

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



КОЗЫРЕВ ДЕНИС АНДРЕЕВИЧ

**УДЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДОВ ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K И ^{137}Cs В ПОЧВАХ
РОСТОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ**

1.5.19. Почвоведение (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2023

Работа выполнена на кафедре почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии
биологии и биотехнологии имени Д.И. Ивановского
Южного федерального университета

Научный руководитель:

Горбов Сергей Николаевич,

доктор биологических наук,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет», Академия биологии
и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, кафедра ботаники,
профессор

Официальные оппоненты:

Захарихина Лалита Валентиновна

доктор биологических наук,
федеральное государственное бюджетное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
«Субтропический научный центр Российской академии
наук», лаборатория геоэкологии и природных процессов,
главный научный сотрудник

Назаренко Ольга Георгиевна

доктор биологических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное учреждение
государственного центра агрохимической службы
«Ростовский», директор

Защита диссертации состоится **26 декабря 2023 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.01 по биологическим наукам на базе Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, к. 712.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21 Ж и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1319523/>

Автореферат разослан «__» ____ 2023 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 804, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ 801.01.01 Тимошенко А.Н., а также в формате pdf на e-mail: atimoshenko@sfedu.ru

Ученый секретарь
Диссертационного совета

Тимошенко Алена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Ежегодно в результате деятельности человека в окружающую среду поступает значительное количество органических и неорганических соединений (Sonowal et al., 2018), часть из которых может быть ассоциирована с радиоактивными веществами. Токсичные соединения проникают в животные и растительные организмы планеты посредством механизмов поглощения и сорбции (Vinichuk et al., 2003; Воронов, Санжарова, 2017; Krmar et al., 2017) с последующим перемещением по пищевым цепям. Процессы миграции радионуклидов в экосистемах изучены прежде всего для естественных ценозов, антропогенно-преобразованные и урболандшафты оставались до последнего времени за пределами детальных изысканий, в то время как именно здесь эти процессы представляют максимальную угрозу для здоровья человека.

Вопросы содержания радионуклидов в почвах затронуты в большом количестве работ (Переволоцкая и др., 2016; Meng et al., 2020; Анисимов, 2021; Yu et al., 2021; Liu et al., 2021), однако недостаточно исследований об особенностях накопления и миграции РН в условиях урбопедогенеза в сравнении с почвами особо охраняемых природных территорий. В связи с этим становятся актуальными работы, посвященные радиологическому мониторингу урбанизированных экосистем, а также изучению пространственной и внутрипочвенной миграции естественных и искусственных радионуклидов и закономерностей перемещения их в следующие звенья биогеоценоза.

Цель исследования определение и оценка удельной активности естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K) и искусственного ^{137}Cs в почвенном покрове и травянистой растительности Ростовской агломерации и прилегающих особо охраняемых природных территориях Ростовской области.

В задачи исследования входило:

1. Изучить удельную активность и профильное распределение естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в антропогенно-преобразованных и естественных почвах Ростовской агломерации в сравнении с почвами прилегающих ООПТ;
2. Изучить удельную активность и профильное распределение искусственного ^{137}Cs в антропогенно-преобразованных и естественных почвах Ростовской агломерации в сравнении с почвами прилегающих ООПТ;
3. Выявить взаимосвязь профильного распределения активности радионуклидов с физико-химическими свойствами естественных и антропогенно-преобразованных почв и их диагностических горизонтов;
4. Исследовать концентрацию радионуклидов в образцах травянистых растений и оценить подвижность радионуклидов в экосистеме с использованием коэффициента биологического накопления.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На уровне иллювиальных горизонтов черноземов миграционно-сегрегационных, как городской черты, так и территорий ООПТ происходит уменьшение удельной активности естественных радионуклидов. В профиле естественных городских почв отмечена взаимосвязь концентрации радионуклидов с гранулометрическим составом, pH почвенной суспензии.
2. Удельная активность радионуклидов в профиле антропогенно-преобразованных почв городских территорий отличается от естественных и характеризуется неравномерным

распределением, что сопряжено с двучленностью профиля, консервацией естественных горизонтов под антропогенной толщей и генезисом горизонтов урбик.

3. Распределение активности искусственного радионуклида ^{137}Cs в профиле городских почв сопряжено прежде всего с гранулометрическим составом, что подтверждается наличием достоверных корреляций его активности с физической глиной и физическим песком, на фоне отсутствия корреляции с органическим углеродом в поверхностной антропогенной толще.

4. Коэффициент биологического накопления ^{40}K и ^{137}Cs в травянистых растениях, сформированных на естественных городских почвах и почвах ООПТ, превышает 1,0 и возрастает с увеличением расчетной мощности корнеобитаемого слоя. Коэффициенты биологического поглощения ^{226}Ra и ^{232}Th свидетельствуют о неспособности травянистых растений к их накоплению, независимо от глубины проникновения корневых систем.

Научная новизна. Впервые было проведено подробное мониторинговое исследование, отражающее специфику удельной активности радионуклидов в почвенном покрове территории Ростовской агломерации в сравнении с ООПТ Ростовской области. На основании большого массива данных были исследованы основные статистические критерии содержания естественных и искусственных радионуклидов по горизонтам, а также выявлены закономерности их профильного распределения.

Впервые определена удельная активность естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K) и искусственного радионуклида ^{137}Cs в травянистых формациях г. Ростов-на-Дону, установлены особенности вариации данных радионуклидов в растительном материале.

Теоретическая значимость. Полученные данные могут рассматриваться как эталонные значения, подтверждающие отсутствие на изученных городских территориях последствий глобального влияния экологических катастроф. Информация об активности искусственного радионуклида ^{137}Cs является в свою очередь ноль-моментом для дальнейшего мониторинга почвенного покрова городских территорий.

Практическая значимость.

Данные, полученные в настоящем исследовании, могут послужить информационной базой и основой для учета изменений концентрации радионуклидов в естественных и антропогенно-преобразованных почвах Ростовской агломерации и прилегающих целинных почвах особо охраняемых природных территорий. В то же время полученные данные позволят отслеживать степень воздействия антропогенной деятельности на почвенный покров и прогнозировать возможные экологические проблемы и последствия, вытекающие из нерационального использования земель и возникающие на фоне возрастающих рисков применения в смежных регионах тактического ядерного оружия.

Личный вклад автора. При выполнении данного исследования автор принимал непосредственное участие в экспедициях по закладке полнопрофильных разрезов и отбору почвенных проб. Диссертантом были проведены: пробоподготовка образцов отбора 2016–2023 годов, проведение аналитических исследований, анализ результатов и статистическая обработка полученных данных.

Степень достоверности и апробация результатов.

Было заложено более 50 полнопрофильных почвенных разрезов, отобрано, подготовлено и проанализировано более 300 почвенных и растительных образцов. Из них 90 образцов особо охраняемых природных территорий (ООПТ), 120 образцов естественных почв города и 95 образцов антропогенно-преобразованных почв. Представленный объем обработанных данных

позволяет получить репрезентативную картину об активности радионуклидов в почвах Ростовской агломерации и прилегающих естественных ландшафтах.

Основные положения были представлены на конференциях всероссийского и международного уровней. Москва: «Ломоносов» (2016-2023), «Monitoring, modeling and managing of urban soils and green infrastructure», Smart and Sustainable Cities Conference Sustainable urban ecosystems (SSC 2020; 2022); Санкт-Петербург: «Докучаевские чтения» (2017-2022). Ростов-на-Дону: VII Съезд общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Ростов-на-Дону – Сыктывкар, 2019), ВНКСФ (2015-2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 49 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science, 2 входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК; а также зарегистрировано 7 баз данных (в соавторстве).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 177 страницы текста, 23 таблицы, 28 рисунков и 6 приложений. Список литературы включает 272 источника, из них 111 на иностранных языках.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.5.19. Почвоведение по пункту 6 направления исследований «Теоретические и научно-методические вопросы химии почв. Изучение взаимодействия органических и минеральных компонентов почвы. Техногенное и агрогенное химическое загрязнение почв, изменение их естественной кислотности, химического состава и физико-химических свойств».

Финансовая поддержка исследования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023–0008, в рамках гранта Российского научного фонда № 23-27-00418, <https://rscf.ru/project/23-27-00418/>, а также за счет программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030»).

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность сотрудникам научно-испытательной лаборатории «Биогеохимия» и кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского ЮФУ за помощь при проведении полевых и аналитических работ. Особую благодарность автор выражает ведущему научному сотруднику НИИ Физики, к. х. н. Е. А. Бураевой за содействие в измерении активности радионуклидов, а также научному руководителю д.б.н. С. Н. Горбову и профессору кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов О. С. Безугловой за ценные советы и поддержку при написании диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Представлен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме исследования.

ГЛАВА 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории водораздельной части Ростовской агломерации урботехнопедогенез затрагивает преимущественно черноземы миграционно-сегрегационные (ранее обыкновенные карбонатные) различной мощности и гумусированности, которые претерпевают изменения под влиянием урботехнопедогенеза (Горбов и др., 2015). Доминирующими типами антропогенно-

преобразованных городских почв (АПП) выступают урбистратифицированные черноземы и урбостратоземы, имеющие в своем составе синлитогенные диагностические горизонты «урбик». Последний представлен рыхлыми наслоениями со значительным включением антропогенного материала и может быть перекрыт либо асфальтовыми, либо другими водонепроницаемыми покрытиями. Зачастую в условиях г. Ростова-на-Дону в теле АПП под антропогенной толщей сохраняется погребенный гумусово-аккумулятивный профиль черноземов.

Основная часть почвенных разрезов была заложена в парково-рекреационной и селитебной зонах на территории Ростовской агломерации. В качестве эталонных почв выступали черноземы миграционно-сегрегационные прилегающих к агломерации ООПТ (рис.1).

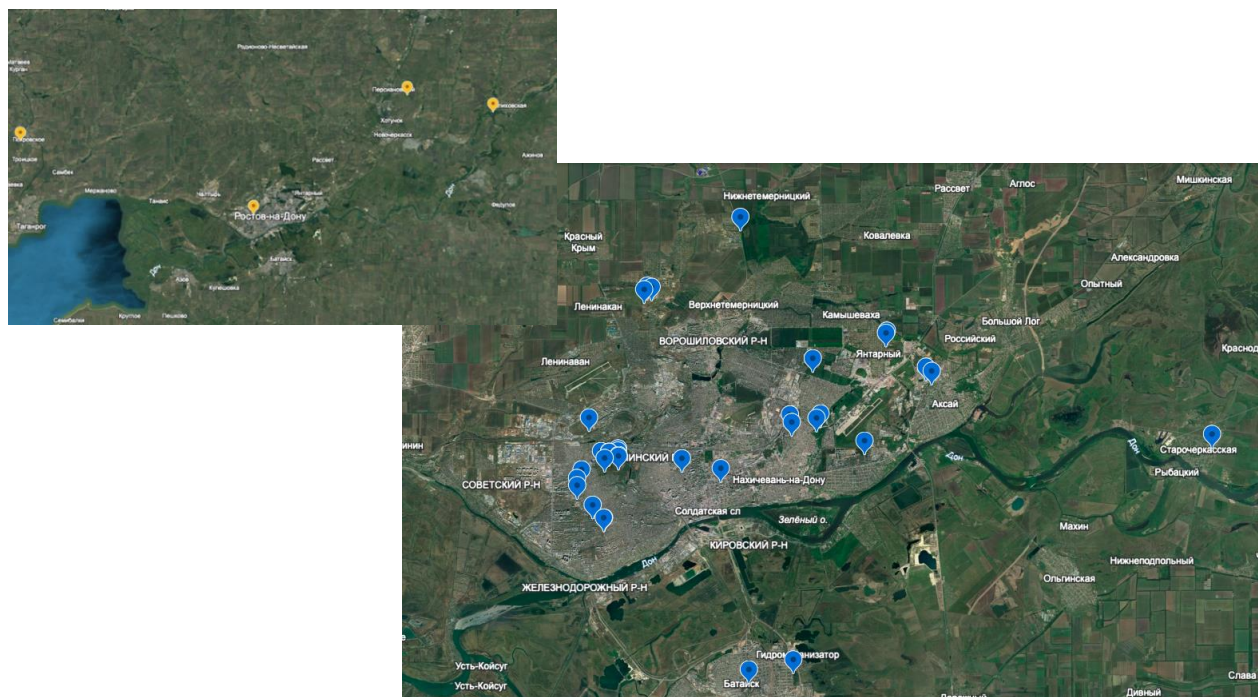


Рисунок 1 – Карта-схема закладки полнопрофильных разрезов, скважин и отбора поверхностных почвенных и растительных проб в г. Ростове-на-Дону и прилегающих ООПТ

Естественные факторы почвообразования в условиях города претерпевают существенные изменения, это отражается на нативных почвах, даже если они сохраняют целостность своего профиля. В этой связи нельзя принимать содержание поллютантов в естественных почвах города за фоновое, поскольку они испытывают такой же прессинг атмосферных выпадений, как и собственно антропогенно-преобразованные почвы. По этой причине в работе были использованы почвы естественного сложения (территории прилегающих ООПТ) как фоновые (эталонные) для сравнения и возможности оценки загрязнения городских почв радионуклидами.

ГЛАВА 3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) в различных функциональных зонах г. Ростова-на-Дону проводили согласно (МВИ 1.2.3(76)-11, 2011; МВК 2.2.3(50)-11, 2011; МВК 5.6(38)-11, 2011; Соболева, 2002; РД 03-26-2007, 2008; МУ 2.6.2398-08, 2009). Удельную активность радионуклидов определяли с помощью гамма-спектрометра. (Прогресс, 2003; Прогресс, 2010). Определение содержания органического вещества по ГОСТ

26213–2021. Гранулометрический состав определяли по ГОСТ 12536–2014. Величину показателя рН в водной вытяжке по ГОСТ 26423–85. Карбонаты по Кудрину (Безуглова, Морозов, 1996).

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1 Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения от почв Ростовской агломерации и прилегающих ООПТ

Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в пределах г. Ростова-на-Дону характеризуется логнормальным распределением. Разброс гамма-фона в селитебных территориях Ростова-на-Дону значительно шире, чем на рекреационных территориях и ООПТ (рис. 2). Однако следует отметить, что медианные значения МЭД совпадают в пределах стандартного отклонения как между собой, так и между селитебными, особо охраняемыми и парково-рекреационными территориями г. Ростова-на-Дону.

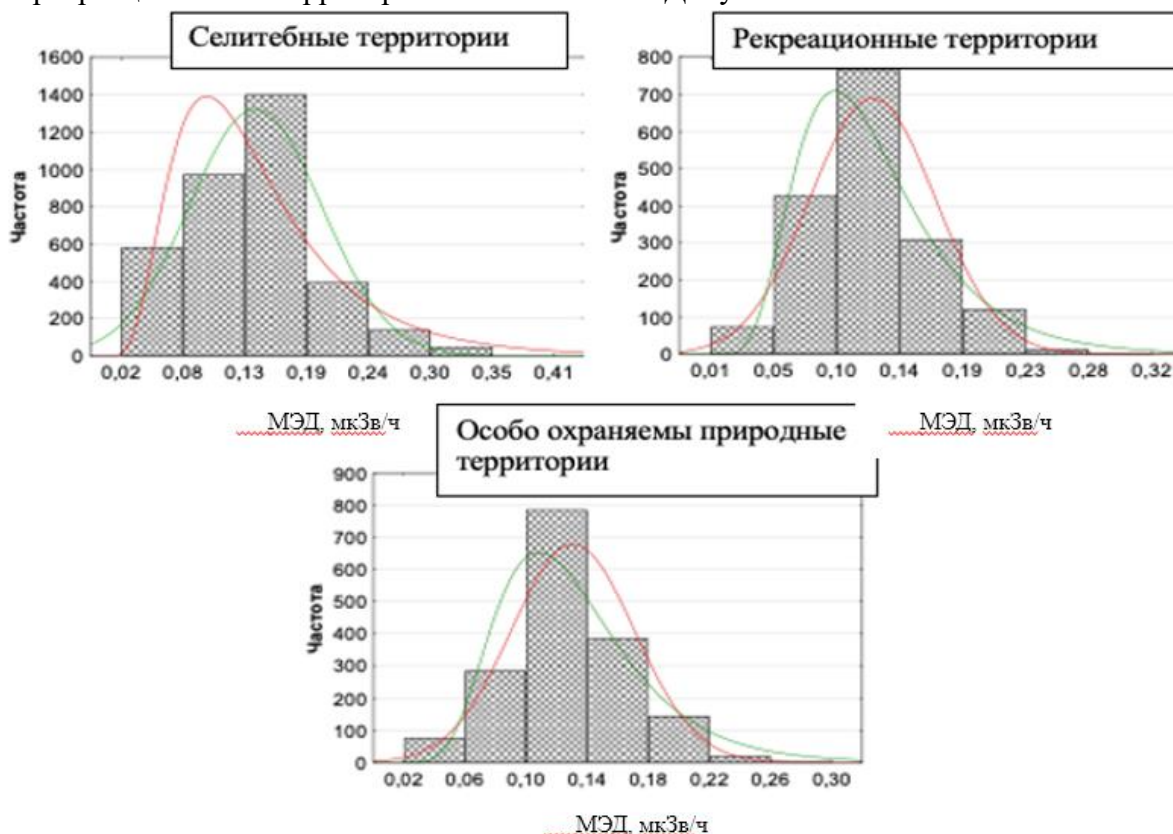


Рисунок 2 – Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в пределах селитебной, парково-рекреационной зон города и особо-охраняемых природных территорий

Для парково-рекреационных зон распределение характеризуется равномерностью, однородностью и симметричностью относительно центральной точки. В то время как в условиях городской застройки наблюдается смещение формы распределения МЭД влево, что свидетельствует о неоднородности распределения гамма-фона в городских условиях.

4.2 Удельная активность радионуклидов в зональных почвах Ростовской области

Почвы ООПТ представляют собой уникальные природные экосистемы, которые находятся в относительно ненарушенном состоянии и не подвергались антропогенному воздействию. Анализ полученных значений активности радионуклидов показал возможность использования почв ООПТ в качестве эталонных комплексов, а также позволил выявить ноль-

момент содержания в них ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs для дальнейшего сравнения с городскими территориями. Кроме того, полученные значения являются базовой информацией при оценке и мониторинге радиационного состояния природной среды и определении влияния антропогенных факторов на радиационный фон региона.

Полученные данные отражают совокупную выборку для естественных радионуклидов и характеризуются нормальным распределением в пределах погрешности измерения. Выборка отражает совокупный набор всех изученных почвенных горизонтов, а также материнскую породу (табл. 1). Данный принцип использован и для искусственного радионуклида ^{137}Cs , хотя основная часть его активности приходится именно на верхние горизонты гумусо-аккумулятивной толщи, в которую он мигрировал в результате процессов естественной педотурбации, а также конвективно-диффузионного массопереноса.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки удельной активности изученных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) в зональных почвах ООПТ Ростовской области

Параметр	Радионуклид			
	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Минимум, Бк/кг	0,0	6,8	5,7	2,9
Максимум, Бк/кг	66,2	69,3	50,0	81,5
Среднее арифметическое, Бк/кг	5,5	28,4	26,1	32,4
Медиана, Бк/кг	1,2	26,1	25,9	32,3
Стандартное отклонение, Бк/кг	14,5	12,2	10,5	14,8
Количество проб, шт.	79	79	79	79

4.3 Удельная активность радионуклидов в естественных почвах Ростовской агломерации

Средние значения общей удельной активности естественных радионуклидов и искусственного радиоцезия (табл. 2) в почвах Ростовской агломерации соотносятся с данными, полученными для особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Ростовской области, и соответствуют среднемировым значениям (Бураева и др., 2022). Однако в некоторых случаях отмечается повышение концентрации естественных радионуклидов, что обусловлено, прежде всего, локацией разрезов вблизи промышленных предприятий г. Ростова-на-Дону.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки данных по удельной активности радионуклидов в естественных почвах Ростовской агломерации

Параметр	Радионуклид			
	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Минимум, Бк/кг	0,0	13,3	20,9	25,2
Максимум, Бк/кг	85,8	38,9	43,4	671,0
Среднее арифметическое, Бк/кг	5,5	25,4	30,6	454,0
Медиана, Бк/кг	0,6	26,0	30,1	443,0
Стандартное отклонение, Бк/кг	11,2	5,0	4,3	81,0
Количество проб, шт.	107	107	107	107

Городские почвы естественного сложения, не затронутые строительной деятельностью, представляют собой уникальные области со стабильно функционирующим растительным

покровом. Они приурочены, как правило, к парково-рекреационным зонам и характеризуются сохранением целостности сложения почвенного профиля и почвенных горизонтов, что сказывается на накоплении радионуклида ^{137}Cs именно в верхних слоях его первичного выпадения. Как следствие, в естественных городских почвах, не подверженных антропогенному воздействию, наблюдается плавное снижение вниз по профилю активности радионуклида ^{137}Cs .

4.4 Удельная активность радионуклидов в естественных почвах Ростовской агломерации под древесными и травянистыми фитоценозами

Различия в активности радионуклидов между травянистыми и древесными фитоценозами, сформированных на естественных почвах города обусловлены прежде всего видовой спецификой растительных сообществ, а также способностью разных типов растительности к аккумуляции радионуклидов. Разброс в медианных значениях находится в пределах стандартного отклонения (~30%), при этом медианные значения для ^{137}Cs в травянистых фитоценозах в два раза выше, чем в древесных, что объясняется интенсивностью биогеохимического круговорота под степными и луговыми сообществами. Медианные значения активности ^{137}Cs в травянистых фитоценозах составляют 0,89 Бк/кг, в сравнении с древесных фитоценозов, где они равны 0,44 Бк/кг (рис. 3).

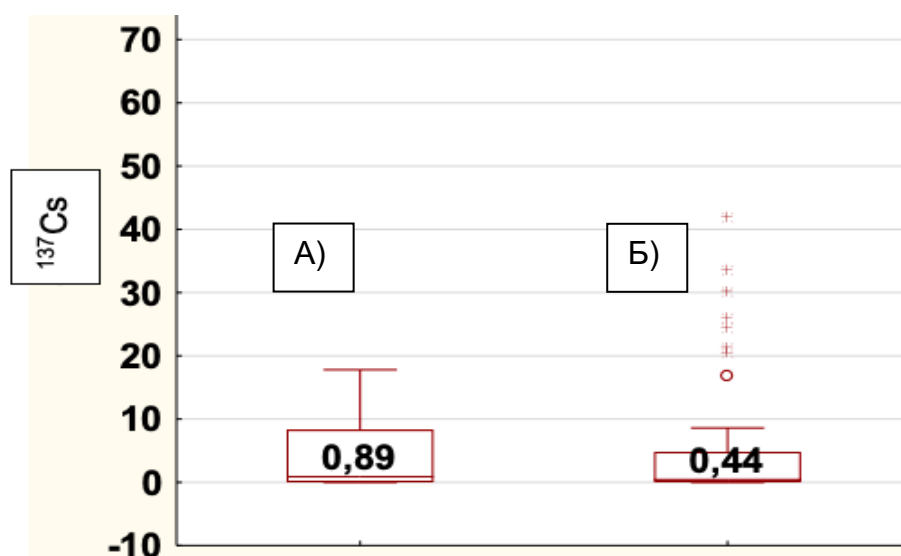


Рисунок 3 – Характеристика медианы и межквартильного размаха для удельной активности ^{137}Cs в естественных почвах под травянистой (А) и древесной (Б) растительностью в г. Ростове-на-Дону

4.5 Удельная активность радионуклидов в антропогенно-преобразованных почвах Ростовской агломерации

Удельная радиоактивность АПП находит отражение в изменениях, происходящих в почвенном покрове города под воздействием урбопедогенеза при экстремально высоких антропогенных нагрузках, таких, как срезка и перепланировка нативной поверхности водораздельной и склоновых частей урболандшафтов, образование урбиковых горизонтов и запечатывание в разной степени трансформированного почвенного покрова (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты статистической обработки данных по удельной активности радионуклидов в антропогенно-преобразованных почвах Ростовской агломерации

Параметр	Радионуклид			
	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Минимум, Бк/кг	0,0	4,1	0,0	110,0
Максимум, Бк/кг	16,4	36,5	45,1	811,0
Среднее арифметическое, Бк/кг	1,8	23,6	29,0	438,5
Медиана, Бк/кг	0,0	24,9	30,4	424,0
Стандартное отклонение, Бк/кг	3,6	7,4	8,1	137,5
Количество проб, шт	95	95	95	95

Синлитогенные горизонты урбик несут в своем составе различные элементы строительных материалов с непредсказуемым радионуклидным составом. А типичные городские почвы представляют собой коллаборацию остатков естественных и вновь образованных антропогенно-преобразованных почв с различными физико-химическими свойствами, как правило, характеризующимися двучленностью профиля.

Если средние значения естественных РН в АПП в целом соотносятся с таковыми значениями для естественных почв города и почв ООПТ, то искусственный радионуклид ^{137}Cs , показывает экстремально низкие значения, составляя 1,8 Бк/кг. С одной стороны, группа антропогенно-преобразованных почв, в особенности, ее дневные урбиковые горизонты, обладая пестрым гранулометрическим составом и низкими величинами содержания, не способна удерживать РН в почвенном профиле долгое время в силу незначительной емкости почвенного-поглощающего комплекса. С другой стороны, не исключено, что погребение оказывает положительный защитный эффект от воздействия именно поллютантов радиологической природы.

4.6 Удельная активности радионуклидов в антропогенно-преобразованных экранированных и неэкранированных почвах Ростовской агломерации

На рисунке 4 представлены значения размаха для удельной активности радионуклидов в группе антропогенно-преобразованных почв, разделенной по степени запечатывания (экранированных и неэкранированных). Разброс значений по ^{137}Cs в экранированных почвах ограничен узким диапазоном, в то время как для неэкранированных почв разброс значений расширяется до 3,0 Бк/кг. Это указывает на то, что запечатанные почвы, защищенные от внешних воздействий, имеют более стабильное состояние радионуклидов, в то время как АПП, имеющие в своем составе дневные горизонты урбик, более подвержены изменениям, внутрпочвенной миграции и, как следствие, вариабельности активности РН.

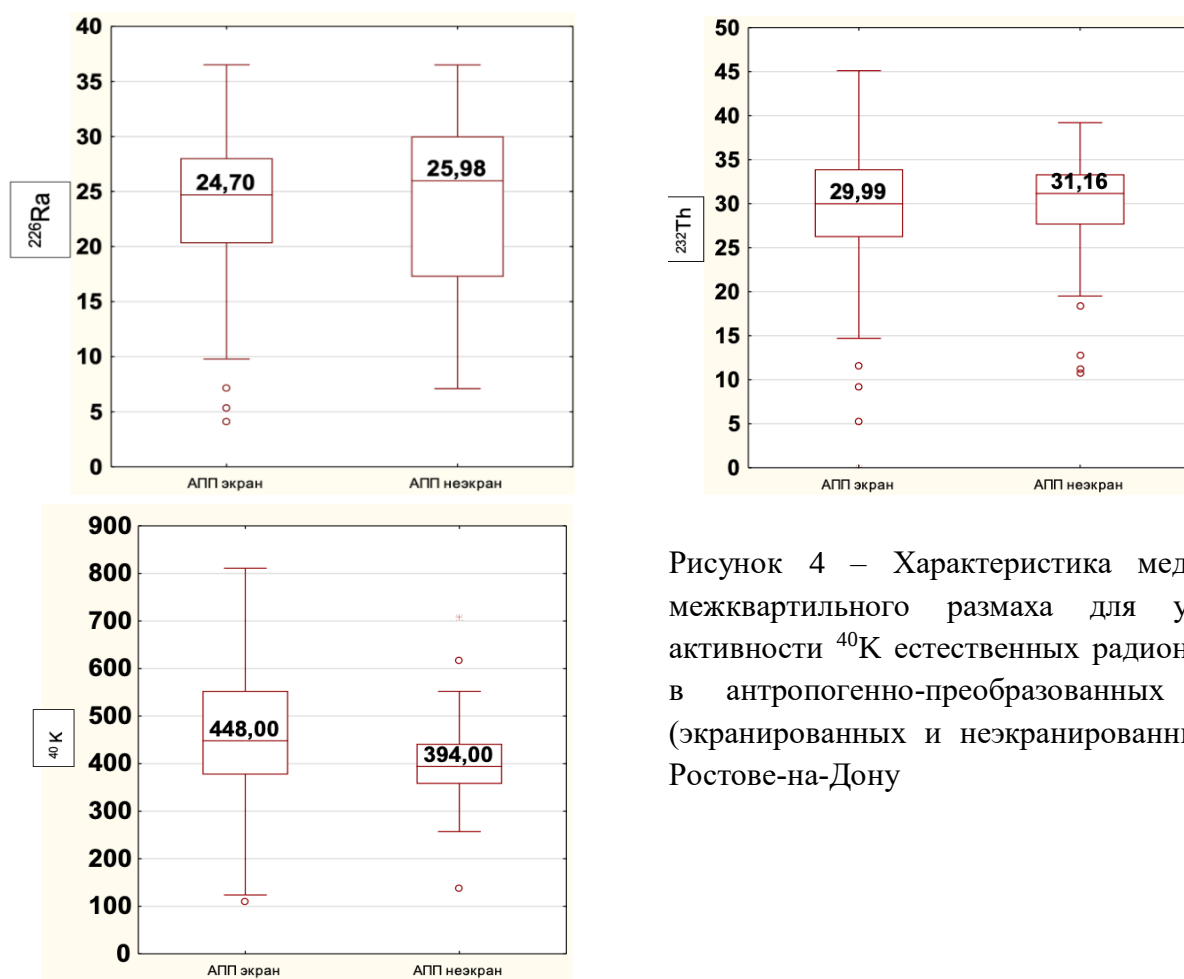


Рисунок 4 – Характеристика медианы и межквартильного размаха для удельной активности ^{40}K естественных радионуклидов в антропогенно-преобразованных почвах (экранированных и неэкранированных) в г. Ростове-на-Дону

Медианное значение активности калия в экранированных почвах составляет 448,0 Бк/кг, в то время как в неэкранированных почвах оно составляет 394,0 Бк/кг. Подобные закономерности связаны с влиянием запечатывания на мобильность и распределение обменного калия в почве.

Формирование империабельных покрытий на поверхности АПП приводит к частичному или полному прекращению внутрипочвенного тока влаги, как следствие нарушаются обменные процессы в почвенно-поглощающем комплексе, а миграция обменного калия внутри почвенного профиля претерпевает существенные изменения. Это приводит к неравномерному распределению его активности и, в результате, к большему разбросу значений для экранированных почвах.

4.7 Профильное распределение удельной активности радионуклидов в естественных почвах Ростовской агломерации под древесными и травянистыми фитоценозами

Представленные профильные распределения РН включают в себя выборку почвенных разрезов из группы естественных городских почв и почв ООПТ, что позволяет оценить воздействие различных растительных ассоциаций на внутрипочвенную миграцию естественных и искусственных радионуклидов (рис. 5).

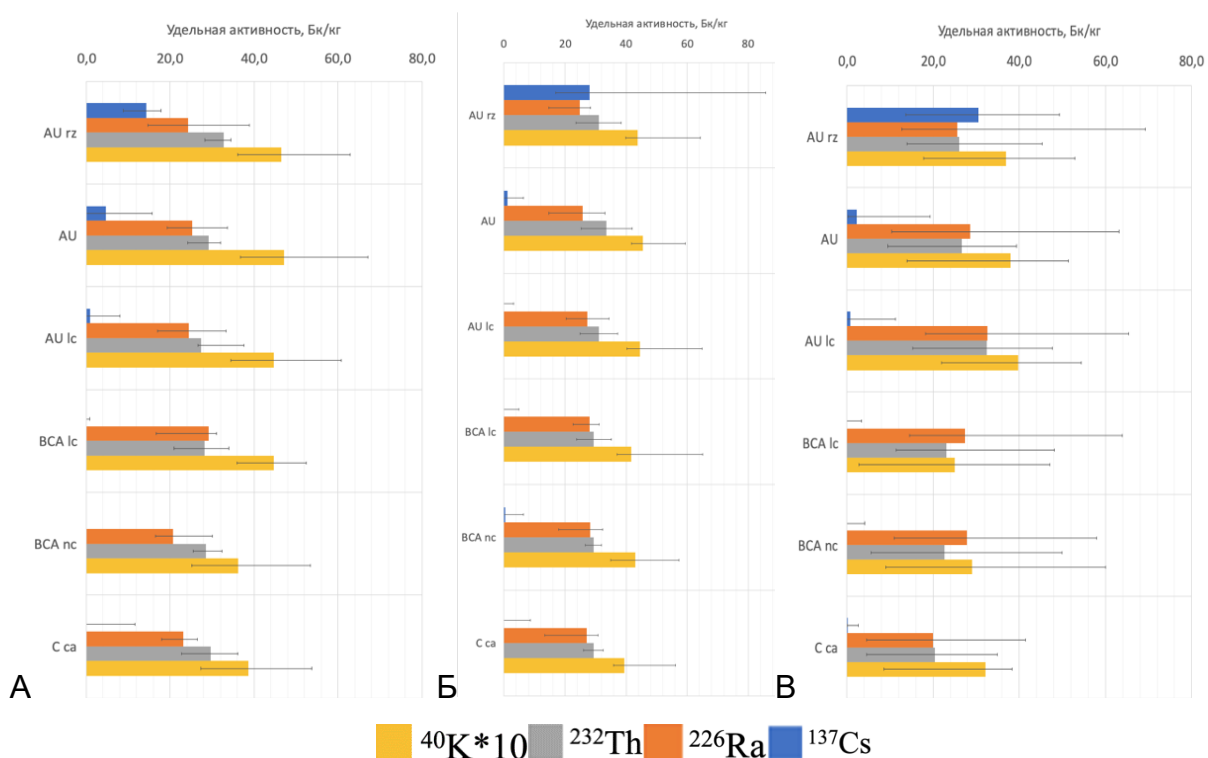


Рисунок 5 – Распределение минимальных, максимальных и медианных значений удельной активности радионуклидов в почвенном профиле: А – чернозем под травянистым фитоценозом в черте города; Б – чернозем под древесным фитоценозом в черте города; В – чернозем территорий ООПТ

Во всех изученных черноземах миграционно-сегрегационных удельная активность ^{137}Cs резко снижается с глубиной, максимальные значения зафиксированы в гумусово-аккумулятивной толще. При этом в почвах под древесными фитоценозами и ООПТ снижение носит наиболее резкий характер.

Активность ^{226}Ra не показывает достоверных различий по почвенному профилю, в то время как для ^{232}Th характерна максимальная активность в гумусово-аккумулятивных горизонтах – в AU rz под травянистой и в AU при функционировании почв под древесной растительностью. В почвах ООПТ достоверные различия в выборках не обнаружены, при этом максимальная медиана приурочена к первому карбонатному барьеру в горизонте AU lc.

4.8 Профильное распределение удельной активности радионуклидов в антропогенно-преобразованных экранированных и неэкранированных почвах Ростовской агломерации

Исследование различий в профильном распределении радионуклидов между экранированными и неэкранированными городскими почвами позволяет не только определить степень загрязнения почвы, но и дать оценку сохранности внутрипочвенных процессов миграции и седиментации отдельных почвенных компонентов в условиях изменения доминирующих факторов почвообразования и типа водного режима. Это, в свою очередь, может служить основой для разработки математических моделей распределения поллютантов в профиле антропогенно-преобразованных почв (рис. 6).

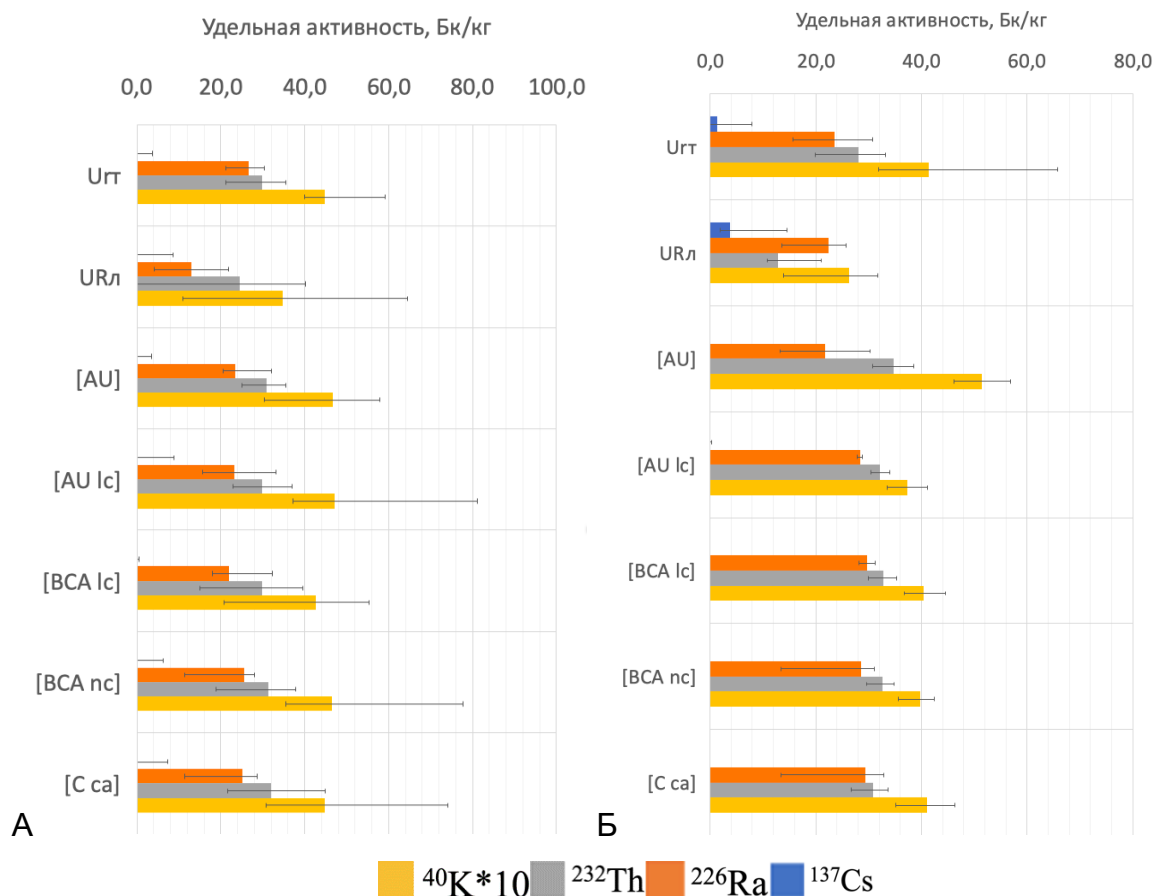


Рисунок 6 – Распределение минимальных, максимальных и медианных значений удельной активности радионуклидов в почвенном профиле: А – экранированные АПП; Б – неэкранированные АПП

Несмотря на то, что в единичных горизонтах АПП были зафиксированы пики ^{137}Cs в погребенных горизонтах, анализ общей выборки из 14 разрезов показывает, что медианные значения, характеризующие достоверное наличие активности, приурочены, прежде всего, к горизонтам урбик незапечатанных урбостратоземов и урбистратифицированных черноземов. При этом антропогенно-преобразованная и погребенная гумусовая толщи экраноземов характеризуется отсутствием достоверных величин концентрации ^{137}Cs .

В АПП достоверное снижение активности ^{226}Ra и ^{232}Th приурочено к горизонтам UR при их сравнении с нижележащими иллювиальными горизонтами черноземов и материнской породой, при этом минимальные значения активности характерны для URл с облегченным гранулометрическим составом.

4.9 Взаимосвязь удельной активности радионуклидов с физико-химическими свойствами почв Ростовской области

На рисунке 7 представлен график в виде ящичных диаграмм, характеризующий распределение данных по удельной радиоактивности изотопов ^{226}Ra . Данные, чаще всего, характеризуются логнормальным распределением, а сравнение участков по медианным величинам с использованием критерия Манна-Уитни не показывает существенных различий в сравниваемых участках.

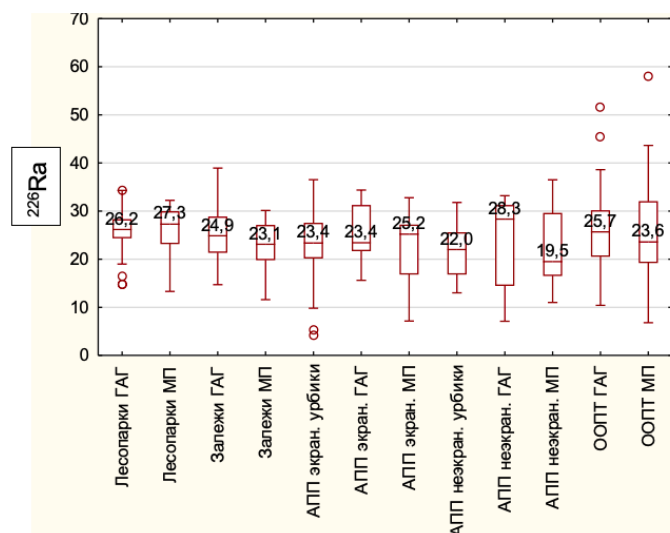


Рисунок 7 – Характеристика медианы и межквартильного размаха для удельной активности ^{226}Ra в почвах исследуемых участков

Это говорит о том, что интенсивное антропогенное воздействие в условиях городской среды не играет существенной роли в интенсивности накопления данного радионуклида. Средняя активность составляет ($N = 285$) $24,51 \pm 7,17$ Бк/кг. Содержание естественного радионуклида ^{226}Ra в городских, природно-антропогенных почвах и почвах ООПТ Ростовской области в среднем варьирует в пределах 21,0–26,0 Бк/кг. При этом максимальная концентрация данного элемента зафиксирована в природно-антропогенных почвах, но наибольшее среднее значение наблюдается в почвах ООПТ. В целом активность ^{226}Ra в различных почвах совпадает в пределах погрешности. Известно, что радий не входит в состав отдельных минералов, а широко распространен в виде включений во многих образованиях. Процессы миграции ^{226}Ra в почвах, его поглощение и накопление растениями существенно зависят от путей поступления и прочности закрепления данного элемента в сложной многокомпонентной системе, каковой и является почва.

При проведении корреляционного анализа с использованием критерия Спирмена удалось выявить достоверную прямую взаимосвязь между активностью ^{226}Ra и содержанием почвенного органического углерода (рис. 8).

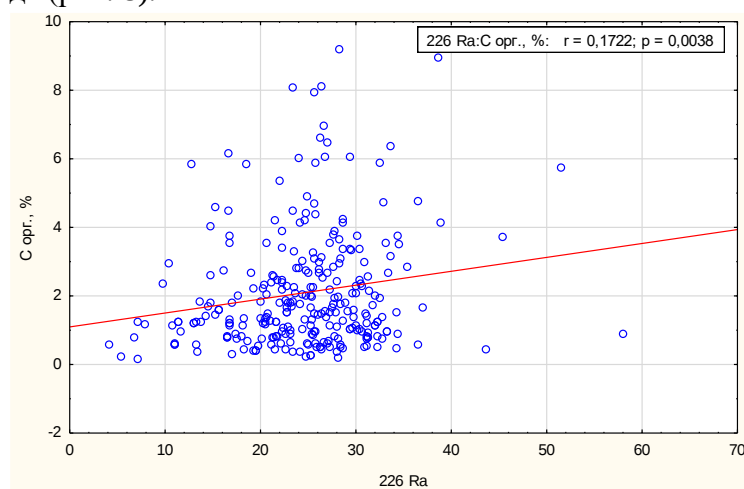


Рисунок 8 – Диаграмма рассеяния для активности ^{226}Ra и содержания почвенного органического углерода

Проверка равенства медианных значений для активности ^{232}Th на разных участках показывает, что достоверные различия наблюдаются только в парах «Лесопарки» – «ООПТ», а также «Лесопарки» – «Неэкранированные АПП» (рис. 9). В остальном, значимых отличий распределения ^{232}Th в различных почвах выявлено не было. Среднее содержание данного элемента во всех изученных почвах составляет $28,85 \pm 8,00$ Бк/кг. Коэффициент вариации равен 27,72%.

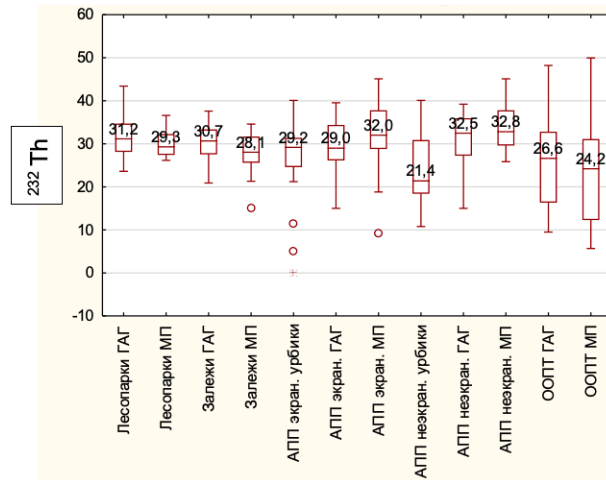


Рисунок 9 – Характеристика медианы и межквартильного размаха для удельной активности ^{232}Th в почвах исследуемых участков

Анализ ранговой корреляции указывает на достоверную обратную взаимосвязь содержания тория с карбонатами и содержанием физической глины (умеренная и слабая соответственно) (рис. 10). Умеренную прямую корреляционную связь имеет активность ^{226}Ra и ^{40}K , при этом основной вклад в содержание радионуклидов в почвах исследуемых территорий вносит ^{40}K .

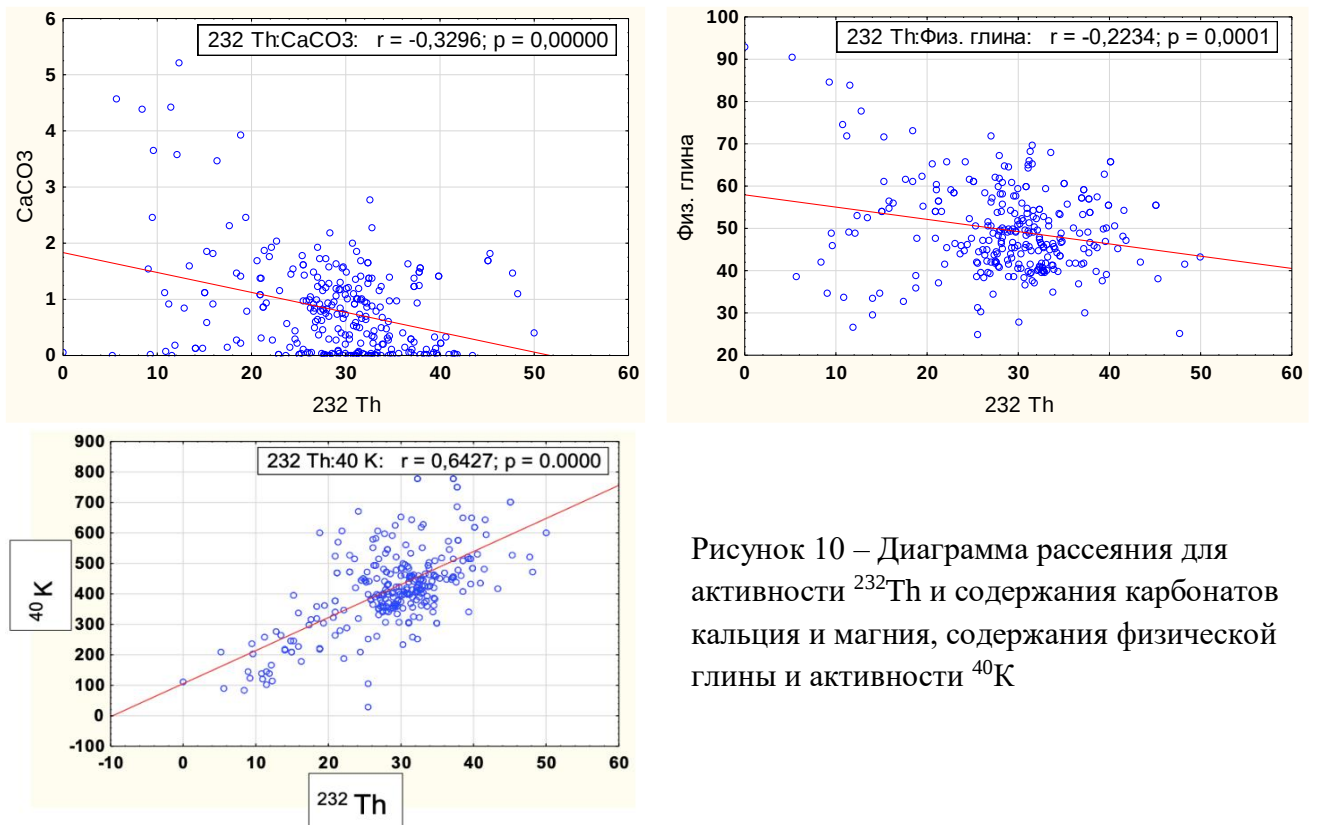


Рисунок 10 – Диаграмма рассеяния для активности ^{232}Th и содержания карбонатов кальция и магния, содержания физической глины и активности ^{40}K

Удельная активность ^{40}K в почвах в среднем варьировала в пределах от 424,0 до 770,0 Бк/кг. При этом максимальная концентрация ^{40}K была зафиксирована в городских почвах – 811,0 Бк/кг. Средняя величина составляет $438,2 \pm 150,0$ Бк/кг ($N = 212$). Результаты статистического анализа почв показали, что по критерию Манна-Уитни достоверно различными почвами можно считать городские и почвы ООПТ (рис. 11). В почвенном покрове ООПТ среднее содержание ^{40}K составляет $458,9 \pm 82,5$ Бк/кг ($N = 70$).

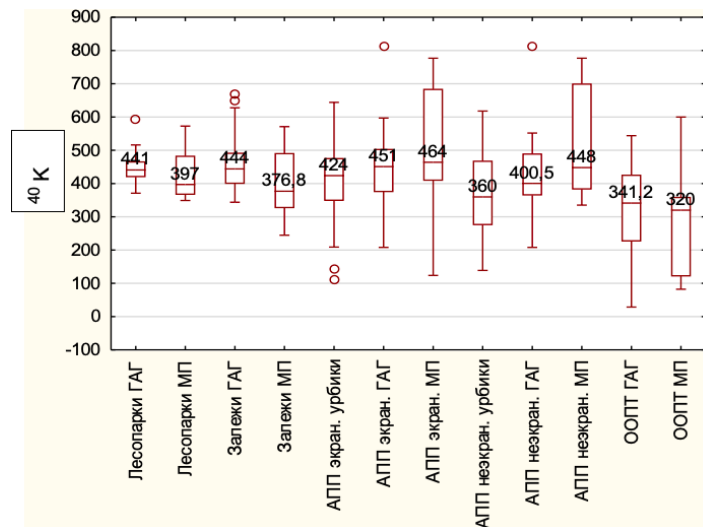


Рисунок 11 – Характеристика медианы и межквартильного размаха для удельной активности ^{40}K в почвах исследуемых участков

Следует отметить наличие корреляционных связей между активностью ^{40}K и содержанием карбонатов (обратная умеренная связь), величиной pH (обратная слабая связь) и глубиной (прямая слабая связь) (рис. 12).

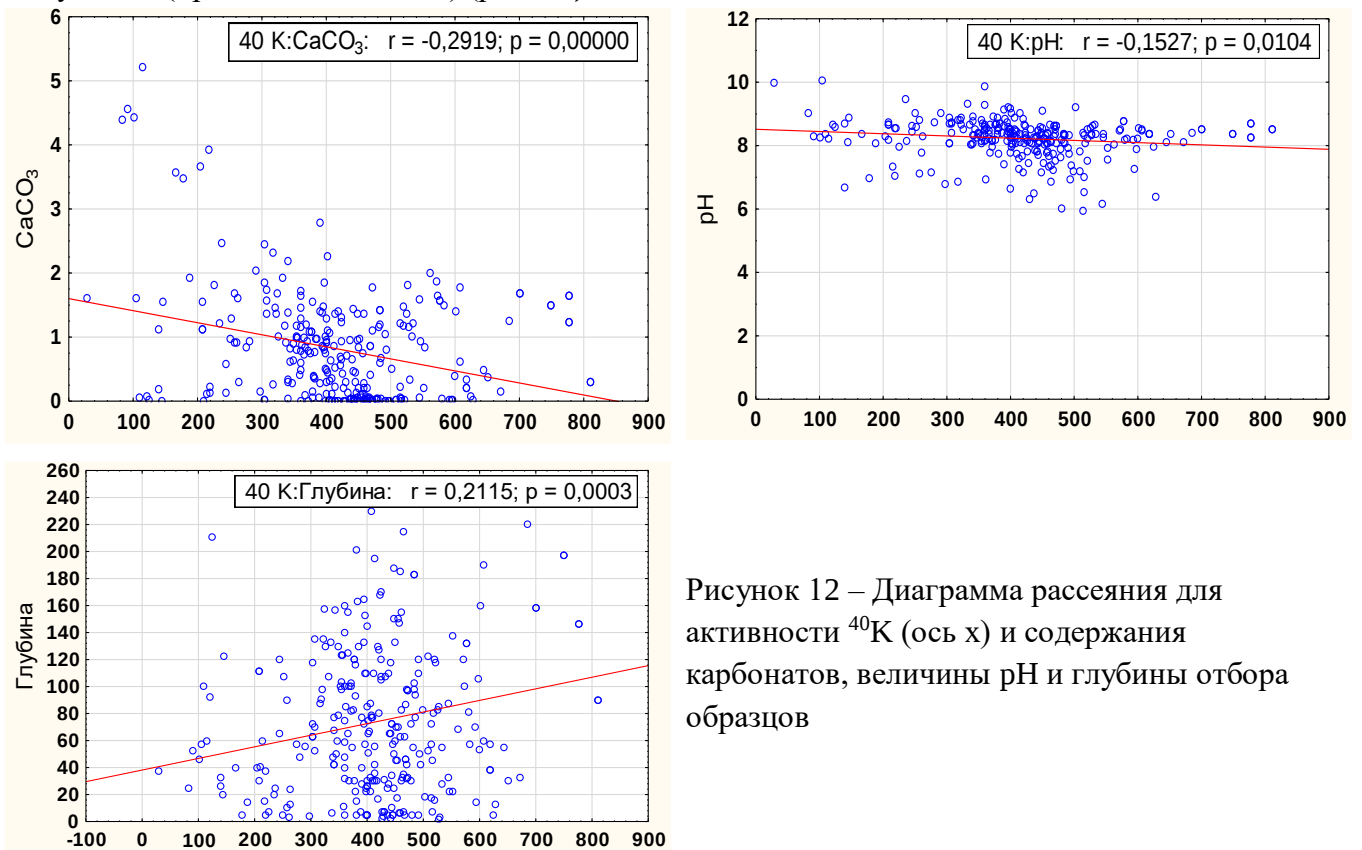


Рисунок 12 – Диаграмма рассеяния для активности ^{40}K (ось x) и содержания карбонатов, величины pH и глубины отбора образцов

Содержание ^{137}Cs характеризуется сильной вариативностью и неоднородностью данных (рис. 13). Коэффициент вариации по всем изученным почвам составляет 212 %, хотя в некоторых случаях достигает 300% (залежные участки и экранированные АПП).

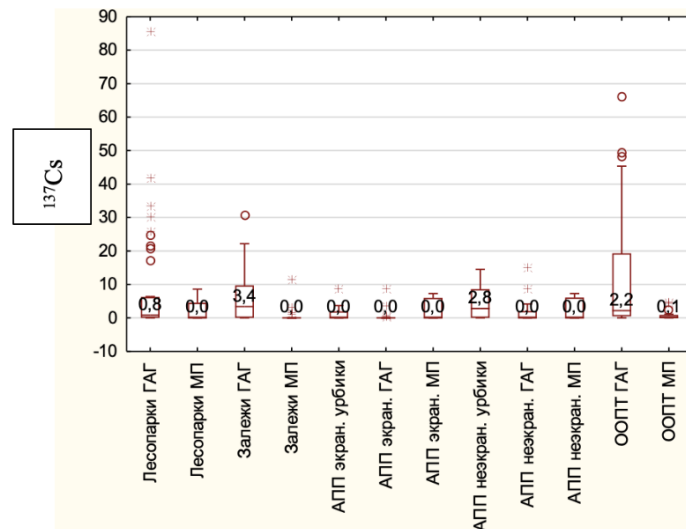


Рисунок 13 – Характеристика медианы и межквартильного размаха для удельной активности ^{137}Cs в почвах исследуемых участков

При разделении имеющейся выборки горизонтов городских почв на три группы в зависимости от доминирующего элементарного почвообразовательного процесса анализ главных компонент позволил выявить наличие более четких корреляций между активностью исследуемых РН и физико-химических свойств почвенных горизонтов (рис. 14).

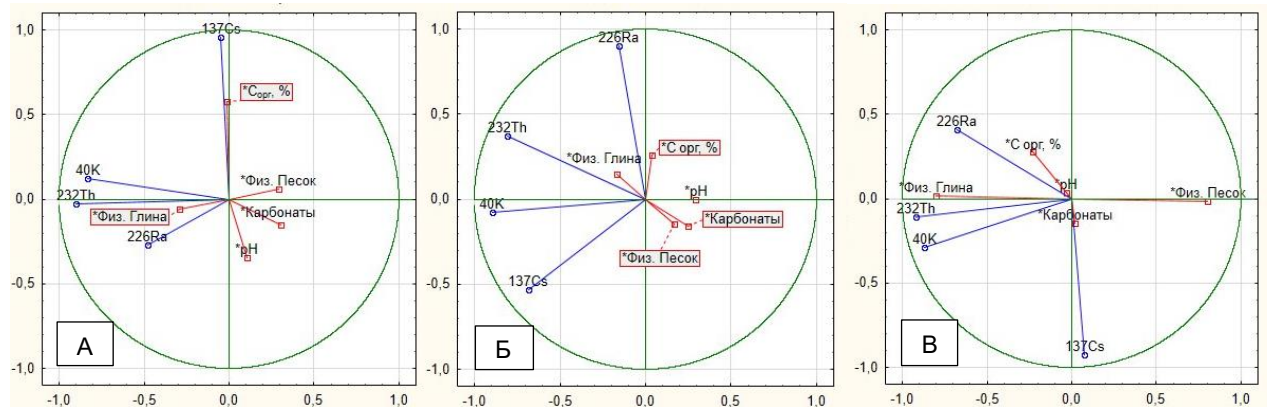


Рисунок 14 – Анализ главных компонент и проекция на факторную плоскость для активности радионуклидов и основных почвенных показателей почвенного покрова Ростовской области (А – элювиальные горизонты; Б – иллювиальные горизонты; В – антропогенно-преобразованные горизонты)

В то время, как для элювиальных гумусово-аккумулятивных дневных горизонтов черноземов характерна четкая положительная корреляция между активностью ^{137}Cs и органическим веществом ($C_{\text{орг}}$), это не находит подтверждения при анализе выборки иллювиальных и антропогенно-преобразованных горизонтов, где подобная корреляция отсутствует. Это свидетельствует о том, что миграция ^{137}Cs вниз по профилю не приурочена к внутрипочвенным потокам органического вещества, а зависит от педотурбации в случае естественных почв или урбопедогенеза в случае АПП.

Оценку ^{40}K как основного естественного биогенного агента радиации в почвах проводили с использованием описательной статистики фактических (полученных при измерении) и расчетных (полученных из величины валового калия) значений, зафиксированных для естественных и погребенных горизонтов, а также для горизонтов UR (табл. 4).

Таблица 4 – Средние величины фактических и расчетных значений активности ^{40}K для выборок естественных и антропогенно-преобразованных горизонтов почв

Горизонт	Фактические, Бк/кг	Расчетные, Бк/кг
Естественные гумусово-аккумулятивные горизонты – AU	487,0	520,0
Естественные иллювиальные горизонты – BCA	447,0	474,0
Почвообразующая порода естественных почв – C	437,0	439,0
Погребенные гумусово-аккумулятивные горизонты – [AU]	478,0	511,0
Погребенные иллювиальные горизонты [BCA]	446,0	464,0
Почвообразующая порода погребенных почв [C]	465,0	434,0
Синлитогенные горизонты урбик тяжелого гранулометрического состава – UR _T	456,0	486,0
Синлитогенные горизонты урбик легкого гранулометрического состава – UR _Л	309,0	387,0

С целью оценки перераспределения активности ^{40}K в почвенном профиле естественных и антропогенно-преобразованных почв сравнили выборки разных горизонтов на наличие достоверных различий между ними. На рисунке 15 представлены полученные данные, при этом фактические и расчетные значения сравнивались отдельно.

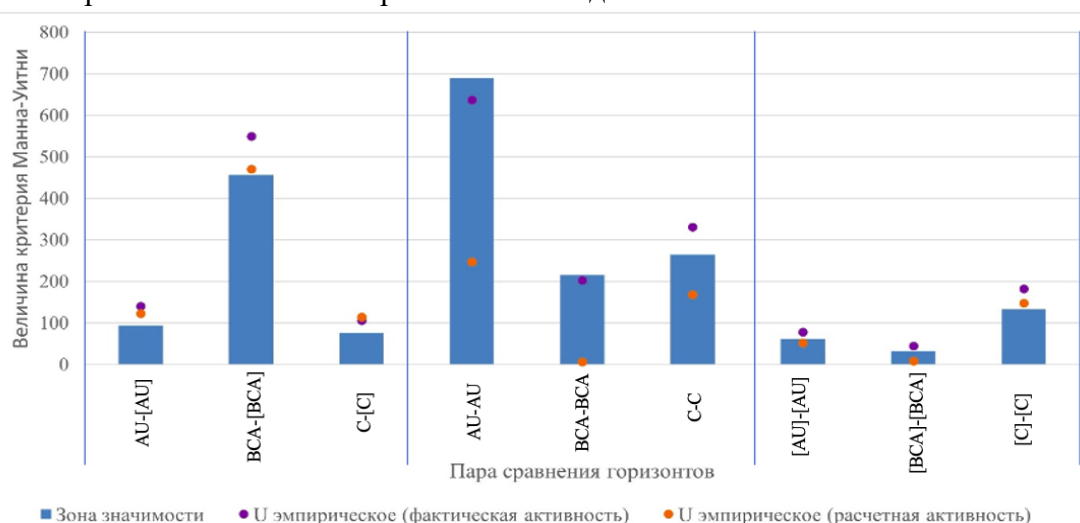


Рисунок 15 – Критерий Мана-Уитни для фактических и расчетных выборок активностей ^{40}K в сравнениях разных генетических горизонтов

В сравнении пар горизонтов AU–[AU], BCA–[BCA], C–[C] не выявлены статистически значимые различия, что указывает на несущественное влияние процесса погребения на активность ^{40}K в генетических горизонтах.

Горизонты А выделяются высокой активностью ^{40}K , особенно в гумусово-аккумулятивных слоях. В нативных горизонтах почв отмечается различие активности ^{40}K при сравнении AU–BCA и AU–C, но не в паре BCA–C. Расчетная активность ^{40}K также разнится в этих трех парах.

Горизонты URt схожи с горизонтами ВСА и [ВСА], как показывают средние значения и критерий Мана-Уитни, что подтверждается в работе о физических свойствах почв (Безуглова и др., 2018). Горизонт URt формируется на основе горизонта В, подтверждая разделение урбиков по гранулометрическому составу нативных почв.

Активность ^{40}K в горизонтах URл ниже остальных связана с высоким содержанием кварцевых песчаных частиц, которые имеют минимальную адсорбцию. Эта активность преимущественно обусловлена калием в кристаллической решетке кварца.

Проведенные ранее исследования показывают превышение концентрации тяжелых металлов в материнской породе Ростова-на-Дону над фоновыми значениями (Горбов, 2018). Некоторые элементы, такие как Zn, Cu, Co, Pb, Ni, V и Cr, превышают ОДК. Активность тория и радия не коррелирует с валовым химическим составом отдельно взятых горизонтов, в отличие от ^{40}K , который коррелирует с погребенными [AU]. Однако у данного РН наибольшее количество корреляций обнаружено в группе карбонатно-иллювиальных горизонтов В, при этом они снижаются в погребенных аналогах [ВСА], что связано с изменением окислительно-восстановительных условий при погребении.

4.10 Удельная активность радионуклидов в травянистом ярусе и почвах Ростовской агломерации и прилегающих ООПТ

Для расчета коэффициентов выноса и накопления в почвах на разных глубинах использовали средневзвешенную активность изучаемых радионуклидов. Медиана активности ^{137}Cs в слое 0–10 см составляет 19,7 Бк/кг, выше, чем в 0–30 и 0–100 см (рис. 16). В некоторых точках слоя 0–10 см отмечается аномально высокая активность (48,1 Бк/кг), указывающая на техногенное воздействие. Медиана в слое 0–30 см составляет 8,7 Бк/кг, а в слое 0–100 см – 3,7 Бк/кг.

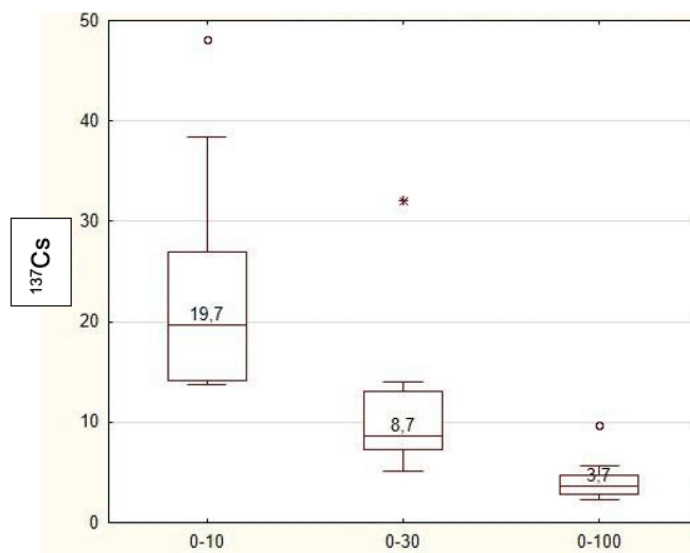


Рисунок 16 – Диаграмма размаха удельной активности ^{137}Cs внутри почвенного профиля по слоям: 0–10, 0–30, 0–100 см

В распределении ^{40}K наблюдается относительная стабильность активности в почвенном профиле (рис. 17). Медиана в слое 0–10 см составляет 400,0 Бк/кг, в слое 0–30 см – 400,5 Бк/кг и в слое 0–100 см – 341,8 Бк/кг. Размах значений не сильно меняется с глубиной, хотя в слое 0–30 см есть выброс, равный 192,1 Бк/кг, указывающий на наличие широкого размаха в активности калия в средней и нижней частях гумусово-аккумулятивного горизонта.

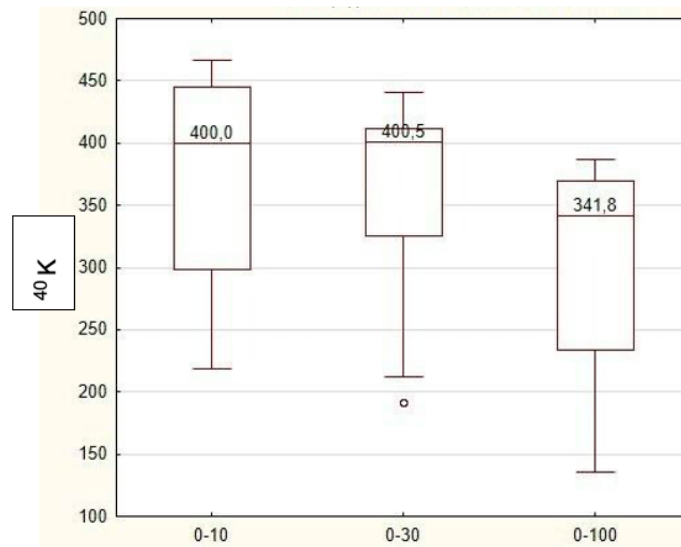


Рисунок 17 – Диаграмма размаха удельной активности ^{40}K внутри почвенного профиля по слоям: 0–10, 0–30, 0–100 см

Для радионуклида ^{226}Ra медианные значения накопления в различных по мощности корнеобитаемых слоях практически одинаковы, в слое 0–10 см оно составляет 23,3 Бк/кг, а для слоев 0–30 и 0–100 см – 22,6 Бк/кг. Однако размах значений в слое 0–30 см так же, как и у ^{40}K выше, и здесь наблюдается пик, равный 14,9 Бк/кг в слое 0–100 см (рис. 18).

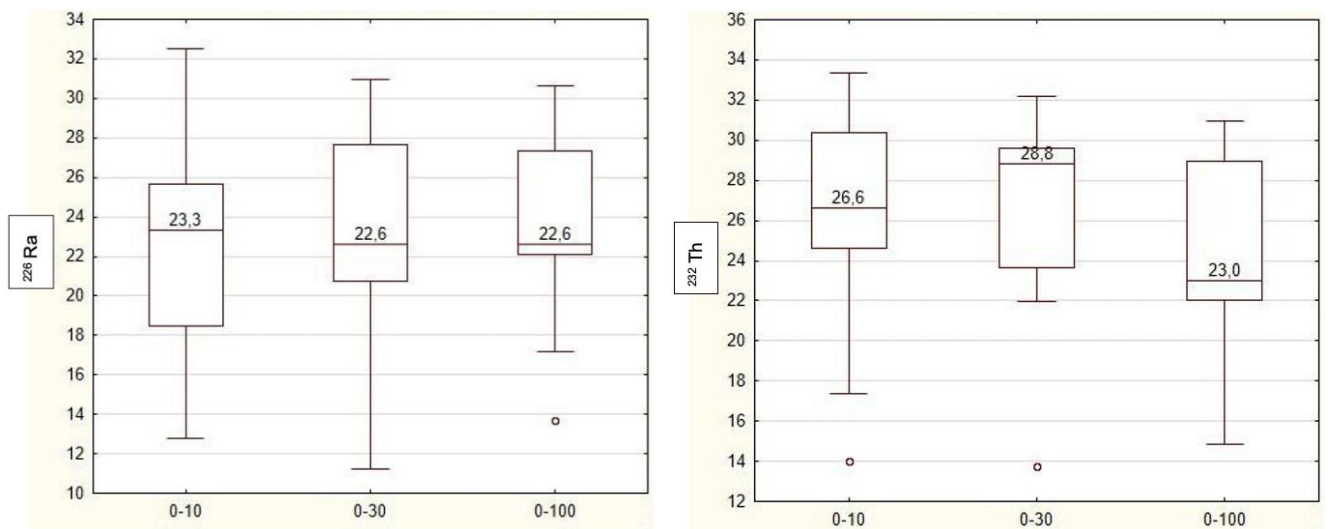


Рисунок 18 – Диаграмма размаха удельной активности ^{226}Ra и ^{232}Th внутри почвенного профиля по слоям: 0–10, 0–30, 0–100 см

Распределение радионуклидов в почве зависит от их взаимодействия с глинистыми минералами и частицами фракции физической глины ($<0,01$ мм). Как следствие, в нижних слоях почвы механизмы адсорбции и сорбции радия могут быть менее эффективными, что приводит к более низким показателям его активности. Высокие значения активности в слое 0–30 см могут быть связаны с некоторыми процессами перераспределения и перемещения радия в более глубокие горизонты почвы.

Медианное значение ^{232}Th в слое 0–10 см составляет 26,6 Бк/кг, в слое 0–30 см 28,8 Бк/кг, в слое 0–100 см – 23,0 Бк/кг. Размах значений для слоев 0–10 и 0–100 см находится примерно на одном уровне, однако наблюдаются единичные пики активности слоях 0–10 см – 14,0 Бк/кг и в слое 0–30 см 13,7 Бк/кг (рис. 18).

Поглощение радиоактивных изотопов растениями из почв в целом аналогично поглощению большинства микроэлементов.

Степень поглощения ^{40}K растениями может несколько варьировать по отношению к стабильным изотопам. В таблице 5 показаны коэффициенты биологического поглощения радионуклидов для различных слоев почвы. Для ^{40}K и ^{137}Cs отмечаются коэффициенты, превышающие 1, что оценивается как сильное накопление. Также наблюдается возрастание коэффициента с увеличением мощности корнеобитаемого слоя. Такой эффект сопряжен прежде всего с уменьшением средневзвешенной активности ^{40}K и ^{137}Cs в почве с глубиной (табл. 6).

Таблица 5 – Коэффициент биологического поглощения радионуклидов растениями из корнеобитаемых слоев

Точка отбора, тип почвы	Слой, см	КБП			
		^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
15ООПТ, Чернозем миграционно-сегрегационный, ООПТ Балка Власова, Ростовская область	0–10	0,66	0,00	0,00	1,12
	0–30	1,74	0,00	0,00	1,11
	0–100	4,04	0,00	0,00	1,31
1БС, Чернозем миграционно-сегрегационный, Ботанический сад ЮФУ, г. Ростов-на-Дону	0–10	0,10	0,00	0,07	1,18
	0–30	0,22	0,00	0,08	1,38
	0–100	0,49	0,00	0,08	1,43
1ПС, Чернозем миграционно-сегрегационный, ЖК «Суворовский», г. Ростов-на-Дону»	0–10	0,00	0,00	0,01	0,95
	0–30	0,00	0,00	0,01	1,09
	0–100	0,00	0,00	0,14	1,46
1ЩЛ, Чернозем миграционно-сегрегационный, Щепкинский лес, г. Ростов-на-Дону	0–10	0,13	0,00	0,15	0,87
	0–30	0,32	0,00	0,14	0,94
	0–100	0,95	0,00	0,16	0,99
1ЛП, Чернозем миграционно-сегрегационный, Лелюшенковский парк, г. Ростов-на-Дону	0–10	0,00	0,00	0,34	0,88
	0–30	0,00	0,00	1,01	2,83
	0–100	0,00	0,00	0,40	1,12

^{137}Cs , искусственный радионуклид, обладает химическими свойствами, аналогичными стабильному ^{133}Cs . Высокая химическая активность и аэральное поступление ^{137}Cs приводят к его высокой активности в верхних почвенных слоях. Отличие от ^{40}K заключается в коэффициенте биологического поглощения (КБП): для ^{137}Cs в слое 0–10 см он составляет 0,01–0,66, показывая отсутствие накопления. рН почвы также влияет на поглощение цезия – в щелочных почвах поглощение более интенсивно.

Таблица 6 – Активность радионуклидов в расчетном корнеобитаемом слое почвы

Точка отбора, тип почвы	Слой, см	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
1	2	3	4	5	6
15ООПТ, Чернозем миграционно-сегрегационный, ООПТ Балка Власова, Ростовская область	0–10	13,7	26,4	30,4	400,0
	0–30	5,2	27,9	32,2	403,9
	0–100	2,2	24,6	30,9	341,8

1	2	3	4	5	6
1БС, Чернозем миграционно-сегрегационный, Ботанический сад ЮФУ, г. Ростов-на-Дону	0–10	17,2	24,2	33,4	467,0
	0–30	8,3	27,2	30,6	400,5
	0–100	3,7	27,3	30,1	386,2
1ПС, Чернозем миграционно-сегрегационный, ЖК «Суворовский», г. Ростов-на-Дону»	0–10	11,4	21,4	30,1	395,4
	0–30	2,1	14,3	22,7	344,9
	0–100	3,8	22,0	16,4	296,0
1ЩЛ, Чернозем миграционно-сегрегационный, Щепкинский лес, г. Ростов-на-Дону	0–10	21,3	25,2	31,3	475,0
	0–30	8,4	21,0	34,0	437,7
	0–100	2,8	23,9	30,9	414,4
1ЛП, Чернозем миграционно-сегрегационный, Лелюшенковский парк, г. Ростов-на-Дону	0–10	12,7	29,4	34,4	469,0
	0–30	4,2	9,8	11,5	156,3
	0–100	0,4	20,6	29,3	396,2

Невысокие величины КБП для ^{226}Ra связаны с тем, что поглощение растениями данного РН уменьшается в присутствии ионов щелочноземельных металлов с меньшим радиусом ядра, в большей степени это относится к магнию. Кроме того, ^{226}Ra аккумулируется преимущественно в корнях, а в данном исследовании представлены результаты, полученные при изучении наземных частей растений.

ВЫВОДЫ

1. Медианные значения удельной активности естественных радионуклидов снижаются в следующем ряду: черноземы рекреационных зон города > черноземы ООПТ > черноземы селитебных зон города. Более интенсивная аккумуляция ЕРН в почвах рекреационных зон сопряжена со сменой растительных формаций, формирующихся в условиях города. Как следствие, происходит переформатирование биогеохимических потоков вещества, приводящее к более активному извлечению естественных РН из глубоких горизонтов почв, при одновременном усиленном накоплении лесной подстилки на поверхности черноземов лесопарков.

2. Удельная активность радионуклидов в почвах Ростовской агломерации сопоставима по величине с данными, характерными для черноземов Ростовской области. Радионуклиды в нативных почвах (Calcic Chernozems) равномерно распределены по профилю. В поверхностных горизонтах наблюдается некоторое увеличение удельной активности ^{232}Th и ^{40}K , что связано с природой самих радионуклидов и внесением удобрений в агрогенный период функционирования почв.

3. Искусственный радионуклид ^{137}Cs во всех изученных типах почв характеризуется наиболее высокими значениями активности в дерновых горизонтах, далее вниз по профилю они резко снижаются. В почвах селитебных и парково-рекреационных зон города концентрация ^{137}Cs находится на одном уровне. Единичные более высокие значения зарегистрированы в черноземах ООПТ, где также был обнаружен максимальный показатель коэффициента вариации, что обусловлено пространственной фрагментарностью загрязнения территорий цезием после аварии на Чернобыльской АЭС. При этом медианные значения активности ^{137}Cs в выборке погребенных гумусово-аккумулятивных горизонтов АПП, несмотря на сохранившиеся повышенные

концентрации в них гумуса, показывают нулевые значения, что может служить диагностическим признаком при определении возраста городских почв и их эволюции.

4. ^{226}Ra и ^{232}Th не показали существенных корреляций между удельной активностью и физико-химическими свойствами почв. В то время как ^{40}K имеет значимые корреляции, приходящиеся на гумусово-аккумулятивные дневные AU и погребенные горизонты [AU] всех изученных городских почв, а также на карбонатно-иллювиальные горизонты ВСА естественных почв. То есть в черноземах миграционно-сегрегационных сильная корреляция наблюдается на глубине нижней границы промачивания.

5. Процесс погребения сопровождается слабым изменением активности ^{40}K в профиле, нивелируется разница между генетическими горизонтами, при этом достоверных различий между нативными и их погребенными аналогами нет. По величине активности ^{40}K тяжелые горизонты урбик генетически в большей степени связаны с нативными и погребенными горизонтами, особенно с иллювиальными горизонтами В. Средняя активность ^{40}K для горизонтов URл с облегченным гранулометрическим составом самая низкая среди всех исследованных естественных и антропогенных горизонтов, при этом достоверные различия отмечаются для всех фактических значений активности при сравнении URл с нативными, погребенными горизонтами и группой горизонтов URт.

6. В результате эволюции городских почв наблюдается процесс биогенного накопления ^{40}K в поверхностных горизонтах. В почвообразующей породе не выявлено достоверных различий между фактической и расчетной активностью ^{40}K , в то время как в горизонтах AU и AUлс расчетная активность достоверно выше, что говорит о более активном вовлечении ^{40}K в биогенный круговорот нежели его стабильных изотопов. Гранулометрический состав не имеет прямого влияния на содержание ^{40}K , вероятно, в первую очередь этот показатель обусловлен минералогическим составом.

7. Величина коэффициента биологического накопления ^{40}K и ^{137}Cs в травянистых формациях, сформированных на естественных почвах города и почвах ООПТ, превышает 1, что свидетельствует об их аккумуляции наземными частями растений. При этом наблюдается возрастание КБП с увеличением расчетной мощности корнеобитаемого слоя (в черноземе миграционно-сегрегационном величина коэффициента для ^{137}Cs при его расчете для корнеобитаемого слоя мощностью 0–10 см составила 0,66; в то время как для глубины 0–30 см и 0–100 см значение КБП возрастает до 1,74 и 4,04 соответственно). Коэффициенты биологического поглощения ^{226}Ra и ^{232}Th для всех изученных систем почва-растение близки к нулю.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

1. Activity Concentration of Natural Radionuclides and Total Heavy Metals Content in Soils of Urban Agglomeration / D. Kozyrev, S. Gorbov, O. Bezuglova [et al.] // Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure: Proceedings of Smart and Sustainable Cities 2020. Springer Geography. – 2021. – С. 111–122. – DOI 10.1007/978-3-030-75285-9_11 (Scopus)
2. Activity concentration and distribution of 40k in the soil profile of the Rostov agglomeration / Tagiverdiev S. S., Kozyrev D. A., Gorbov S. N. [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. – 2023. – Vol. 195, No 10. – Art. N° 1147. – DOI: 10.1007/s10661-023-11769-7
3. Aggregate Composition as Related to the Distribution of Different Forms of Carbon in Soils of Rostov Agglomeration / S. S. Tagiverdiev, O. S. Bezuglova, S. N. Gorbov [et al.] // Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54, No. 9. – P. 1427–1432. – DOI 10.1134/S106422932109012X.
4. Conservation and Restoration Prospects of Semi-Natural Plant Communities when Creating Parks in the Southern Russia's Steppe (a Case Study of the 70th Anniversary of Victory Park) / A. Y. Matetskaya, T. A. Karasyova, A. M. Levada [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 817, No. 1. – Art. N° 012065. – DOI 10.1088/1755-1315/817/1/012065

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ЮФУ и ВАК РФ

5. О трансформации структурного состояния почв под влиянием урбопедогенеза на примере Ростовской агломерации / С. С. Тагивердиев, О. С. Безуглова, С. Н. Горбов [и др.] // Наука Юга России. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 45–52. – DOI 10.7868/S25000640210405 (ВАК)
6. Содержание и распределение органического и неорганического углерода в городских почвах Ростовской агломерации / С. С. Тагивердиев, П. Н. Скрипников, О. С. Безуглова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2020. – № 4 (208). – С. 118–129. – DOI 10.18522/1026-2237-2020-4-118-129 (ВАК)