистем, прилегающих к атомной электростанции территорий.

Среднее содержание 90Sr в почве в регионе размещения РАЭС составляет 1,7-7,4 Бк/кг, 137Cs варьирует в пределах 7,5-14,9 Бк/кг. Диапазон вариации среднего содержания в почве естественных радионуклидов составляет: для 40K 561-634 Бк/кг, для 226Ra 23,4-27,5 Бк/кг, для 232Th 32,7-35,9 Бк/кг. Мощность эквивалентных доз гамма-излучения на местности за годы исследований находилась в диапазоне 0,09-0,16 мкЗв/ч, при среднем значении 0,13 мкЗв/ч. Полученные результаты мониторинга хорошо согласуются как с данными из международных источников [6], так и с результатами российских исследований, проведенных в регионе Ростовской АЭС [7-8]. Сравнительный анализ данных по удельной активности техногенных радионуклидов в почве пашни и лугопастбищных угодий показал, что на последних уровни содержания 90Sr на 15%, а 137Cs на 25% выше, что объясняется проведением на пашне ежегодных агротехнических мероприятий и перераспределением радионуклидов в почвенном профиле на бóльшую глубину.

Для оценки динамики миграции радионуклидов техногенного происхождения в почве целинных лугов, в 2008 и 2018 гг. на контрольном участке КУ-2 (сенокос с естественными многолетними травами) были отобраны пробы почвы послойно на глубину до 25 см. Отмечена слабая вариабельность распределения 90Sr в почвенном горизонте (в пределах 0,5-1 Бк/кг) и 137Cs (диапазон 1-5 Бк/кг). При этом, не обнаружено увеличения содержания этих радионуклидов в верхних слоях почвы за 10-летний период, что говорит об отсутствии дополнительного поступления 90Sr и 137Cs в окружающую среду после пуска энергоблоков №2, №3 и №4 РАЭС, а присутствие их в почве объясняется глобальными выпадениями.

С точки зрения радиационной безопасности человека более значимым является определение содержания радионуклидов в производимой сельскохозяйственной продукции и продуктах питания, а также оценка их соответствия установленным радиологическим стандартам и санитарно-гигиеническим нормативам. Это особенно важно, поскольку в регионе Ростовской АЭС значительную долю в рационе питания населения составляют пищевые продукты местного производства. Среднее содержание радионуклидов в продовольственном зерне за весь 18-летний период наблюдений находилось в диапазонах: для 40K 115-209 Бк/кг, для 90Sr 0,1-0,68 Бк/кг и для 137Cs 0,23-0,54 Бк/кг. Вариабельность данных в накоплении радионуклидов в продукции растениеводства объясняется как сортовыми особенностями растений, так и погодными условиями, а также дозами применения агромелиорантов в разные годы исследований, что в определенной степени повлияло на миграцию радионуклидов. Например, различия в накоплении естественных радионуклидов в зерне для одной и той же культуры в разные годы составили 1,1-2,1 раза, а для техногенных 1,1-4,6 раза, при этом ни на одном контрольном участке не были зафиксированы тренды по увеличению во времени содержания 90Sr и 137Cs в данной сельскохозяйственной продукции. Даже максимальные значения удельной активности техногенных радионуклидов в продовольственном зерне (90Sr - 0,74 и 137Cs - 0,90 Бк/кг) были в 55 раз для 90Sr и в 65 раз для 137Cs ниже действующих нормативов (СанПин 2.3.2.1078-01 и СанПиН 2.3.2.2650-10).

В кормах сельскохозяйственных животных (солома, естественные и сеянные травы) радионуклиды накапливаются в большей степени по сравнению с зерном, что связано с биологическими особенностями растений. Так, в соломе зерновых с контрольных участков, среднее содержание 90Sr варьировало в диапазоне 0,35-1,31 Бк/кг и 137Cs 0,97-2,0 Бк/кг, а в зеленой массе трав с контрольных участков и контрольных пунктов этот диапазон составлял 0,44-3,7 Бк/кг для90Sr и 0,87-1,8 Бк/кг для 137Cs, соответственно. За весь 18-летний период наблюдений максимально зафиксированные уровни удельной активности 90Sr в соломе были в 130 раз ниже норматива по содержанию этого радионуклида в кормах (180 Бк/кг по ВП 13.5.13/06-01), а по 137Cs эта разница составила 190 раз (норматив 400 Бк/кг). Максимальные уровни содержания 90Sr в траве были в 12 раз ниже норматива (50 Бк/кг по ВП 13.5.13/06-01), а 137Cs почти в 40 раз (норматив 100 Бк/кг). В целом, представленные данные показывают, что продукция растениеводства, производящаяся в регионе размещения Ростовской АЭС, полностью соответствует радиологическим нормативам с большими коэффициентами запаса и не оказывает влияния на формирование дополнительной дозовой нагрузки на население.

При радиационно-экологическом мониторинге всегда особое внимание уделяется продуктам питания местного производства с минимальной технологической кулинарной переработкой. Анализ результатов многолетних наблюдений показал, что при нормативе СанПиН 2.3.2.2650-10 по содержанию 90Sr 40 Бк/кг в овощах, картофеле и бахчевых, максимальные уровни удельной активности данного радионуклида в этих видах пищевой продукции, производящейся в регионе РАЭС, в 45 раз ниже установленного лимита. Максимальные уровни содержания 137Cs в овощах, картофеле и бахчевых в 80 раз ниже норматива (80 Бк/кг) СанПиН 2.3.2.2650-10. При довольно большом наборе пищевой растениеводческой продукции, производящейся в регионе РАЭС, нельзя выделить какие-либо группы продуктов с повышенными уровнями накопления радионуклидов или имеющими тенденцию к такому увеличению. Содержание техногенных радионуклидов в продукции животноводства за весь 18-летний рассматриваемый период также было довольно низким. Так, в молоке максимальные уровни удельной активности 90Sr были более, чем в 400 раз ниже норматива СанПин 2.3.2.1078-01 (25 Бк/кг), а по 137Cs (норматив 100 Бк/кг) эта разница оказалась еще выше - 600 раз. В действующем в настоящее время СанПиН 2.3.2.2650-10 90Sr в мясе не нормируется, а при сравнении данных мониторинга с более ранним нормативом СанПин 2.3.2.1078-01 (50 Бк/кг) уровни содержания этого радионуклида в говядине, были в 2,5 тыс. раз ниже установленного лимита. По нормативу СанПиН 2.3.2.2650-10 для 137Cs (200 Бк/кг), содержание данного радионуклида в пробе говядины было почти 3 тыс. раз меньше лимита. Аналогичная картина наблюдается и по рыбе из Цимлянского водохранилища. Содержание в леще 90Sr было более, чем в 1 тыс. раз ниже норматива СанПин 2.3.2.1078-01(100 Бк/кг) и в 2,5 тыс. раз ниже норматива по 137Cs (130 Бк/кг).

Достаточно хорошая сходимость полученных нами результатов исследований региона РАЭС обнаруживается с данными радиационно-гигиенического мониторинга ФГУН НИИРГ. Так, для периода 2007-2009 гг. в [9] представлены данные по содержанию 137Cs в молоке из региона Ростовской АЭС в диапазоне 0,04-0,12 Бк/кг, в говядине 0,1-0,2 Бк/кг и в овощах 0,05-0,09 Бк/кг, что практически полностью совпадает с полученными нами результатами на более длительном временном промежутке. Данные ФГБНУ ВНИИРАЭ по оценке содержания искусственных радионуклидов в пищевой продукции, произведенной в регионе РАЭС, также хорошо коррелируют и с результатами, полученными службами Роспотребнадзора на более широкой сети мониторинга всей Ростовской области [10]. Таким образом, можно заключить, что пищевая продукция из региона РАЭС, с момента пуска в 2001 г. первого энергоблока и по настоящее время, полностью соответствует установленным в СанПиН нормативам по содержанию радионуклидов 90Sr и 137Cs и не оказывает влияния на формирование дополнительных доз внутреннего облучения у населения.

В районе РАЭС техногенные радионуклиды поступают в водоем-охладитель в составе сбросных вод и путем прямого осаждения выбросов из воздуха. Радионуклиды, попадающие в водоемы, перераспределяются в толще воды и обычно накапливаются в придонных отложениях, бентосе, водных растениях и рыбе. Согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009), уровни вмешательства при содержании в воде отдельных радионуклидов составляют: 90Sr – 4,9 Бк/кг, 37Cs – 11 Бк/кг. Результаты обследования контрольных точек показывают, что содержание радионуклидов в воде Цимлянского водохранилища ниже уровня вмешательства по 90Sr в 163, а по 37Cs в 183 раза. Таким образом, можно заключить, что радиоэкологическая ситуация в Цимлянском водохранилище, имеющем важное хозяйственное значение для региона, является благополучной.

Полученные результаты мониторинга по содержанию техногенных радионуклидов в воде и продуктах питания (молоко, мясо, рыба, картофель, овощи) хорошо согласуются с данными радиационно-гигиенического мониторинга, проводимого в регионе РАЭС сотрудниками ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА РФ и представленными в работе [11]. Анализ 18-летних результатов наблюдений за радиоэкологической обстановкой в регионе размещения Ростовской АЭС, полученных на сети радиоэкологического мониторинга, позволяет сделать вывод о том, что эксплуатация РАЭС в штатном режиме не приводит к регистрируемому увеличению содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства, продуктах питания и объектах окружающей среды [12]. Система радиационно-экологического мониторинга агроэкосистем должна являться неотъемлемой составляющей в общей системе радиационной безопасности в регионах размещения АЭС и других радиационно-опасных объектов.

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

**Литература**

1. Алексахин, Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики / Р.М. Алексахин // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114, №5. – С. 243-248.
2. Большов, Л.А. Экологическая безопасность ядерной энергетики и топливных циклов / Л.А. Большов, Р.В. Арутюнян, И.И. Линге, С.В. Казаков // Бюллетень по атомной энергии. – 2004. – №5. – С. 61-65.
3. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. МУ-13.5.13-00. (утв. Минсельхозом РФ 7 августа 2000 г.) – М., 2000. – 28 с.
4. Радиационно-экологическая обстановка и социально-экономическое состояние региона Ростовской (Волгодонской АЭС). – Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2008. – 37 с.
5. 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. Н.И. Санжаровой. – Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. – 276 с.
6. United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York, 2000, pp. 84-156.
7. Аветисян, С.Р. Естественные и искусственные радионуклиды в растительных объектах Ростовской области / С.Р. Аветисян, Е.А. Бураева, А.А. Гончаренко, А.М. Давыденко, Е.В. Дергачева, В.С. Нефедов, В.В. Стасов, А.Н. Триболина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – С. 533.
8. Малаева, Т.Ю. Радиационный контроль района размещения Ростовской АЭС / Т.Ю. Малаева // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – №4(5). – С. 7-13.
9. Прокопенко, С.И. Оценка радиационной обстановки в зоне наблюдения Волгодонской атомной электростанции за 2007-2009 гг. / С.И. Прокопенко, А.Н. Барковский, В.Ю. Голиков, М.В. Калинина, М.Ю. Соловьев // Радиационная гигиена. – 2010. – Т. 3, №3. – С. 47-50.
10. Соловьев, М.Ю. Опыт совершенствования радиационно-гигиенического мониторинга и радиационно-гигиенической паспортизации на территории Ростовской области / М.Ю. Соловьев, М.В. Калинина, Т.В. Жукова // Радиационная гигиена. – 2010. – Т. 3, №1. – С. 40-44.
11. Шандала, Н.К. Состояние радиационно-гигиенической обстановки в районе размещения АЭС / Н.К. Шандала, И.П. Коренков, В.В. Романов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2015. – Т. 60, №2. – С. 15-21.
12. Панов, А.В. 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.