

УДК 550.422:631.41(571.12)

УДЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДОВ ^{137}CS И ^{90}SR В ПОЧВАХ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ**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 почвах пойм и прибрежных зон водоемов разного типа (реки, старицы, озера), расположенных в Тюменской области. Образцы почв (слой почвы глубиной 0–15 см) отбирались в поймах р. Тобол, в прибрежной зоне стариц р. Тобол, а также оз. Имбиряй и Чигиркуль. 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». Установлены разные уровни удельной активности радионуклидов в поверхностном слое почв, прилегающих к водным объектам разного типа. Максимальная удельная активность обнаружена в почвах, прилегающих к поймам р. Тобол, минимальная – в почвах прибрежной зоны оз. Имбиряй и Чигиркуль. Проведен анализ химических и физико-химических свойств почвы, для выявления факторов иммобилизации радионуклидов в почвенном покрове. Проведен корреляционный анализ между удельной активностью радионуклидов в исследованных почвах и агрохимическими свойствами почв (содержание гумуса, pH, емкость катионного обмена, содержание калия, кальция, магния, фосфатов). Отдельные агрохимические свойства почвы проявляли разную степень корреляции с удельной активностью радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr . Таким образом, изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr наиболее активно мигрируют и накапливаются в пойменных участках. Основными факторами иммобилизации ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве выступают содержание гумуса, фосфатов, а также поглощательная способность. Фактором снижения активности радионуклидов является антагонизм с ионами Ca^{2+} и Mg^{2+} в случае ^{90}Sr и с ионами K^{+} в случае ^{137}Cs .

Ключевые слова: техногенные радионуклиды, удельная активность, пойменные почвы, прибрежные зоны водоемов, агрохимические свойства

THE SPECIFIC ACTIVITY OF RADIONUCLIDES ^{137}CS AND ^{90}SR IN THE SOILS OF THE COASTAL ZONES OF WATER OBJECTS OF THE TYUMEN REGION**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 soils of alluvial and floodplain areas rivers, oxbows and lakes in Tyumen Region. Soil samples (a layer of soil 0-15 cm deep) were collected in the floodplains of the Tobol river, in the coastal zone of the oxbows of river Tobol, as well as lakes Imbiryai and Chigirkul. The territory under study is part of the East Ural radioactive trace associated with the activities of enterprise «PO Mayak», radiation accidents at this facility, and repeated tests of nuclear weapons in the surrounding areas. Specific activity of technogenic radionuclides was determined on the gamma-beta spectrometer «Gamma Plus» with the software «Progress-5». Different levels of specific activity of radionuclides in the surface layer of soils adjacent to water objects of different types were established. The maximum specific activity was found in the soils adjacent to the floodplains of the Tobol river, the minimum specific activity was determined in the soils of the coastal zone of lakes Imbiryai and Chigirkul. The analysis of chemical and physical-chemical properties of the soil was carried out to identify the factors of immobilization of radionuclides in the soils. A correlation analysis was performed between the specific activity of radionuclides in the studied soils and the agrochemical properties of soils (content of humus, acidity, cation exchange capacity, content of potassium, calcium, magnesium and phosphates). Different agrochemical properties of the soil showed different degrees of correlation with the specific activity of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr . The ^{137}Cs and ^{90}Sr isotopes are most actively migrating and accumulating in floodplain areas of river Tobol. The main factors of immobilization of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the soil are the content of humus, phosphates, and cation exchange capacity. Factors that reduce the activity of radionuclides are antagonism with Ca^{2+} and Mg^{2+} ions in the case of ^{90}Sr and with K^{+} ions in the case of ^{137}Cs .

Keywords: technogenic radionuclides, specific activity, floodplain soils, coastal zones of reservoirs, agrochemical properties

Стабильность химического состава и радиационного фона, наряду с ландшафтно-климатическими условиями среды обитания живых организмов, является основным условием устойчивости и нормального функционирования экосистем и биосферы в целом [1]. Под влиянием антропогенной

деятельности происходит нарушение геохимической миграции веществ, что приводит к накоплению в верхних частях литосферы тяжелых металлов и радиоактивных элементов и к нарушению устойчивости и ухудшению санитарно-гигиенического состояния почв и водных объектов. Одними из наи-

более опасных загрязнителей выступают радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr . Естественными источниками ^{137}Cs и ^{90}Sr являются магматические горные породы. При выветривании пород элементы Cs и Sr осаждаются в глинистых почвах и органическом веществе. В результате антропогенной деятельности, в качестве побочных продуктов атомной энергетики, техногенные ^{137}Cs и ^{90}Sr активно внедряются в среду обитания, представляя собой экологическую опасность. Помимо атомной энергетики ^{90}Sr широко используется в разных отраслях промышленности: стабилизация медных сплавов, производство фотоэлементов, пиротехнических изделий, красок, в цементном производстве. В результате увеличиваются масштабы его рассеивания в окружающей среде [2]. Крупные радиационные катастрофы на ПО «Маяк» в 1957 и 1967 гг., многократные испытания ядерного оружия оказали негативное воздействие на радиационную обстановку в Восточно-Уральском регионе. По речным системам, включая исследуемую в настоящей работе водосборную территорию р. Теча, Исеть, Тобол, Миасс и др., техногенные радионуклиды мигрируют на большие расстояния, депонируются в донных отложениях, гидробионтах и пойменных почвах [3].

Длительный период полураспада (^{137}Cs – 30 лет, ^{90}Sr – 29 лет) – способствует аккумуляции в компонентах окружающей среды. Изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr входят в группу радионуклидов со средней радиотоксичностью для животных и человека [4]. Поступая на земную поверхность, ^{137}Cs и ^{90}Sr активно накапливаются растениями, а в водоемах гидробионтами. Вторичным источником ^{137}Cs и ^{90}Sr в наземных экосистемах служит отмирающая биомасса растений, с которой радионуклиды поступают в подстилку и почву. В почвенном покрове ^{137}Cs и ^{90}Sr депонируются главным образом в органической части и во фракциях гранулометрического состава физической глины и ила [5].

Наиболее уязвимыми к загрязнению радионуклидами являются экосистемы, расположенные в пониженных элементах рельефа: аквальные, супераквальные, аккумулятивные ландшафты, где происходит накопление загрязняющих, в том числе радионуклидов, веществ [6].

Настоящие исследования направлены на оценку характера миграции радионуклидов в зависимости от типа водного объекта, химического состава и физико-химических свойств почв в прибрежной зоне.

В настоящей работе исследована удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в верхних слоях почв прибрежных экосистем водоемов Тюменской области. Стандартными методами изучена удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах участков, прилегающих к водным объектам разного типа: реки, старицы рек и озера. Выполнен анализ физико-химических свойств и химического состава почв прибрежных территорий и проведен корреляционный анализ между удельной активностью ^{137}Cs и ^{90}Sr и свойствами почв.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов использованы образцы почв из прибрежных зон водных объектов разного типа: река, старица и озеро, отобранные в июле 2019 г. вблизи некоторых населенных пунктов в юго-западной части Тюменской области (табл. 1). В пределах каждого участка отбирали по 5 почвенных образцов с глубины 0–15 см, анализ удельной активности радиоактивных изотопов и агрохимических свойств почвы проводили в пятикратной повторности для каждого из участков. Для определения типа почвы в пределах каждого участка закладывали почвенный разрез и проводили его морфологическое описание.

Радиологический анализ проб – удельную активность радиоактивных изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs – проводили на гамма-бета спектрометре «Гамма Плюс» с использованием программного обеспечения «Прогресс-5».

Исследование химических и физико-химических свойств почв проводили стандартными методами. Содержание кальция и магния анализировали комплексонометрическим методом, содержание подвижных фосфатов и калия – методом Кирсанова, содержание гумуса – по методу И.В. Тюрина. Актуальную и обменную кислотность определяли методом рН-метрии на приборе «Экотест-120». Гидролитическую кислотность определяли по методу Каппена. Емкость катионного обмена (ЕКО) вычисляли расчетным способом (сумма содержания ионов кальция, магния и гидролитической кислотности). Гранулометрический состав определяли ситовым и седиментационными методами.

Математическую обработку результатов проводили в программе Past 3.16 с использованием методов описательной статистики, дисперсионного (наименьшая существенная разность) и корреляционного (коэффициент корреляции Пирсона) анализа.

Таблица 1

Географическое расположение исследуемых водных объектов и участков отбора почвенных образцов

№ объекта	Тип и название водного объекта	Расстояние участка отбора проб от уреза воды (тип почвы)	Ближайшие населенные пункты	Географические координаты
№ 1	р. Тобол	10 м (аллювиальная дерновая слоистая)	д. Шашова	N 56.2218, E 66.1744
№ 2	р. Тобол	5 м (аллювиальная дерновая слоистая)	с. Упорово	N 56.1824, E 66.1244
№ 3	старица р. Тобол	4 м (аллювиальная дерновая слоистая)	с. Новолыбаево	N 56,2923, E 66,2118
№ 4	старица р. Тобол	4 м (аллювиальная дерновая слоистая)	с. Ярково	N 57,2359, E 67,0256
№ 5	оз. Имбиряй	10 м (дерново-глеявая)	г. Ялуторовск	N 56,3915, E 66,2150
№ 6	оз. Чигиркуль	10 м (дерново-глеявая)	с. Новотьялово	N57,0050, E66,3344

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов в почвах прибрежных участков исследованных водоемов, Бк/кг

Исследуемый объект	⁹⁰ Sr (мин.-макс.)	¹³⁷ Cs (мин.-макс.)
р. Тобол, участок № 1	41,6 ± 7,7 (24,5–70,2)	14,2 ± 2,0 (9,7–20,5)
р. Тобол, участок № 2	36,0 ± 7,0 (20,5–60,1)	10,6 ± 1,6 (6,9–15,6)
старица р. Тобол, участок № 3	12,3 ± 1,2 (9,4–15,6)	6,0 ± 0,5 (4,1–7,0)
старица р. Тобол, участок № 4	13,4 ± 1,5 (7,8–16,1)	7,7 ± 1,1 (4,0–10,4)
оз. Имбиряй, участок № 5	4,0 ± 1,2 (1,7–7,4)	2,0 ± 0,7 (0,5–7,1)
оз. Чигиркуль, участок № 6	5,2 ± 1,1 (2,8–9,1)	1,8 ± 0,4 (0,9–3,2)
Глобальный фон	5–20 [4]	
НСР	17,4	4,5

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 представлены средние значения, стандартные ошибки и диапазон от минимального до максимального значения удельной активности радионуклидов в пяти точечных образцах в пределах каждого исследованного участка почвенного покрова, прилегающего к водным объектам. В настоящее время в России не разработаны нормативы содержания и удельной активности радионуклидов в почвах [7]. В связи с этим для оценки уровней удельной активности радионуклидов нами использовались данные по их глобальному фону.

Удельную активность техногенных изотопов анализировали в верхнем слое почв глубиной 0–15 см, поскольку по данным разных авторов отмечается повышенная аккумуляция данных радионуклидов в верхних почвенных горизонтах и ее резкое снижение с глубиной [3].

Как показали результаты, удельная активность ⁹⁰Sr в почвах пойменных участков р. Тобол была максимальной, по сравнению с прибрежными зонами исследованных во-

доёмов других типов (стариц и озер), при этом превышала естественный глобальный фон, установленный для изотопа. Аналогичная ситуация была характерна для удельной активности ¹³⁷Cs (табл. 2). Достоверность различий удельной активности изотопов в почвах, прилегающих к разным типам водных объектах, подтверждена показателем НСР. Река Тобол, наряду с р. Теча, Исеть, Миасс и др., является частью речной системы, подверженной воздействию ядерного предприятия «Маяк», и входит в так называемый Восточно-Уральский радиоактивный след [3]. Наименьшая активность исследуемых изотопов установлена в почвах, прилегающих к оз. Имбиряй и Чигиркуль. Вероятно, характер рельефа и интенсивность паводковых явлений водных объектов разного типа также обуславливают неодинаковую интенсивность накопления техногенных изотопов на исследуемых участках.

Существенную роль в аккумуляции радионуклидов в почвах, прилегающих к водоемам, играют агрохимические свойства почв. Состав и свойства почв исследованных участков представлены в табл. 3.

Таблица 3

Агрохимические показатели исследованных почв

Показатель (n = 5)	Тип водного объекта и почвы		
	р. Тобол (аллювиальная дерновая слоистая)	старицы р. Тобол (аллювиальная дерновая слоистая)	оз. Имбиряй и оз. Чигиркуль (дерново-глеевая)
Гумус, %	4,9 ± 0,15	4,6 ± 0,10	3,5 ± 0,09
pH вод.	6,6 ± 0,25	5,6 ± 0,18	4,8 ± 0,14
pH сол.	5,3 ± 0,12	4,8 ± 0,17	4,5 ± 0,16
ЕКО, мг-экв/100 г	27,5 ± 1,02	18,8 ± 0,58	15,2 ± 0,79
Ca ²⁺ , мг-экв/100 г	15,9 ± 0,93	13,4 ± 0,85	9,3 ± 0,28
Mg ²⁺ , мг-экв/100 г	5,0 ± 0,58	3,8 ± 0,47	3,6 ± 0,39
K ₂ O, мг/100 г	27,0 ± 1,12	25,4 ± 1,09	22,6 ± 1,25
P ₂ O ₅ , мг/100 г	84,6 ± 2,14	33,5 ± 1,15	16,4 ± 0,98
Гранулометрический состав	Легкий суглинок	Легкий суглинок	Средний суглинок

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между удельной активностью радионуклидов и агрохимическими свойствами почв

Агрохимический показатель	Удельная активность радионуклида	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Содержание гумуса	+0,47	+0,97
pH вод	-0,39	+0,65
pH сол	-0,63	+0,70
Гидролитическая кислотность	+0,57	-0,42
Емкость катионного обмена	+0,55	+0,25
Содержание Ca ²⁺	-0,56	-0,14
Содержание Mg ²⁺	-0,42	-0,06
Содержание K ₂ O	-0,19	-0,58
Содержание P ₂ O ₅	+0,69	+0,43

Как показали результаты, исследуемые почвы существенно отличались друг от друга по агрохимическим свойствам. Так, содержание гумуса в поймах и старицах р. Тобол соответствовало среднему уровню, в поймах озер – низкому. Уровень кислотности менялся от нейтрального в поймах р. Тобол до резко кислого в почвах, прилегающих к озерам. ЕКО почв всех участков была умеренно низкой. Содержание кальция изменялось от повышенного в поймах и старицах до среднего у озер. Содержание магния, соответственно, было очень высоким и высоким. Обеспеченность калием на всех участках была очень низкой, содержание фосфатов колебалось от среднего до очень низкого. Согласно данным из литературы, основными свойствами почв, обуславливающими фиксацию радионуклидов, выступают содержание гумуса, уровень кислотности, обеспеченность кальцием, магнием

и фосфатами [8]. По гранулометрическому составу исследуемые почвы относились к типам легких и средних суглинков.

Корреляционный анализ удельной активности изотопов и агрохимических свойств в исследованных образцах почвы выявил определенные закономерности в факторах иммобилизации нуклидов в почве (табл. 4).

Оба изотопа проявляли повышенную удельную активность при увеличении в почве доли гумуса, особенно в случае изотопов ¹³⁷Cs, при росте емкости катионного обмена, особенно в случае изотопов ⁹⁰Sr. Изменение уровня кислотности почвы в зависимости от катиона по-разному влияло на их удельную активность. С повышением кислотности почвы или снижением щелочности удельная активность изотопа ¹³⁷Cs падала, активность изотопа ⁹⁰Sr увеличивалась. Отрицательную корреляцию изотопы

^{90}Sr проявляли с содержанием в почве ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , изотопы ^{137}Cs – с содержанием ионов K^+ , что подтверждается данными исследований других авторов [7]. Сильную положительную корреляцию удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr проявляла с содержанием фосфатов в почве. Гранулометрический состав почв исследуемых участков существенным образом не отличался, в связи с чем корреляцию этого показателя с удельной активностью изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr не определяли.

Заключение

Таким образом, техногенные радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr наиболее активно накапливаются в пойменных почвах речных систем, являющихся одним из основных механизмов миграции изотопов от антропогенных источников в депонирующие компоненты ландшафтов. Факторами иммобилизации радиоактивных изотопов в почвах выступают гумус, поглотительная способность почвы, содержание фосфатов.

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. Добровольский В.В. Основы биогеохимии: учеб. пособие для геогр., биол., геолог., с.-х. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
Dobrovolskiy V.V. Basics of biogeochemistry. M: Vysshaya shkola, 1998. 413 p. (in Russian).
2. Ашинов Ю.Н., Схашок Ф.Ю. Радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr пахотных почвах Адыгеи // Новые технологии. 2013. № 1. С. 56–59.
Ashinov Yu.N., Skhashok F.Yu. Radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in arable soils in Adygea // Novye tehnologii. 2013. № 1. P. 56–59 (in Russian).
3. 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.
Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. Radio-ecological monitoring of freshwater ecosystems. Volume I. Ekaterinburg: AkademNauka. 2014. 496 p. (in Russian).
4. Бахур А.Е. Новые методические рекомендации по подготовке проб и измерениям суммарной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов в пробах пресных и минерализованных природных вод // АНРИ. 2009. № 1 (56). С. 47–48.
Bakhur A.E. New guidelines for sample preparation and measurement of total activity of alpha-and beta-emitting radionuclides in samples of fresh and mineralized natural waters // ANRI. 2009. № 1 (56). P. 47–48 (in Russian).
5. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Шуктомова И.И. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно- и среднетаежных подзон республики Коми // Почвоведение. 2017. № 7. С. 824–829.
Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Shuktomova I.I. Artificial and natural radionuclides in the soils of the southern and middle taiga subzones in republic Komi // Pochvovedenie. 2017. № 7. P. 824–829 (in Russian).
6. Бахвалов А.В., Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И. Биогеохимическое поведение ^{90}Sr в наземных и водных экосистемах // Биосфера. 2012. Т. 4. № 2. С. 206–216.
Bakhvalov A.V., Lavrenteva G.V., Synsynys B.I. Biogeochemical behavior of ^{90}Sr in terrestrial and aquatic ecosystems // Biosfera. 2012. Vol. 4. № 2. P. 206–216 (in Russian).
7. Болдырев В.В., Водолазко А.Н. Радионуклиды стронций-90 и цезий-137 в пахотном слое почв сухостепной зоны Волгоградской области // Научно-практические пути повышения экологической устойчивости и социально-экономического обеспечения сельскохозяйственного производства: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной году экологии в России. 2017. С. 475–478.
Boldyrev V.V., Vodolazko A.N. Strontium-90 and caesium-137 radionuclides in the arable soil layer of the dry-steppe zone of the Volgograd region // Nauchno-prakticheskie puti povysheniya ekologicheskoy ustojchivosti i socialno-ekonomicheskoe obespechenie selkhozaystvennogo proizvodstva: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyaschennoj godu ekologii v Rossii. 2017. P. 475–478 (in Russian).
8. Кайзер М.И. Цезий-137 в почвах Северо-Восточного Алтая // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной столетию заповедной системы России. Отв. ред. Т.В. Яшина. 2017. С. 77–81.
Kajzer M.I. Caesium-137 in the soils of the North-Eastern Altai // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyaschennoj stoletiyu zapovednoj sistemy Rossii. Отв. ред. Т.В. Яшина. 2017. P. 77–81 (in Russian).