

УДК 631.41:631.438

DOI: 10.18522/2308-9709-2025-52-2

**Показатели, влияющие на буферность основных типов почв
Европейской части Юга России к ^{137}Cs в поверхностном слое (0-10 см)**

Иванков Д. В.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования на модельных площадках почв 30 км зоны наблюдения Ростовской АЭС. В аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях почве в 0–10 см слое при отборе по сетке 10 на 10 м коэффициенты вариации составляют (%): по содержанию гумуса 33, рН – 2, емкости катионного обмена – 12, содержанию физической глины – 6, удельной активности ^{137}Cs – 68. В лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках составляет (%): по содержанию гумуса – 19, рН – 5, емкости катионного обмена – 12, физической глины – 3, удельной активности ^{137}Cs – 28. Сильная положительная корреляция в аллювиально-луговой и лугово-каштановой почвах присуща удельной активности ^{137}Cs по отношению к содержанию гумуса, физической глине и ЕКО. Умеренная отрицательная корреляция наблюдается в лугово-каштановой почве между удельной активности ^{137}Cs и кислотностью почвы. Этот же фактор в аллювиально-луговой почве характеризуется сильной отрицательной корреляцией ($r=-0,77$).

Ключевые слова: содержания гумуса; величины рН; емкость катионного обмена; физическая глина; аллювиально-луговая почва; лугово-каштановая почва

Indicators affecting the buffering of the main types of soils in the European part of Southern Russia to ^{137}Cs in the surface layer (0-10 cm)

Ivankov D. V.

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Annotation

The paper presents the results of a study on model soil sites of 30 km of the observation zone of the Rostov NPP. In Gleyic Fluvisols soil on alluvial buried sediments in a 0-10 cm layer, when selected using a 10 by 10 m grid, the coefficients of variation are: humus content - 33%, pH - 2%, cation exchange capacity - 12%, physical clay content - 6%, specific activity ^{137}Cs - 68%. In Gleyic Kashtanozem, the humus content - 19%, the pH - 5%, the cation exchange capacity - 12%, the physical clay content - 3%, and the specific activity of ^{137}Cs - 28%. A strong positive correlation in Gleyic Fluvisols and Gleyic Kashtanozem soils is inherent in the specific activity of ^{137}Cs in relation to the content of humus, physical clay and ЕКО. A moderate negative correlation is observed in Gleyic Kashtanozem soil between the specific activity of ^{137}Cs and soil acidity. The same factor in Gleyic Fluvisols soil is characterized by a strong negative correlation ($r=-0.77$).

Keywords: humus content; pH; cation exchange capacity; physical clay; Gleyic Fluvisols soil; Gleyic Kashtanozem soil

Введение

Концепция буферности почвы проста, но предполагает глубокое понимание: почвы могут захватывать и удерживать различные молекулы, от питательных веществ до загрязнителей, играя решающую роль в круговороте и секвестрации этих веществ (Núñez-Delgado, 2024). Однако химические, физические, биологические и климатические факторы, влияющие на буферность почвы и ее практическую полезность, многочисленны и сложны (например, pH, ЕКО, состав и концентрация органических веществ,

Иванков Д. В., Показатели, влияющие на буферность основных типов почв Европейской части Юга России к ^{137}Cs в поверхностном слое (0-10 см) // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 52; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-52/article-2>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-52-2

содержание физической глины, пористость, биологическая активность, температура, осадки и т. д.) (Shaaban et al., 2018); (Chiou et al., 2000); (Balseiro-Romero et al., 2018); (Joo et al., 2011); (Martz et al., 2019).

Оценка буферности почв является важной стратегией распознавания рисков для растений и людей и принятия мер по улучшению защиты окружающей среды. В некоторых странах, таких как Канада, США и Австралия, были установлены индикаторы для управления почвенными ресурсами, связанные с устойчивым использованием почвы (уровень pH, рост биомассы дождевых червей, общее содержание органического азота, общий органический углерод и другие) (Glover et al., 2000); (Qi et al., 2009); (Volchko et al., 2014).

Цель исследования

Установить показатели почв, в большей степени влияющие на буферность некоторых типов почв Ростовской области к искусственному ^{137}Cs в поверхностном слое (0–10 см)

Материал и методы исследования

Объектом исследования стали аллювиально-луговая насыщенная мощная очень низкогумусная легкосуглинистая на аллювиальных погребенных отложениях и лугово-каштановая мощная среднегумусная тяжелосуглинистая на лессовидных суглинках почвы 30 км зоны наблюдения Ростовской АЭС.

Контрольный участок представленный лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почвой (рис. 1а) расположен в Дубовском районе, в 2 км на юг от трассы Волгодонск-Жуковское и 30 м на юго-запад от указателя ст. Подгоренская. Представлен многолетней залежью с луговой растительностью. Аллювиально-луговая насыщенная мощная очень низкогумусная легкосуглинистая на аллювиальных погребенных отложениях почва (рис. 1б) приурочена к следующему контрольному участку. Участок расположен: Ростовская обл., Волгодонской р-он, 200 м на Юго-Запад от трассы Волгодонск – Цимлянск в пойме реки Дон со 100% проективным покрытием в виде луговой растительности (полынь, тысячелистник, эгилопс, кострец и др.).

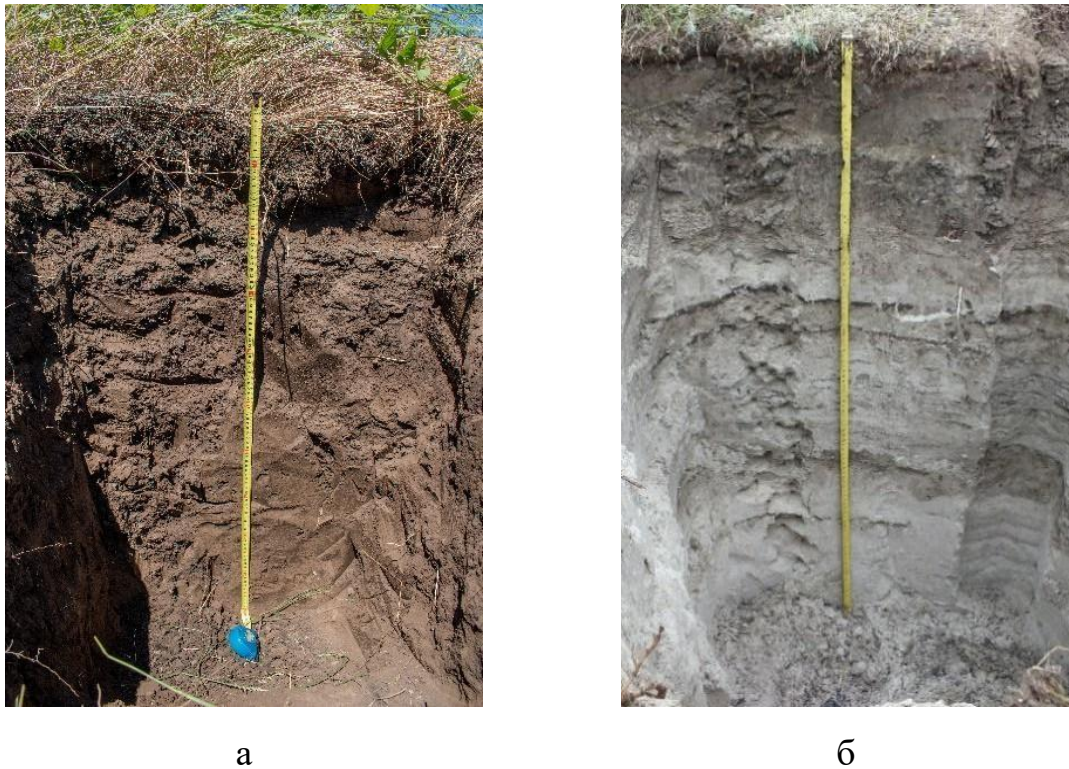


Рис. 1 – Профили а) лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках б) аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях почв

Определение удельной активности естественных и искусственного радионуклидов проводили гамма-спектрометрическим методом.

При определении гранулометрического состава образцы подготавливались пирофосфатный способ (метод Долгова-Личмановой), при дальнейшем определении ГМС методом пипетирования по А.А. Качинскому (Морозов и др., 2011).

Определение гумуса в почвенных образцах выполняли по методу Тюриня в модификации Симакова (Аринушкина, 1970).

Кислотность почв определяли согласно ГОСТ 26423–85 потенциометрическим методом.

Емкость катионного обмена определяли по ГОСТ 17.4.4.01-84 методом Бобко-Аскинази-Алешина в модификации ЦИНАО.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание органического вещества наряду с поступающими веществами, таких как растительные и животные остатки, зависит и от процессов минерализации и его миграцией с нисходящими токами влаги (Skalský et al., 2024).

Для аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях почвы коэффициент вариации содержания гумуса в 0–10 см слое при отборе по сетке 10 на 10 м достигает 33 % (рис. 2), что более чем в два раза превышает погрешность метода (15 %).

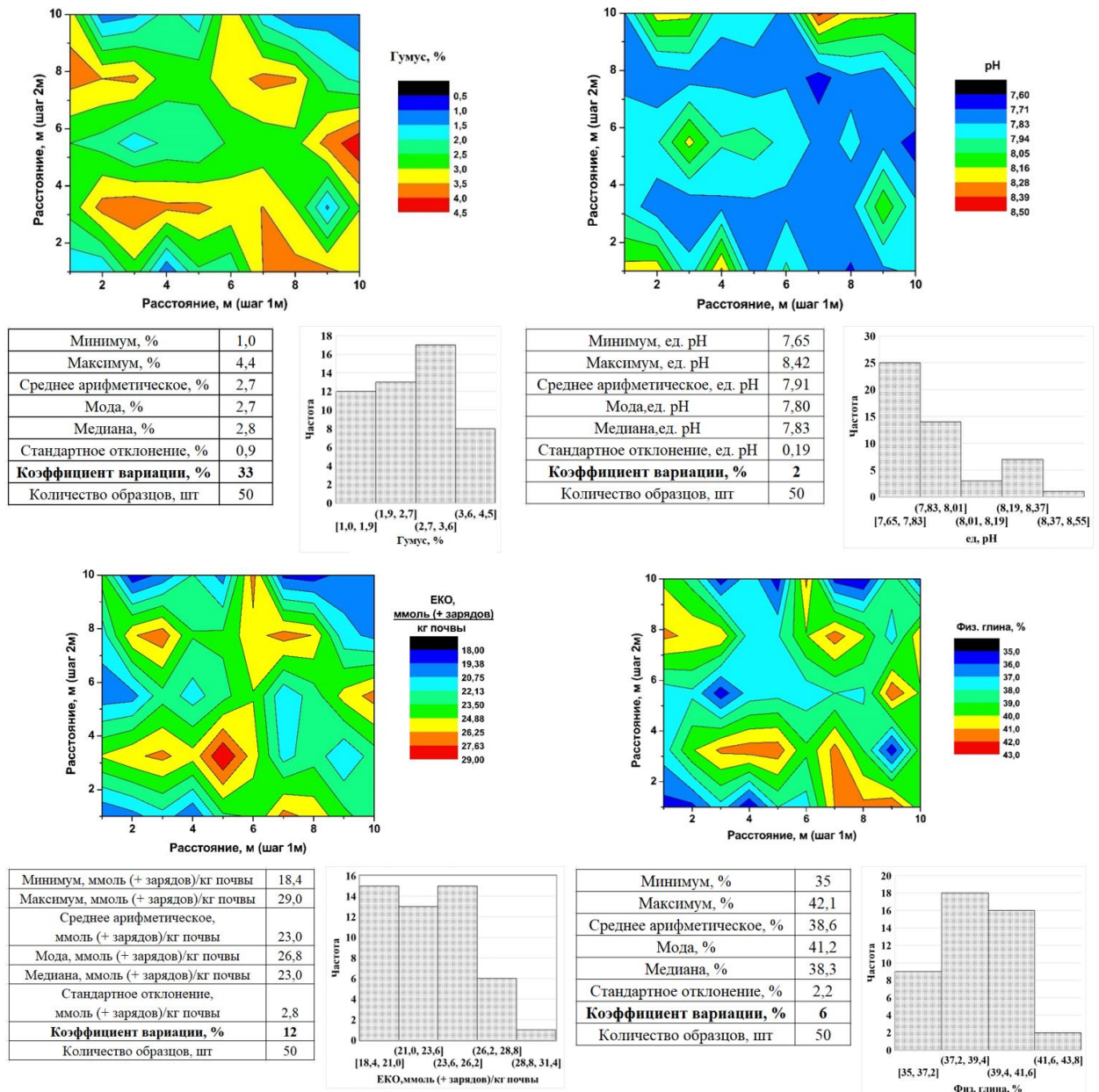


Рис. 2 – Пространственное варьирование содержания гумуса (%), величины pH, емкости катионного обмена (ммоль (+ зарядов)/кг почвы) и содержания физической глины (%) в аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях почве в 0–10 см слое при отборе по сетке 10 на 10 м

Коэффициент вариации превышает погрешность метода и на участке с лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почвой (19%) (рис. 3).

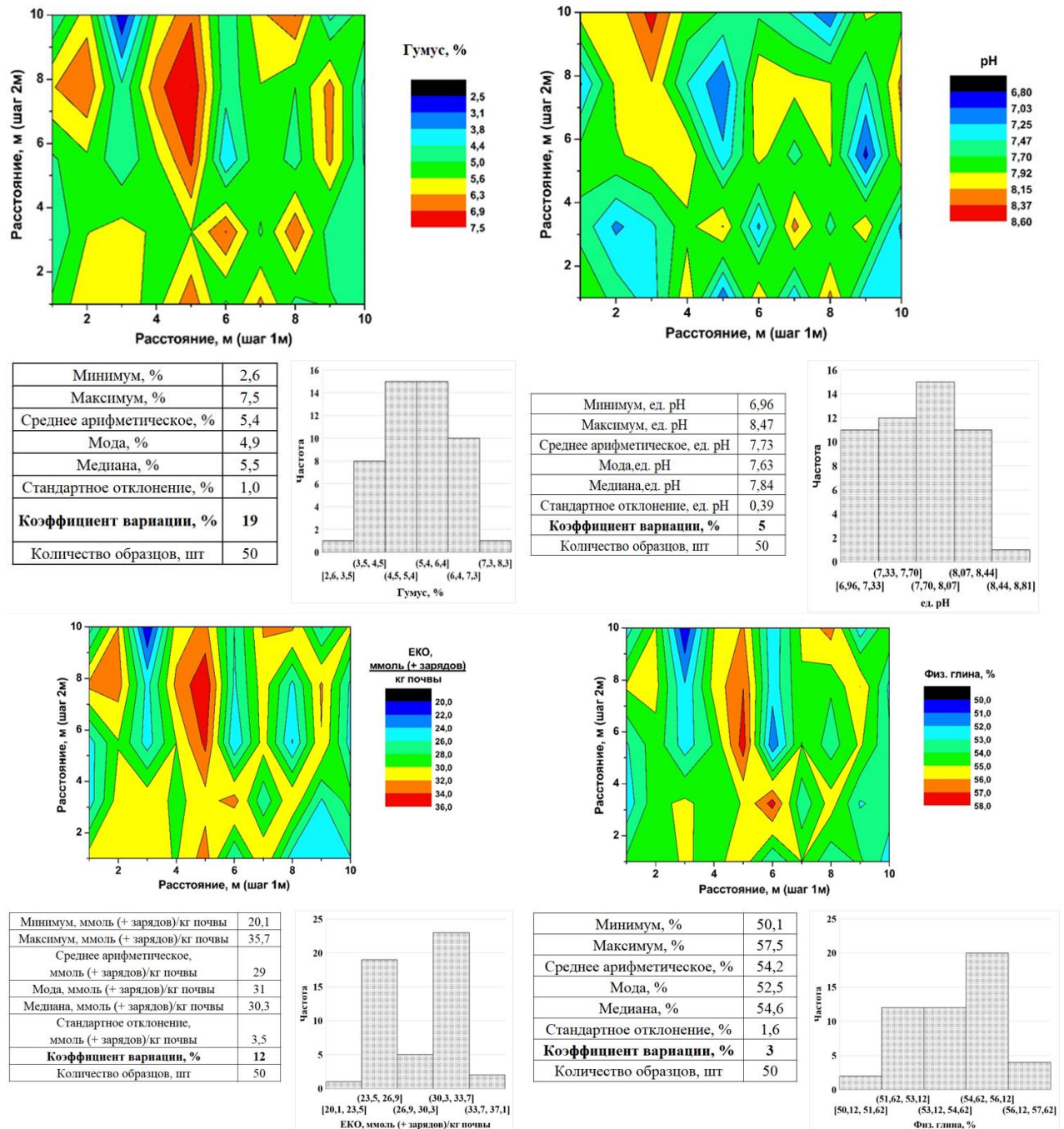


Рис. 3 – Пространственное варьирование содержания гумуса (%), величины pH, емкости катионного обмена (ммоль (+ зарядов)/кг почвы) и содержания физической глины (%) в лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почве в 0–10 см слое при отборе по сетке 10 на 10 м

Данное распределение гумуса в пределах элементарного квадрата 10 на 10 метров можно объяснить на уровне небольших масштабов до метра, где

микрорельеф влияет на свойства почвы на коротких расстояниях (Kooijman, et al., 2019); (Pawlik and Kasprzak, 2015); (Šamonil et al., 2016).

Микрорельеф напрямую влияет на внутрипочвенный водный поток и процессы переноса, такие как эрозия и отложение почвенного материала, включая выщелачивание и перераспределение питательных веществ, что также сказывается на водном балансе почвы и ее аэрации. Следовательно, такие процессы почвообразования могут демонстрировать сильную зависимость от микрорельефа, действовать в различных пространственных масштабах и могут приводить к различным пространственным закономерностям свойств почвы. Данный факт подтверждается рельефом контрольных участков (рис. 4).

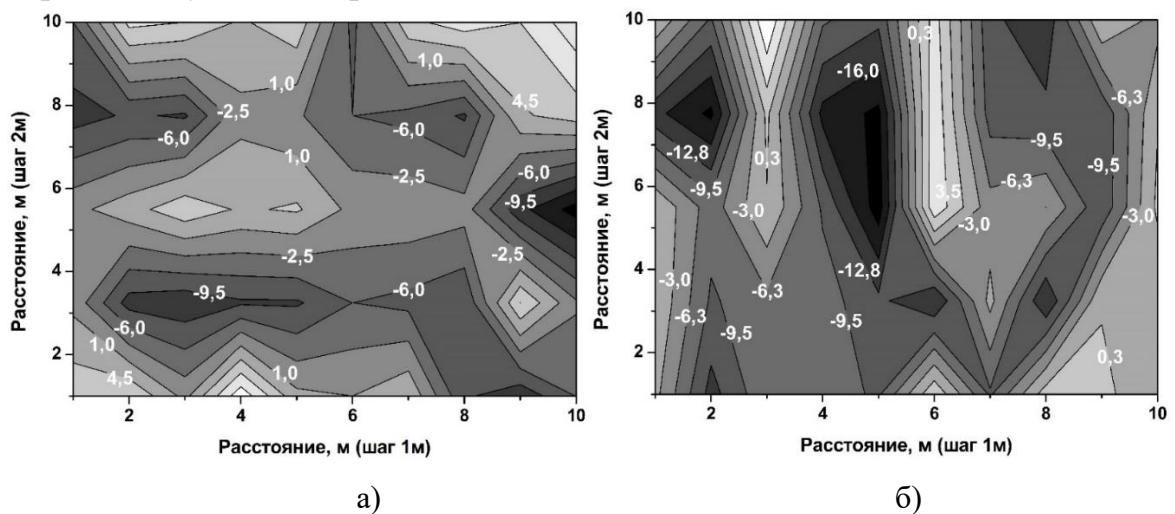


Рис. 4 – Микрорельеф аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях (а) и лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках (б) почв по сетке 10 на 10 м

Стоит отметить, что в результате выхода реки из берегов, на аллювиально-луговой почве, которая сформирована в пойме Дона, наблюдается неравномерное перераспределения гумуса, и это становится причиной наибольшего коэффициента вариации по его содержанию.

Среднее значение рН в пределах исследуемого квадрата 10×10 м в аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях почве составляет 7,91 ед. рН с коэффициентом вариации 2 %.

Для лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почвы в прямоугольнике 10×10 м среднее значение

составляет 7,73 ед. рН и коэффициент вариации – 3 %, что не превышает погрешность метода.

Емкость катионного обмена в аллювиально-луговой почве варьирует в диапазоне от 18,4 до 29,0 ммоль (+ зарядов)/кг почвы, для лугово-каштановой – 20,1–35,7 ммоль (+ зарядов)/кг почвы. По емкости катионного обмена коэффициенты варьирования лежат в пределах погрешности метода (20%).

Содержание гранулометрических фракций <0.01 мм в аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях и лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почвах колеблется в узком диапазоне, не позволяющем говорить о перераспределении фракции физической глины при отборе по сетке 10 на 10 м в 0–10 см слое.

Рассмотренные выше физико-химические свойства почв наглядно коррелируют друг с другом и рельефом контрольных площадок исследования.

Объясняется данный факт пространственной диффузией, благодаря которой такие свойства почв, как содержание питательных веществ, рН почвы, количество гумуса, загрязняющих веществ в пределах одной области или ячейки сетки могут быть перенесены в соседние области или ячейки боковым потоком воды (MacMillan and Shary, 2009).

На рисунке 5, в виде картосхем, и в таблице 1 представлены результаты распределения искусственного ^{137}Cs (Бк/кг) в аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях (а) и лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках (б) почвах в 0-10 см слое при отборе по сетке 10 на 10 м.

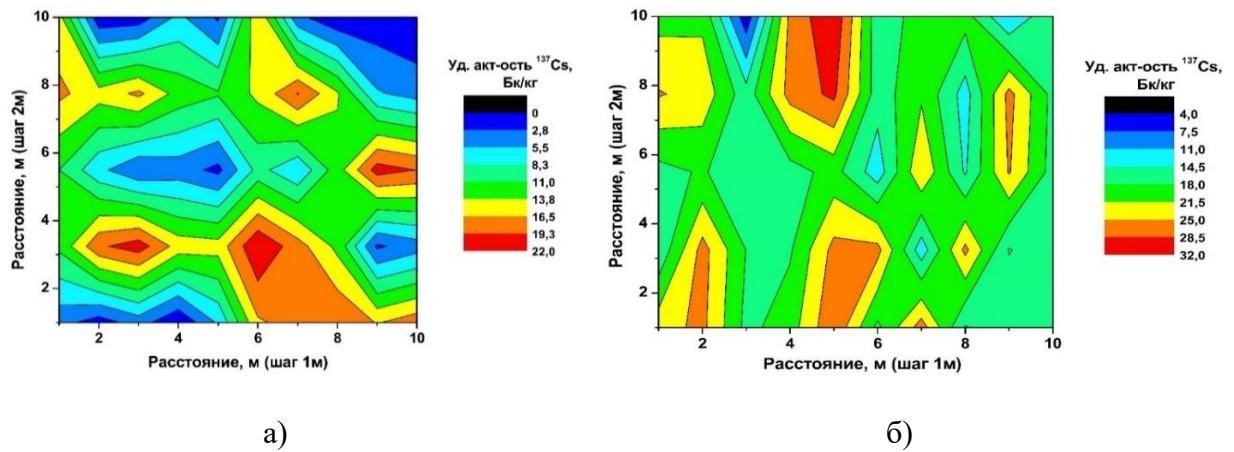


Рис. 5 – Пространственное варьирование удельной активности ^{137}Cs (Бк/кг) в слое 0–10 см почв: аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях (а) и лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках (б) при отборе по сетке 10×10 м

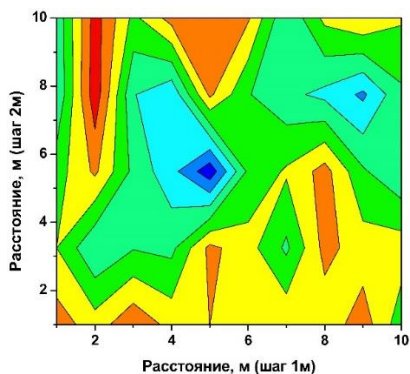
Наблюдается очень широкий диапазон варьирования удельной активности искусственного радионуклида ^{137}Cs , как в аллювиально-луговой (0,2–21,9 Бк/кг), так и в лугово-каштановой (5,1–31,6 Бк/кг) почвах в пределах исследуемого прямоугольника 10 на 10 м в слое 0–10 см при среднем содержании в нем в 10,3 и 19,6 Бк/кг соответственно (табл. 1).

Таблица 1 – Статистические данные поверхностного распределения удельной активности искусственного ^{137}Cs в аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях и лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почвах в слое 0–10 см при отборе по сетке 10 × 10 м

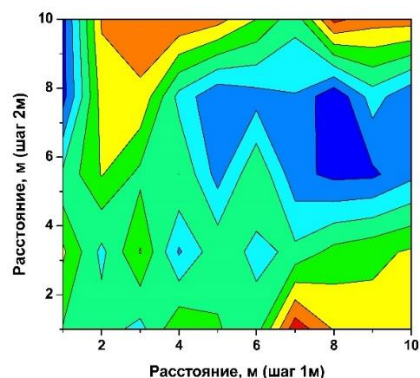
^{137}Cs	Аллювиально-луговая почва	Лугово-каштановая почва
Минимум, Бк/кг	0,2	5,1
Максимум, Бк/кг	21,9	31,6
Среднее, Бк/кг	10,3	19,6
Медиана, Бк/кг	11,5	18,2
Стандартная ошибка, Бк/кг	1,0	0,8
Стандартное отклонение, Бк/кг	7,0	5,5
Коэффициент вариации, %	68	28
Количество образцов, шт	50	50

Коэффициент вариации ^{137}Cs в аллювиально-луговой почве достигает 68 %, что в разы превышает ошибку метода. Данный факт можно объяснить корреляционной зависимостью распределения удельной активности искусственного радионуклида и гумуса почвы (Бураева, 2024). Подобная картина характерна и для лугово-каштановой почвы. В ней коэффициент корреляции достигает 28%.

Поверхностное распределение удельной активности естественных радионуклидов (^{226}Ra и ^{232}Th (Бк/кг)) в аллювиально-луговой и лугово-каштановой почвах в 0–10 см слое при отборе по сетке 10 на 10 м представлены на рисунке 6.

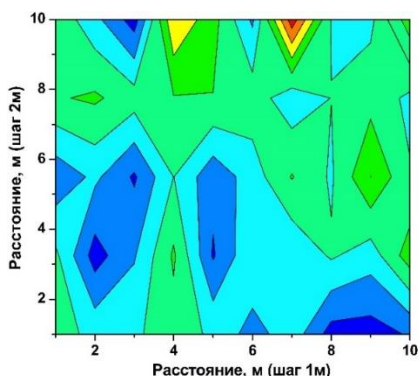


Минимум, Бк/кг	6,5
Максимум, Бк/кг	17,5
Среднее арифметическое, Бк/кг	13,2
Мода, Бк/кг	10,6
Медиана, Бк/кг	13,7
Стандартное отклонение, Бк/кг	2,4
Коэффициент вариации, %	18
Количество образцов, шт	50

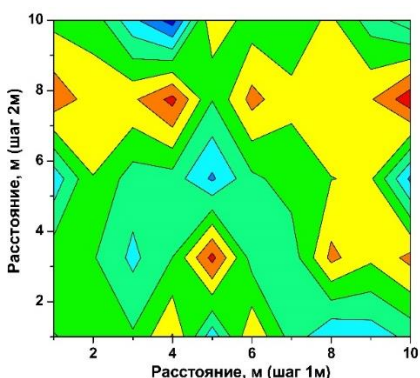


Минимум, Бк/кг	7,2
Максимум, Бк/кг	18,5
Среднее арифметическое, Бк/кг	12,7
Мода, Бк/кг	11,0
Медиана, Бк/кг	12,8
Стандартное отклонение, Бк/кг	3,0
Коэффициент вариации, %	19
Количество образцов, шт	50

а)



Минимум, Бк/кг	15,7
Максимум, Бк/кг	38,7
Среднее арифметическое, Бк/кг	23,5
Мода, Бк/кг	18,2
Медиана, Бк/кг	23,3
Стандартное отклонение, Бк/кг	4,7
Коэффициент вариации, %	20
Количество образцов, шт	50



Минимум, Бк/кг	19,2
Максимум, Бк/кг	35,3
Среднее арифметическое, Бк/кг	27,9
Мода, Бк/кг	28,0
Медиана, Бк/кг	28,0
Стандартное отклонение, Бк/кг	3,6
Коэффициент вариации, %	13
Количество образцов, шт	50

б)

Рис. 6 – Пространственное варьирование удельной активности ^{226}Ra и ^{232}Th (Бк/кг) в слое 0–10 см почв: аллювиально-луговой насыщенной мощной очень

низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях (а) и лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках (б) при отборе по сетке 10×10 м

Естественные же радионуклиды (^{226}Ra , ^{232}Th) в аллювиально-луговой и лугово-каштановой почвах распределены равномерно в 0–10 см слое при отборе по сетке 10 на 10 м. Их коэффициенты вариации лежат в пределах ошибки метода определения удельной активности радионуклидов (20%). Для составления перечня показателей в большей степени влияющих на содержание естественных и искусственных радионуклидов был использован корреляционный анализ между изучаемыми физико-химическими свойствами почв и радионуклидами на примере аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях и лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках (табл. 2) почвах.

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции удельной активности радионуклидов (^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) с физико-химическими свойствами (гумус, рН, физ. глина и ЕКО) почв в 0–10 см

Радионуклиды	Гумус	рН	Физглина	ЕКО
Аллювиально-луговая насыщенная мощная очень низкогумусная легкосуглинистая на аллювиальных погребенных отложениях почва				
^{137}Cs	0,91	-0,77	0,79	0,79
^{226}Ra	-0,18	0,12	-0,10	-0,15
^{232}Th	-0,35	0,30	-0,24	-0,21
^{40}K	-0,12	0,09	-0,01	-0,12
Лугово-каштановая мощная среднегумусная тяжелосуглинистая на лессовидных суглинках почва				
^{137}Cs	0,82	-0,59	0,78	0,70
^{226}Ra	0,34	-0,22	0,33	0,37
^{232}Th	0,20	0,01	0,11	0,14
^{40}K	0,33	-0,21	0,26	0,23

Как видно из полученных данных, сильная положительная корреляция ($r > 0,70 \leq 1,00$) в аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях почве присуща удельной активности ^{137}Cs по отношению к содержанию гумуса, физической глине и ЕКО. Подобная корреляция

наблюдается и для лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почвы.

Для аллювиально-луговой и лугово-каштановой почв корреляционные силы емкости катионного обмена и удельной активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K отсутствуют.

Умеренная отрицательная корреляция наблюдается в лугово-каштановой почве между удельной активностью ^{137}Cs и кислотностью почвы. Этот же фактор в аллювиально-луговой почве характеризуются сильной отрицательной корреляцией ($r=-0,77$).

Также для аллювиально-луговой насыщенной мощной очень низкогумусной легкосуглинистой на аллювиальных погребенных отложениях почвы наблюдается умеренная отрицательная корреляция ($r=-0,35$) между удельной активностью ^{232}Th и содержанием гумуса почвы, умеренная положительная корреляция ($r=0,35$) между удельной активностью ^{232}Th и рН. В лугово-каштановой мощной среднегумусной тяжелосуглинистой на лессовидных суглинках почве прослеживается умеренная положительная корреляция между ^{226}Ra и гумусом ($r=0,34$) и содержанием физ. глины ($r=0,33$), а также умеренная положительная корреляция между ^{40}K и гумусом ($r=0,33$).

Заключение

Буферность изученных типов почв Ростовской области к искусственному ^{137}Cs в поверхностном слое (0-10 см) в большей степени обеспечивается содержанием гумуса и рельефом местности.

Список литературы

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 488 с.
2. Бураева Е.А. Радиоактивность почв Юга Европейской части: дис. ... доктора биол. наук: 1.5.19 Почвоведение – Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 2022.– 466 с.
3. ГОСТ 17.4.4.01-84 Почвы. Методы определения емкости катионного обмена.
4. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.
5. Морозов, И.В., Морозова И.Ю, Моисеева Т.С. Учебно-методическое пособие к лабораторным занятиям по Физике почв Раздел «Физика твердой части почв». - Ростов н/Д: типография ЮФУ,2011. -69с.

6. Balseiro-Romero, M., Monterroso, C., Casares, J.J., 2018. Environmental fate of petroleum hydrocarbons in soil: review of multiphase transport, mass transfer, and natural attenuation processes. *Pedosphere* 28, 833–847.
7. Chiou, C.T., Kile, D.E., Rutherford, D.W., Sheng, G., Boyd, S.A., 2000. Sorption of selected organic compounds from water to a peat soil and its humic-acid and humin fractions: potential sources of the sorption nonlinearity. *Environ. Sci. Technol.* 34, 1254–1258.
8. Glover, J.D., Reganold, J.P., Andrews, P.K., 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington state. *Agric. Ecosyst. Environ.* 80 (1–2), 29–45.
9. Joo, J.C., Kim, J.Y., Nam, K., 2011. Sorption of nonpolar neutral organic compounds to model aquifer sands: implications on blocking effect. *J. Environ. Sci. Heal. A.* 46, 1008–1019.
10. Kooijman A. M., Weiler H. A., Cusell C., Anders N., Meng X., Seijmonsbergen A. C., Cammeraat L. H. Litter quality and microtopography as key drivers to topsoil properties and understory plant diversity in ancient broadleaved forests on decalcified marl // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Т. 684. – С. 113-125.
11. MacMillan R. A., Shary P. A. Landforms and landform elements in geomorphometry // *Developments in soil science*. – 2009. – Т. 33. – С. 227-254.
12. Martz, M., Heil, J., Marschner, B., Stumpe, B., 2019. Effects of soil organic carbon (SOC) content and accessibility in subsoils on the sorption processes of the model pollutants nonylphenol (4-n-NP) and perfluorooctanoic acid (PFOA). *Sci. Total Environ.* 672, 162–173.
13. Núñez-Delgado, A., 2024. *Frontier Studies in Soil Science*, first ed. Springer, Cham, Switzerland.
14. Pawlik Ł., Kasprzak M. Electrical resistivity tomography (ERT) of pit-and-mound microrelief, Mt Rogowa Kopa case study, the Stołowe Mountains, SW Poland // *Landform Analysis*. – 2015. – Т. 29.
15. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149, 325–334.
16. Šamonil P., Valtera M., Schaetzl R. J., Adam D., Vašíčková I., Daněk P., Janík D., Tejnecký V. Impacts of old, comparatively stable, treethrow microtopography on soils and forest dynamics in the northern hardwoods of Michigan, USA // *Catena*. – 2016. – Т. 140. – С. 55-65.
17. Shaaban, M., Van Zwieten, L., Bashir, S., Younas, A., Núñez-Delgado, A., Chhajro, M.A., Kubar, K.A., Ali, U., Rana, M.S., Mehmood, M.A., 2018. A

- concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *J. Environ. Manag.* 228, 429–440.
18. Skalský R., Barančíková G., Makovníková J., Koco Š., Halas J., Kobza, J. Regional topsoil organic carbon content in the agricultural soils of Slovakia and its drivers, as revealed by the most recent national soil monitoring data // *Environmental Challenges*. – 2024. – T. 14. – С. 100816.
19. Volchko, Y., Norrman, J., Rosén, L., Norberg, T., 2014. SFbox—a tool for evaluating the effects on soil functions in remediation projects. *Integrated Environ. Assess. Manag.* 10, 566–575.

References

1. Arinushkina E.V. Handbook of Chemical Analysis of Soils. - M.: Moscow State University Publishing House, 1970. - 488 p.
2. Buraeva E.A. Radioactivity of Soils of the South of the European Part: dis. ... Doctor of Biological Sciences: 1.5.19 Soil Science - Southern Federal University, Rostov-on-Don, 2022. - 466 p.
3. GOST 17.4.4.01-84 Soils. Methods for Determining the Cation Exchange Capacity.
4. GOST 26423-85 Soils. Methods for Determining the Specific Electrical Conductivity, pH, and Solid Residue of an Aqueous Extract.
5. Morozov, I.V., Morozova I.Yu., Moiseeva T.S. Textbook for Laboratory Classes on Soil Physics Section "Physics of the Solid Part of Soils". - Rostov n/d: printing house of Southern Federal University, 2011. - 69s.
6. Balseiro-Romero, M., Monterroso, C., Casares, J.J., 2018. Environmental fate of petroleum hydrocarbons in soil: review of multiphase transport, mass transfer, and natural attenuation processes. *Pedosphere* 28, 833–847.
7. Chiou, C.T., Kile, D.E., Rutherford, D.W., Sheng, G., Boyd, S.A., 2000. Sorption of selected organic compounds from water to a peat soil and its humic-acid and humin fractions: potential sources of the sorption nonlinearity. *Environ. Sci. Technol.* 34, 1254–1258.
8. Glover, J.D., Reganold, J.P., Andrews, P.K., 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington state. *Agric. Ecosyst. Environ.* 80 (1–2), 29–45.
9. Joo, J.C., Kim, J.Y., Nam, K., 2011. Sorption of nonpolar neutral organic compounds to model aquifer sands: implications on blocking effect. *J. Environ. Sci. Heal. A.* 46, 1008–1019.
10. Kooijman A. M., Weiler H. A., Cusell C., Anders N., Meng X., Seijmonsbergen A. C., Cammeraat L. H. Litter quality and microtopography

- as key drivers to topsoil properties and understory plant diversity in ancient broadleaved forests on decalcified marl // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Т. 684. – С. 113-125.
11. MacMillan R. A., Shary P. A. Landforms and landform elements in geomorphometry // *Developments in soil science*. – 2009. – Т. 33. – С. 227-254.
 12. Martz, M., Heil, J., Marschner, B., Stumpe, B., 2019. Effects of soil organic carbon (SOC) content and accessibility in subsoils on the sorption processes of the model pollutants nonylphenol (4-n-NP) and perfluorooctanoic acid (PFOA). *Sci. Total Environ.* 672, 162–173.
 13. Núñez-Delgado, A., 2024. *Frontier Studies in Soil Science*, first ed. Springer, Cham, Switzerland.
 14. Pawlik Ł., Kasprzak M. Electrical resistivity tomography (ERT) of pit-and-mound microrelief, Mt Rogowa Kopa case study, the Stołowe Mountains, SW Poland // *Landform Analysis*. – 2015. – Т. 29.
 15. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149, 325–334.
 16. Šamonil P., Valtera M., Schaetzl R. J., Adam D., Vašíčková I., Daněk P., Janík D., Tejnecký V. Impacts of old, comparatively stable, treethrow microtopography on soils and forest dynamics in the northern hardwoods of Michigan, USA // *Catena*. – 2016. – Т. 140. – С. 55-65.
 17. Shaaban, M., Van Zwieten, L., Bashir, S., Younas, A., Núñez-Delgado, A., Chhajro, M.A., Kubar, K.A., Ali, U., Rana, M.S., Mehmood, M.A., 2018. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *J. Environ. Manag.* 228, 429–440.
 18. Skalský R., Barančíková G., Makovníková J., Koco Š., Halas J., Kobza, J. Regional topsoil organic carbon content in the agricultural soils of Slovakia and its drivers, as revealed by the most recent national soil monitoring data // *Environmental Challenges*. – 2024. – Т. 14. – С. 100816.
 19. Volchko, Y., Norrman, J., Rosén, L., Norberg, T., 2014. SFbox—a tool for evaluating the effects on soil functions in remediation projects. *Integrated Environ. Assess. Manag.* 10, 566–575.

Статья поступила в редакцию 31 мая 2025 г.

Поступила после доработки 9 июня 2025 г.

Принята к печати 9 июня 2025 г.

Received May 31, 2025

Revised June 9, 2025

Accepted June 9, 2025