УДК 550.422:631.41(282.256.166)

БИОГЕННАЯ АККУМУЛЯЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ^{137}Cs И ^{90}Sr РАСТЕНИЯМИ ЭКОСИСТЕМ ПОЙМЫ Р. ТОБОЛ**Кайгородов Р.В.***Тобольская комплексная научная станция УрО РАН, Тобольск, e-mail: r-kaigorodov@yandex.ru*

Исследована удельная активность техногенных изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениях, произрастающих в поймах и прибрежных зонах стариц, расположенных в Тюменской области. Объектами исследований послужили травянистые растения осока острая (*Carex acuta* L.), тысячелистник иволистный (*Achillea salicifolia* Besser), кустарник ива пепельная (*Salix cinerea* L.), древесная форма ивы белой (*Salix alba* L.). Образцы растений (листья древесных форм, кустарников и травянистых растений, кора древесных форм) отбирались сопряженно с почвенными образцами (слой 0–15 см) в поймах р. Тобол и в прибрежной зоне стариц р. Тобол. Исследуемая территория входит в Восточно-Уральский радиоактивный след, связанный с деятельностью предприятия ПО «Маяк», радиационными авариями на данном объекте и неоднократными испытаниями ядерного оружия на прилегающих участках. Удельную активность радионуклидов анализировали на гамма-бета спектрометре «Гамма Плюс» с использованием программного обеспечения «Прогресс-5». В пойме основного русла р. Тобол содержание радионуклидов в наземной биомассе исследуемых травянистых и древесных растений было достоверно выше, чем на участках русла стариц р. Тобол. В исследуемых растениях изотоп ^{137}Cs накапливался более интенсивно, чем ^{90}Sr . Рассчитаны коэффициенты накопления радиоактивных изотопов в золе растений относительно их валового содержания в почве. Как показали результаты, наиболее активной аккумуляцией радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr отличались листья осоки острой и кора стволов ивы белой. Растительность прибрежно-водных участков является важным звеном миграции техногенных радионуклидов в водных экосистемах.

Ключевые слова: техногенные радионуклиды, удельная активность, пойменные экосистемы, прибрежно-водные растения, биогенная аккумуляция

BIOGENIC ACCUMULATION OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr RADIONUCLIDES BY PLANTS OF THE TOBOL RIVER FLOODPLAIN ECOSYSTEMS**Kaygorodov R.V.***Tobolsk complex scientific station of the Ural Branch of the RAS, Tobolsk, e-mail: r-kaigorodov@yandex.ru*

In this study was analyzed the specific activity of technogenic radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in plants of floodplain areas rivers in Tumen Region. The objects of research were herbaceous plants acute sedge (*Carex acuta* L.), yarrow willow-leaf (*Achillea salicifolia* Besser), shrub of gray willow (*Salix cinerea* L.), wood form white willow (*Salix alba* L.). Plant samples were collected in conjunction with soil samples (layer 0 – 15 cm) in the floodplains of the Tobol river and in the coastal zone of the oxbows of river Tobol. The territory under study is a part of the East Ural radioactive trace. Specific activity of technogenic radionuclides was determined on the gamma-beta spectrometer «Gamma Plus» with the software «Progress-5». In the floodplain of the main riverbed of the Tobol river, the content of radionuclides in the aboveground biomass of the studied herbaceous and woody plants was significantly higher than in the sections of the oxbows. In the studied plants, the ^{137}Cs isotope accumulates more intensively than ^{90}Sr . The coefficients of accumulation of radioactive isotopes in plant ash relative to their total content in the soil were calculated. As the results showed, the most active accumulation of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr was distinguished by the leaves of acute sedge and the bark of white willow trunks. Vegetation of coastal water areas is an important link in the migration of technogenic radionuclides in aquatic ecosystems.

Keywords: technogenic radionuclides, specific activity, floodplain ecosystems, coastal water plants, biogenic accumulation

Распределение радиоактивных изотопов в системе «почва – растения» чрезвычайно важно для оценки их миграции в водных и прибрежно-водных экосистемах территорий, подверженных воздействию техногенных процессов.

В одной из наших ранних работ [1] исследована удельная активность изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах прибрежных участков водоемов разного типа Тюменской области. Показано активное накопление радионуклидов в почвах пойм рек на примере р. Тобол, которая связана с другими реками, протекающими по территории Восточно-

Уральского радиоактивного следа, связанного с деятельностью ПО «Маяк» (р. Исеть, р. Теча, р. Миасс) [2]. В почвах прибрежной зоны бессточных водоемов оз. Имбиряй и оз. Чигиркуль наблюдалось минимальное по сравнению с поймами накопление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr благодаря отсутствию гидрохимической связи с реками Восточно-Уральского радиоактивного следа.

Ведущую роль в накоплении ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве, т.е. в механизмах иммобилизации изотопов, ограничивающих их миграцию в другие компоненты пресноводных экосистем (биоту, донные отложения), играют

содержание гумуса, фосфатов, поглотительная способность почвы, обеспеченность калием, кальцием и магнием. Накопление в пойменных почвах радионуклидов может являться фактором вторичного загрязнения речных вод.

Изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr проявляют среднюю радиотоксичность по отношению к человеку и животным [2].

В надземной части растений за счет атмосферного выпадения, а также в результате корневого поглощения наблюдается биогенная аккумуляция техногенных радиоактивных изотопов [3]. Накопление радионуклидов растениями зависит от целого ряда факторов, включая уровень загрязнения, физико-химические свойства почвы, видовые особенности, жизненные формы и экологические группы растений, сезон года, удаленность от уреза воды и др. [4, 5]. С опадом надземной фитомассы может происходить вторичное поступление радиоактивных элементов в почву и другие компоненты (воду, донные отложения, гидробионты) пойменных экосистем [6]. Для характеристики накопления радионуклидов в других, не исследованных нами компонентах водных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа, приведем данные из источников литературы. В воде р. Течи по данным на 2005 г., т.е. через 39 лет после сброса больших объемов радиоактивных отходов, содержание ^{90}Sr составляло 13,6 Бк/л (ПДК 7 Бк/л), содержание ^{137}Cs – 0,6 Бк/л (ПДК для воды не разработаны) [2]. По данным тех же авторов, концентрации радиоактивных изотопов в верхних слоях (слой 0–5 см) донных отложений р. Течи колебались в следующих диапазонах в зависимости от места отбора образцов: для ^{90}Sr 28 – 430 Бк/кг сухой массы, для ^{137}Cs – 19–1050 Бк/кг сухой массы. В организме рыб (карась золотистый – *Carassius*

carassius L.) в р. Тече (110 км от истока) среднее содержание радионуклидов составляло для ^{90}Sr – 340 Бк/кг сырой массы рыбы, для ^{137}Cs – 576 340 Бк/кг сырой массы рыбы. При этом коэффициенты накопления изотопов в биомассе карася составляли для ^{90}Sr – 68, для ^{137}Cs – 600 [2].

Настоящие исследования направлены на оценку аккумуляции радионуклидов в надземных частях прибрежно-водных растений пойм р. Тобол.

Проведен анализ удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в листьях растений, а также в коре некоторых древесных растений, произрастающих в поймах основного русла и стариц р. Тобол. По данным радиационного анализа почв (валовое содержание) и растений были рассчитаны коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в фитомассе (золе растений).

Материалы и методы исследования

Объектами послужили образцы растений разных экологических групп и форм и аллювиальных дерновых слоистых почв, отобранные в пойме основного русла и стариц р. Тобол в июле 2019 г. вблизи некоторых населенных пунктов в юго-западной части Тюменской области (табл. 1).

Из многолетних травянистых растений были исследованы осока острая (*Carex acuta* L.) и тысячелистник иволистный (*Achillea salicifolia* Besser), из кустарников – ива пепельная (*Salix cinerea* L.), из деревьев – ива белая (*Salix alba* L.).

У всех исследуемых растений отбирали листья, у ивы белой дополнительно – кору. Отбор образцов проводили в пятикратной повторности на каждом участке. Отбор образцов почвы проводили на тех же участках, сопряженно с пробами растений в пятикратной повторности на глубине 0–15 см.

Таблица 1

Географическое расположение исследуемых водных объектов и участков отбора растительных и почвенных образцов

№ участка	Тип и название водного объекта	Расстояние участка отбора растений от уреза воды	Ближайшие населенные пункты	Географические координаты
№ 1	Пойма р. Тобол	1–10 м	д. Шашова	N 56.2218, E 66.1744
№ 2	Пойма р. Тобол	1–5 м	с. Упорово	N 56.1824, E 66.1244
№ 3	Старица р. Тобол	1–4 м	с. Новолыбаево	N 56.2923, E 66.2118
№ 4	Старица р. Тобол	1–4 м	с. Ярково	N 57.2359, E 67.0256

Образцы почв высушивали при 105 °С, образцы растений высушивали до воздушно-сухого состояния и затем озоляли при 450 °С в муфельной печи. Перед анализом навески почвенных и растительных образцов подвергали двукратной обработке 2н HCl.

Удельную активность радиоактивных изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs в образцах растений и почвы определяли на гамма-бета спектрометре «Гамма Плюс» с использованием программного обеспечения «Прогресс-5». Математическую обработку результатов проводили в программе «Past 3.16» с использованием методов описательной статистики и дисперсионного метода (наименьшая существенная разность).

Биогенную аккумуляцию радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs растениями прибрежных зон бессточных водоемов (оз. Имбиряй и оз. Чигиркуль) не исследовали в связи с их минимальным накоплением в почвенном покрове и отсутствием прямой геохимической связи этих участков с водоемами Восточно-Уральского радиоактивного следа.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследованные растения относятся к экологической группе прибрежно-водных макрофитов с высокой и умеренно активной интегральной встречаемостью в поймах рек южно-таежной зоны Обь-Иртышского бассейна [7]. Растения относились также к разным жизненным формам: травянистые, кустарники и деревья. В табл. 2 представлены

данные по удельной активности радионуклидов в растениях исследуемых участков поймы и стариц р. Тобол.

Как показали результаты, в исследованных участках поймы р. Тобол накопление изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs в надземной фитомассе исследованных видов растений в 2–2,5 раза выше, чем в поймах аналогичных видов в прибрежной зоне стариц р. Тобол.

Изотоп ^{137}Cs аккумулируется растениями более активно по сравнению со ^{90}Sr . У исследованных растительных объектов повышенное накопление изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs отмечено в коре ивы белой и в листьях осоки острой. В отношении биологических объектов ПДК радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr разработаны только для оценки безопасности лекарственных растений (табл. 2) [8]. Накопление исследованными растениями стронция свыше ПДК наблюдалось только у осоки острой и в коре ивы белой в пойме основного русла р. Тобол. Содержание изотопа ^{137}Cs в пойме р. Тобол и в прибрежной зоне стариц выше фармакопейной ПДК отмечено в листьях осоки острой и в коре ивы белой.

Согласно данным других авторов, растения из группы прибрежно-водных макрофитов накапливают ^{90}Sr и ^{137}Cs существенно меньше, чем растения из группы водных растений. Так, нитчатые зеленые водоросли рода кладофора (*Cladophora* Kütz.) на некоторых участках р. Течи, протекающей по территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, могут накапливать ^{90}Sr до 711 Бк/кг сухой массы [2].

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов в золе растений пойменных участков и стариц р. Тобол, Бк/кг

Место отбора растений	Вид растений	^{90}Sr	^{137}Cs
Пойма р. Тобол участок	Осока острая	278 ± 12	1112 ± 19
	Тысячелистник иволистный	109 ± 7	313 ± 11
	Ива белая	95 ± 5	252 ± 9
	Ива белая (кора)	342 ± 13	1251 ± 21
	Ива пепельная	88 ± 7	194 ± 11
Пойма стариц р. Тобол	Осока острая	104 ± 8	447 ± 15
	Тысячелистник иволистный	49 ± 5	84 ± 7
	Ива белая	51 ± 4	57 ± 9
	Ива белая (кора)	135 ± 12	338 ± 9
	Ива пепельная	47 ± 6	97 ± 11
НСР ₀₅		17	23
Допустимая удельная активность, не более [8]		200	400

Таблица 3

Коэффициенты накопления радионуклидов в растениях
пойменных участков и стариц р. Тобол

Место отбора растений	Вид растений	^{90}Sr	^{137}Cs
Пойма р. Тобол участок	Осока острая	7,5	90
	Тысячелистник иволистный	3	25,5
	Ива белая (листья)	2,5	20,5
	Ива белая (кора)	9	102,5
	Ива пепельная	2,5	16
Пойма стариц р. Тобол	Осока острая	8,5	64
	Тысячелистник иволистный	4	12
	Ива белая (листья)	4	8
	Ива белая (кора)	10,5	49
	Ива пепельная	4	14

Удельную активность техногенных изотопов анализировали в верхнем слое почв глубиной 0–15 см, поскольку повышенная аккумуляция данных радионуклидов наблюдается в верхних почвенных горизонтах и существенно снижается в глубоких слоях [2]. В настоящей статье данные по удельной активности радионуклидов в почвах пойм р. Тобол не приводятся, поскольку они подробно представлены в одной из наших ранних работ [1].

По данным анализа радионуклидов в золе растений и в почвах, отобранных сопряженно в пределах каждого участка, были рассчитаны коэффициенты накопления изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs в исследуемых видах, произрастающих в прибрежных зонах разного типа: южно-таежных участках поймы основного русла и стариц р. Тобол. Таким образом, коэффициент накопления представляет собой отношение удельной активности изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs в золе растения к удельной активности радионуклидов в почве.

В условиях гидроморфных (пойменных) экосистем наблюдалась интенсивная биогенная аккумуляция радионуклидов исследуемыми видами растений. Коэффициенты накопления ^{90}Sr варьировали от 2,5 до 10,5, ^{137}Cs – от 8 до 102,5 (табл. 3). По данным других исследователей, коэффициенты накопления у элодеи (группа водных растений) существенно выше и составляют в среднем для ^{90}Sr – 1371 и ^{137}Cs – 3435 [2].

Наиболее высокие коэффициенты накопления радионуклидов установлены нами в листьях осоки острой и в коре ивы белой.

Данные литературы по дифференциации радионуклидов в органах растений неоднозначны. Одни авторы отмечают повышенное содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в листьях

деревьев и трав по сравнению со стволами древесных форм [5], по данным других исследователей, наиболее загрязненными изотопами ^{90}Sr и ^{137}Cs являются наружные (кожица и пробка) и внутренние слои (лубяные волокна и флоэма) коры древесных растений (дуба, ольхи, липы) [6]. Вероятно, существенное влияние на распределение радионуклидов в органах и тканях растений оказывают путь их миграции (атмосферные выпадения, грунтовые и поверхностные воды) в той или иной экосистеме и, соответственно, корневой или внекорневой механизм поглощения растениями.

Заключение

Как показали результаты исследований, техногенные радиоактивные изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr активно накапливаются в надземных вегетативных органах прибрежно-водных растений, произрастающих в поймах р. Тобол. Накопление радионуклида ^{137}Cs происходит более интенсивно по сравнению с изотопом ^{90}Sr .

Исследуемые растения проявили видовые особенности в накоплении ^{137}Cs и ^{90}Sr и их распределении по органам.

Наиболее высокая биогенная аккумуляция установлена в листьях осоки острой и в коре ивы белой. Вероятно, высокое накопление радионуклидов в коре ивы белой можно объяснить удалением токсичных элементов в ткани растений с низкой метаболической нагрузкой. В случае осоки высокое накопление изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr связано, вероятно, с постоянным контактом с речными и поверхностными водами поймы, содержащими радионуклиды, поступающие из рек Восточно-Уральского радиоактивного следа. Минимальное накопление

^{137}Cs и ^{90}Sr установлено в листьях ивы белой и тысячелистника иволистного. Исследованные виды растений проявляют высокую и умеренно активную интегральную встречаемость в пойменных экосистемах рек Обь-Иртышского бассейна и могут представлять собой источник вторичного поступления радионуклидов с опадом фитомассы.

Несмотря на длительный период, прошедший с момента радиационных катастроф и испытания ядерного оружия, согласно результатам наших исследований и данным других авторов, в экосистемах пресноводных водоемов на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа отмечаются повышенная геохимическая миграция и биогенная аккумуляция техногенных радионуклидов. Территория нуждается в периодическом мониторинге радиационной обстановки.

Продолжение исследований видится нам в расширении числа исследуемых экологических групп и видов растений, изучении распределения радионуклидов в органах и тканях растений, а также в изучении сезонной и многолетней динамики радиационной обстановки в компонентах пресноводных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа и сопряженных территорий.

Статья подготовлена при финансовой поддержке ФАНО России в рамках темы «Антропогенная трансформация пойменных экосистем Обь-Иртышского бассейна» (№ НИОКТР АААА-А19-119012190088-0).

Список литературы / References

1. Кайгородов Р.В. Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах прибрежных зон водных объектов Тюменской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 9. С. 66–70.
2. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Том I. Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2014. 496 с.
3. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Radio-ecological monitoring of freshwater ecosystems. Volume I. Ekaterinburg: Izd-vo «AkademNauka», 2014. 496 p. (in Russian).
4. Мешкина С.С. Радионуклиды в растениях долины Средней Катуни // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 4 (23). С. 285–286.
5. Meshkinova S.S. Radioactive nuclides in plants of the Mid Katun valley // Mir nauki, kultury, obrazovaniya. 2010. Vol. 4 (23). P. 285–286 (in Russian).
6. Молчанова И.В., Михайловская Л.Н., Позолотина В.Н., Антонова Е.В. Техногенные радионуклиды в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа и их накопление растениями разных таксономических групп // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54. № 1. С. 77–84.
7. Molchanova I.V., Mihajlovskaja L.N., Pozolotina V.N., Antonova E.V. Man-Made radionuclides and their accumulation by plants of different taxonomic groups from the soils of the Eastern Ural radioactive trace // Radiacionnaja biologija. Radioecologija. 2014. Vol. 54. No. 1. P. 77–84 (in Russian).
8. Михайловская Л.Н., Гусева В.П., Руковишников О.В., Михайловская З.Б. Техногенные радионуклиды в почвах и растениях наземных экосистем в зоне воздействия атомных предприятий // Экология. 2020. № 2. С. 110–118.
9. Mihajlovskaja L.N., Guseva V.P., Rukovichnikova O.V., Mihajlovskaja Z.B. Technogenic radionuclides in soils and plants of terrestrial ecosystems in the zone of impact from nuclear enterprises // Ecologija. 2020. No. 2. P. 110–118 (in Russian).
10. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Роль лесных экосистем при радиоактивном загрязнении // Природа: Ежемесячный естественнонаучный журнал РАН. 2001. № 4. С. 23–33.
11. Scheglov A.I., Cvetnova O.B. Role of forest ecosystems in radioactive contamination // Priroda: Ezhemesjachnyj estestvennonauchnyj zhurnal RAN. 2001. No. 4. P. 23–33 (in Russian).
12. Прокопьев Е.П. Итоги изучения растительного покрова поймы реки Иртыш // Сибирский ботанический журнал. 1999. Т. 1. № 1. С. 78–91.
13. Prokopjev E.P. Results of studying the vegetation cover in floodplain of the Irtysh river // Sibirskij botanicheskij zhurnal. 1999. Vol. 1. No. 1. P. 78–91 (in Russian).
14. Государственная фармакопея Российской Федерации XIII изд. Т. 2 (ОФС 1.5.3.0001.15). М., 2015. С. 355–375.
15. The State pharmacopoeia of the Russian Federation. 13th ed. V. 2 (OFS 1.5.3.0001.15). M., 2015. P. 355–375 (in Russian).