

ЛИТЕРАТУРА

1. *Severyukhin, Y.S et al. Comparative Analysis of Behavioral Reactions and Morphological Changes in the Rat Brain After Exposure to Ionizing Radiation with Different Physical Characteristics // Cellular and Molecular Neurobiology. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10571-021-01187-z>*
2. *Северюхин Ю.С., Буденная Н.Н., Тимошенко Г.Н., Иванов А.А., Красавин Е. А. Морфологические изменения клеток Пуркинью коры мозжечка крыс после облучения ионами углерода ^{12}C // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т.51. №1. с. 46–50.*

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРОНЦИЯ-90 В КОМПОНЕНТАХ НАЗЕМНЫХ И ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

FEATURES OF STRONTIUM-90 DISTRIBUTION IN THE COMPONENTS OF TERRESTRIAL AND AQUATIC ECOSYSTEMS OF THE MURMANSK REGION

A. N. Kizeev, S. A. Syurin
A. N. Kizeev, S. A. Syurin

*Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья
Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
aleksei.kizeev@mail.ru
Northwest Public Health Research Center,
Saint Petersburg, Russian Federation*

В работе представлены результаты исследований пространственного распределения одного из основных долгоживущих техногенных радионуклидов – ^{90}Sr в компонентах наземных и водных экосистем в индустриально развитом регионе российской Арктики – Мурманской области. Изучены экосистемы в границах 30-км зоны потенциально опасного ядерного объекта – Кольской атомной электростанции. Выполнен анализ содержания ^{90}Sr в почвенном покрове, наземной растительности, поверхностных водах и донных отложениях. Установлены основные источники поступления изучаемого радионуклида в природные объекты. Дана оценка современного радиоэкологического состояния экосистем. Отмечена необходимость продолжения исследований долгоживущих техногенных радионуклидов в арктических регионах России.

This work presents the results of studies of the spatial distribution of one of the main long-lived technogenic radionuclides – ^{90}Sr in the components of terrestrial and aquatic ecosystems in the industrially developed region of the Russian Arctic – the Murmansk region. Ecosystems were studied in the 30-km zone of a potentially dangerous nuclear facility – the Kola Nuclear Power plant. The analysis of ^{90}Sr content in soil, terrestrial vegetation, surface waters and bottom sediments was performed. The main sources of receipt of the studied radionuclide into environmental objects have been established. The assessment of the current radioecological state of ecosystems is given. The necessity of continuing the research of long-lived technogenic radionuclides in the Arctic regions of Russia is noted.

Ключевые слова: Мурманская область, Кольская АЭС, экосистемы, техногенные радионуклиды, ^{90}Sr , активность, радиоэкологическая безопасность.

Keywords: Murmansk region, Kola NPP, ecosystems, technogenic radionuclides, ^{90}Sr , activity, radioecological safety.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2023-1-105-108>

Техногенные радионуклиды – это стойкие токсические вещества, способные длительное время сохраняться в окружающей среде и оказывать влияние на здоровье человека. Они относятся к числу наиболее опасных поллютантов [1]. Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ), составляющая значительную часть Северного полушария Земли, длительное время загрязнялась техногенными радионуклидами от глобальных выпадений радиоактивных веществ, появившихся в результате испытаний ядерного оружия. Как известно, всего в мире было произведено более 1,5 тысячи ядерных взрывов, 90% из которых – в Северном полушарии. В загрязнение арктических территорий, помимо глобальных выпадений, внесли свой вклад крупные аварии на атомных электростанциях. Существуют также местные промышленные источники поступления радиоактивных элементов в окружающую среду АЗРФ [2].

Мурманская область является одним из наиболее освоенных арктических районов России. Здесь расположен ряд потенциальных радиационно-опасных объектов: Кольская АЭС (КАЭС), места базирования военных и гражданских судов с атомными энергетическими установками, объекты проведения подземных ядерных взрывов малой мощности, предприятия по добыче и переработке природного радиоактивного сырья и др. Ядерная энергетика

(особенно после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и на АЭС Фукусима-1 в 2011 г.), требует рассмотрения в полном объеме вопросов безопасности объектов данной отрасли электроэнергетики для человека и для окружающей его природной среды. Это создание технологически безупречного режима работы на атомных станциях, решение узловых проблем переработки радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива и обязательное экологическое обследование близлежащих территорий.

Для объектов окружающей среды наибольшее экологическое значение имеют изотопы, обладающие высоким выходом в ядерных реакциях, имеющие сравнительно большие периоды полураспада и высокую энергию излучения. К таким важным техногенным нуклидам относится ^{90}Sr , период полураспада которого составляет 28,79 лет. Радиоактивные изотопы стронция, как известно, в природе не встречаются, они образуются как побочные продукты деления ядер ^{235}U , ^{238}U или ^{239}Pu . Являясь аналогом жизненно важного элемента кальция, стронций-90 способен замещать его в химических соединениях, наиболее активно включаться в цепочки миграции и с пищевыми продуктами поступать в организм человека [3]. ^{90}Sr является одним из основных дозообразующих радионуклидов при радиационных авариях на ядерных объектах. В процессе техногенной миграции он способен накапливаться в почве, донных отложениях, растениях и в живых организмах. В связи с этим обстоятельством, особую актуальность приобретают исследования особенностей распределения стронция-90 в компонентах наземных и водных экосистем, локализованных в зоне потенциального влияния КАЭС, что в свою очередь, продиктовано вопросами обеспечения радиационной безопасности населения региона.

КАЭС – самая северная атомная станция в Европейской части России. Она расположена в юго-западной части Мурманской области, на землях города Полярные Зори с подведомственной территорией. КАЭС построена в 1973-1984 годах и является основным производителем электроэнергии для энергосистем Мурманской области и Республики Карелия. Исследуемый район представляет собой полого-холмистую равнину с абсолютными отметками 120-250 м и характеризуется обилием ледниковых форм рельефа: конечно-моренных гряд, камов и озов, зандровых конусов. Депрессии заняты низинными болотами, юго-западной акваторией озера Имандра и небольшими озерами в различной степени зарастания. Четвертичные отложения, прикрывающие коренные породы, представлены песчаными и супесчаными, сильно завалуненными моренами, реже – безвалунными отложениями песков и супесей, а в некоторых местах – суглинками [4].

Радиоэкологические исследования выполнялись в соответствии с нормативными документами по радиационной безопасности окружающей среды и человека – Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» (№ 3-ФЗ), Санитарными правилами и нормативами СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» и др.

На первом этапе работ в рамках утвержденной программы полевых исследований производился отбор образцов для анализа содержания ^{90}Sr . Были взяты компоненты наземных (почвенный покров, древесная и кустарничковая растительность) и водных (поверхностные воды, донные отложения) экосистем. Отдельно собирались входящие в типичный пищевой рацион местного населения ягоды дикорастущих кустарничков и грибы. Сбор природных объектов производился на сети стационарных мониторинговых точек, расположенных в радиусе 30 км от КАЭС: в санитарно-защитных зонах атомной станции и хранилища сухих слабоактивных отходов, в пределах и на границе зоны наблюдения, а также в фоновых условиях. Точки мониторинга закладывались с учетом места размещения и зоны потенциального воздействия источника эмиссий радиоактивных элементов, преобладающей розы ветров, распределения возможного радиоактивного загрязнения, характеристик почвенно-растительного покрова. Подробное описание мониторинговых точек приведено в предыдущих публикациях [4, 5]. Количество точек мониторинга и число отбираемых образцов было достаточным для простративной характеристики уровней содержания ^{90}Sr в контролируемых природных объектах. Ягоды дикорастущих кустарничков и грибы собирались в окрестностях населенных пунктов. Отбор образцов проводился в соответствии с общепринятыми требованиями. На каждый взятый образец оформлялся паспорт пробы, содержащий полную информацию о нем: вид пробы, дата и место отбора, географические координаты, а также мощность дозы (МД) в местах пробоотбора.

МД измерялась с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1125А, не менее 3-х раз в каждой точке отбора проб. За исходную величину МД принималось среднее значение из всех замеров. Каждое измерение МД проводилось до достижения статистической погрешности результата не более 10% при доверительной вероятности 0,95. Фактический отбор проб природной среды проводился с запасом, что выражается в большом их количестве, на случай возникновения необходимости проведения дополнительных радиоэкологических исследований.

На втором этапе работ осуществлялась подготовка счетных образцов и анализ содержания в них радионуклидов. Счетные образцы почвы, донных отложений, растений, ягод и грибов для измерения ^{90}Sr изготавливались с использованием радиохимических методов выделения из измельченных, гомогенизированных и прокаленных (почва, донные отложения) или озоленных (пробы биологического происхождения) образцов. Определение ^{90}Sr в почве, донных отложениях и в наземной растительности проводилось путем выщелачивания с использованием кислотной обработки (вскрытия) проб, радиохимической очистки от мешающих примесей и сопутствующих радионуклидов, накопления в течение 14 дней и выделения дочернего радионуклида ^{90}Y . Определение ^{90}Sr в поверхностных и питьевых водах определялось путем многостадийной радиохимической очистки от мешающих примесей и сопутствующих радионуклидов, накопления в течение двух недель и выделения ^{90}Y . Активность ^{90}Sr в счетных образцах производилась по результатам измерения бета-активности накопившегося и выделенного ^{90}Y с использованием сертифицированного низкофонового альфа-бета радиометра спектрометрического типа

с экспозицией не менее 3 часов. Химический выход ^{90}Sr определялся пламенно атомно-абсорбционным методом или с применением оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Выход ^{90}Y определялся гравиметрическим методом по его носителю.

Установлено, что в пределах исследуемой территории величина МД составляла от 0,09 до 0,15 мкЗв/ч, что объясняется природными флуктуациями естественного гамма-фона.

Почва является главным резервуаром радионуклидов и наиболее емким звеном в цепочках их переноса в биологические объекты. Изучение почвенного покрова представляет собой одну из важнейших составляющих радиоэкологической оценки и направлено на раннюю диагностику антропогенных изменений почвы, которые в итоге могут нанести вред здоровью человека и состоянию экосистем. Радиоактивный стронций поступает на поверхность почвы в виде двух фракций: растворимой и нерастворимой. Основная часть ^{90}Sr выпадает с атмосферными осадками в виде растворимой фракции, нерастворимая же фракция состоит из смеси частичек почвы, промышленной пыли и сажи. Находясь в почве, стронций-90 активно вовлекается в протекающие в ней физико-химические процессы [3].

Удельная активность ^{90}Sr в исследуемых почвенных образцах в границах 30-км зоны потенциального влияния КАЭС находилась в диапазоне от <2,1 до 16,0 Бк/кг. Максимальные значения удельной активности данного радионуклида были отмечены в подстилке и в среднем составляли от 11,8 до 16,0 Бк/кг. В элювиальном горизонте наблюдалось резкое снижение удельной активности ^{90}Sr (до 0,5-0,6 Бк/кг), а в иллювиальной толще и почвообразующей породе удельная активность ^{90}Sr была ниже предела обнаружения. Профильное распределение стронция-90 в почве относится к регрессивно-аккумулятивному типу. Сравнение полученных результатов с действующими нормативами (ОСПОРБ-99/2010) показало, что обнаруженные величины удельной активности ^{90}Sr в почвенном покрове были ниже установленных санитарных уровней, при которых допускается неограниченное использование твердых материалов, содержащих данный радионуклид. Содержание ^{90}Sr в почве в целом соответствовало значениям, определяемым глобальными выпадениями (фоновый уровень в Российской Федерации для ^{90}Sr – 5-10 Бк/кг). Плотность загрязнения почвы (30-см корнеобитаемого слоя) в импактной зоне КАЭС составляла от 110 до 120 Бк/м², что соответствовало фоновым значениям, характерным для территории России.

Переход радионуклидов из почвы в растения является первым звеном в пищевой цепочке их поступления из адиабатических компонентов экосистем в биотические (в т.ч. в организм человека) и определяется типом почв [3]. Считается, что из северных почв, характеризующихся низким плодородием, легким гранулометрическим составом, повышенной кислотностью и низким содержанием кальция радиоактивный стронций более интенсивно переходит в растения. Другим путем поступления ^{90}Sr в состав растительных тканей является загрязнение ассимиляционных органов. Удельная активность ^{90}Sr в растениях 30-км зоны КАЭС находилась в пределах от 2,1 до 40 Бк/кг. Значительным содержанием стронция-90 характеризовались побеги ягодных кустарничков – черники обыкновенной (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) – до 40 Бк/кг. Данное обстоятельство может объясняться интенсивным корневым поглощением изучаемого радионуклида из органогенных почвенных горизонтов, в которых содержание ^{90}Sr максимально. В меньших количествах ^{90}Sr содержался в компонентах древесных растений – ветвях и ассимилирующих органах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы (*Betula pendula* Roth. X *Betula pubescens* Ehrh.) – от 20 до 30 Бк/кг. Это может быть обусловлено незначительным корневым поглощением, поскольку область всасывания у корней деревьев расположена в более глубоких почвенных горизонтах, где содержание ^{90}Sr падает.

На накопление радиоактивного стронция существенное влияние оказывают биологические особенности самих растений. Показано, что даже при низких значениях удельной активности ^{90}Sr в почвенном покрове, коэффициенты его перехода в изучаемые растения были достаточно высоки (до $415 \text{ n} \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для ягодных кустарничков – черники обыкновенной и брусники и до $200 \text{ n} \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для древесных растений – сосны обыкновенной и березы). Данный факт может быть обусловлен чрезвычайной бедностью северных почв обменным кальцием, что повышает биологическую доступность стронция-90 для растений в наземных экосистемах. Повышенные коэффициенты перехода ^{90}Sr из почвы в растения также определяются физико-химической природой радиоактивного стронция. Поскольку ^{90}Sr характеризуется значительным коэффициентом биологического поглощения для растений, то сформированные на иллювиально-железистых северных подзолах лесные биогеоценозы обладают довольно низкой устойчивостью к загрязнению стронцием-90. Поэтому необходимо продолжение изучения особенностей радиоэкологического состояния северных почв.

Плоды дикорастущих кустарничков и грибы являются традиционным фактором питания и пользуются большой популярностью для жителей населенных пунктов Мурманской области – городов Полярные Зори, Апатиты, Кировск, Кандакша, поселков Африканда, Зашеек и др. Кроме того, в последние годы большую популярность в регионе приобретает экологический и этногастрономический туризм, сочетающий в себе возможность сбора дикоросов с последующим их приготовлением в лучших кулинарных традициях местного самобытного населения. Однако, употребление в пищу лесной продукции, содержащей техногенные радионуклиды способно обуславливать дополнительную дозовую нагрузку на человека.

Накопление ^{90}Sr в исследуемых грибах и ягодах варьировало в широких пределах. Способность грибов накапливать стронций-90 определяется особенностями их морфологического строения и физиологической деятельности, агрохимическими свойствами почв, расположением мицелия в системе подстилка-почва [3]. Удельная активность ^{90}Sr для трубчатых (подосиновик желто-бурый – *Leccinum versipelle* (Fr.) Snel.) и пластинчатых (сыроежка болотная – *Russula paludosa* Britzelm) грибов находилась приблизительно на одном уровне и составляла

до 0,2 Бк/кг, что было на несколько порядков ниже обозначенного международными стандартами допустимого уровня – 100 Бк/кг, согласно CODEX STAN 193-1995 и IAEA TECDOC-1788.

Удельная активность ^{90}Sr для дикорастущих ягод черники обыкновенной составляла до 0,45 Бк/кг, а для брусники – до 1,6 Бк/кг. Ягоды брусники накапливали до 2 раз больше данного радионуклида, по сравнению с ягодами черники, что может объясняться физиологическими особенностями ягодных кустарничков. Полученные величины содержания ^{90}Sr в ягодах черники и брусники были на несколько порядков ниже установленного международными стандартами допустимого санитарного уровня – 100 Бк/кг (CODEX STAN 193-1995 и IAEA TECDOC-1788).

Известно, что радионуклиды антропогенного происхождения попадают в пресноводные биоценозы путем непосредственного осаждения на поверхности водоемов или водотоков, при смыве дождевыми и снеговыми осадками с территории водосбора, при сбросах загрязненной воды или при ее протечках в контуре технического водоснабжения на атомных станциях. После поступления в водные объекты, техногенные радионуклиды распределяются в толще воды, сорбируются поверхностью дна, диффундируют в толщу грунтов, поступают в растительные и животные организмы. Перераспределение радионуклидов в водных экосистемах определяется процессами турбулентного переноса, обменными адсорбционными и химическими взаимодействиями с поверхностью взвесей и донных отложений [3]. При оценке качества воды, взятой из основных водоемов, находящихся в исследуемой зоне КАЭС (озер Имандра, Верхняя и Нижняя Пиренга и др.), установлено, что объемная активность ^{90}Sr в них составляла от 1,7 до 2,5 Бк/м³, что не превышало нормативного уровня вмешательства (НРБ-99/2009) и находилось на уровне естественного регионального фона.

Поверхностные процессы, которые происходят в водоемах или водотоках на твердых частицах, являются основным фактором самоочищения водных масс от искусственных радионуклидов, а донные отложения – субстратом для их долговременного захоронения. Однако при изменении внешних условий донные отложения и взвеси могут стать источником вторичного радиоактивного загрязнения водной среды вследствие интенсификации процессов десорбции. Радиоактивный стронций в воде, как правило, находится в растворенном виде. Слабо аккумуляясь гидробионтами, он в течение длительного времени не поступает в состав донных отложений. Уровень удельной активности ^{90}Sr в донных отложениях вышеназванных водоемов не превышал величины 0,2 Бк/кг, что было ниже нормативных показателей удельной активности техногенных радионуклидов, при которых допускается неограниченное использование твердых материалов, в соответствии с ОСПОРБ-99/2010.

Поступление ^{90}Sr в проанализированные компоненты наземных и водных экосистем в пределах зоны потенциального воздействия КАЭС обуславливалось, преимущественно, глобальными выпадениями. Опробование компонентов природной среды по отдельным мониторинговым точкам показало отсутствие зависимости уровня накопления стронция-90 от расстояния до атомной станции, что может свидетельствовать о незначительном ее влиянии на прилегающую территорию.

Таким образом, в результате проведенных исследований была получена новая информация о содержании одного из основных элементов радиоактивного загрязнения биосферы – ^{90}Sr в компонентах наземных и водных экосистем в 30-км зоне потенциального влияния КАЭС. Изучение распределения рассматриваемого радионуклида в почвенно-растительном покрове, поверхностных водах и в донных отложениях показало, что экосистемы изучаемого района радиоактивным стронцием не загрязнены. В то же время необходимо продолжение наблюдения за состоянием уязвимых северных экосистем, особенно в районах расположения потенциально опасных ядерных объектов. В первую очередь, необходимо детальное исследование почв, которые характеризуются здесь невысокой обеспеченностью элементами питания (кальций, калий и др.), вследствие чего даже в условиях низкого содержания в них техногенных радионуклидов, фоновые уровни, обусловленные глобальными выпадениями и их доступность для растений будут достаточно высокими. Изучение параметров накопления растительностью радиоактивных элементов даже в небольших количествах также становится чрезвычайно важным делом, поскольку экосистемы, развитые на бедных почвах, являются крайне уязвимыми для возможного загрязнения их радионуклидами. Радиоэкологические исследования также необходимы для своевременного выявления и предотвращения возможного поступления в экосистемы радиоактивных контаминантов, представляющих опасность для здоровья населения в арктических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Салтыкова, М. М.* Влияние загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения Арктического региона: обзор литературы / М. М. Салтыкова, И. П. Бобровницкий, А. В. Балакаева // Экология человека. – 2020. – № 4. – С. 48–55.
2. *Матишов, Д. Г.* Радиационная экологическая океанология / Д. Г. Матишов, Г. Г. Матишов. – Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2001. – 417 с.
3. *Бахвалов, А. В.* Биогеохимическое поведение ^{90}Sr в наземных и водных экосистемах / А. В. Бахвалов, Г. В. Лаврентьева, Б. И. Сынзыныс // Биосфера. – 2012. – Т. 4. – № 2. – С. 206–216.
4. *Кизеев, А. Н.* Оценка состояния лесных фитоценозов в 30-км зоне Кольской АЭС по наземным и спутниковым данным / А. Н. Кизеев, К. Ю. Силкин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т.14. – №1. – С. 125–135.
5. *Попова, М. Б.* Накопление ^{137}Cs лишайниками рода *Cladonia* в зоне влияния Кольской атомной электростанции / М. Б. Попова [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2022. – Т. 62. – № 5. – С. 543–554.