



УДК 631.412
DOI 10.52575/2712-7443-2024-48-4-616-627

Кислотно-основная буферность почв разного гранулометрического состава в условиях загрязнения тяжелыми металлами

**Замулина И.В., Ларина Э.В., Бурачевская М.В., Лацынник Е.С.,
Минкина Т.М., Манджиева С.С.**

Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 194/1
E-mail: marina.0911@mail.ru

Аннотация. Для изучения влияния гранулометрического состава на кислотно-основные свойства почвы и почвенно-песчаных субстратов при их модельном загрязнении Pb, Cd и As исследована буферность к основанию и кислоте методом непрерывного потенциометрического титрования водных суспензий. По кривым титрования рассчитана буферность по интервалам значений pH и построены диаграммы зависимости этой величины от pH. При изменении степени кислотности или щелочности почвенного раствора активируются буферные процессы, связанные с участием компонентов твердой фазы почвы. Участниками кислотно-основных буферных реакций в диапазоне pH от 4,2 до 8 в основном являются катионообменная емкость почвы, карбонаты и силикаты почвы. При увеличении доли песка в гранулометрическом составе почв кислотно-основная буферная емкость снижается, вследствие чего снижается способность противостоять подкислению в условиях загрязнения Cd, Pb, As за счет гидролиза и вытеснения протонов из почвенного поглощающего комплекса в результате обменных процессов с катионами. Характер зависимости определяется составом твердой фазы, присутствием в ней карбонатов и обменных катионов. Для оценки качественного состояния почвы эффективным критерием можно считать изменение параметров кислотно-основной буферности.

Ключевые слова: буферная способность, чернозем южный, почвенные субстраты, физико-химические свойства, кислотность

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-24-00646) в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Замулина И.В., Ларина Э.В., Бурачевская М.В., Лацынник Е.С., Минкина Т.М., Манджиева С.С. 2024. Кислотно-основная буферность почв разного гранулометрического состава в условиях загрязнения тяжелыми металлами. Региональные геосистемы, 48(4): 616–627. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-616-627

Acid-Base Buffering of Soils with Different Granulometric Composition in the Conditions of Heavy Metal Pollution

**Inna V. Zamulina, Elvira V. Larina, Marina V. Burachevskaya,
Elizaveta S. Lacynnik, Tatiana M. Minkina, Saglara S. Mandzhieva**

Southern Federal University
194/1 Stachki Av, Rostov-on-Don 344090, Russia
E-mail: marina.0911@mail.ru

Abstract. The acid-base buffering capacity of soils and soil-sandy substrates was studied with a view to investigating the effect of the granulometric composition on their acid-base properties under the model contamination with Pb, Cd, and As. The method of continuous potentiometric titration of aqueous suspensions was applied. The titration curves were used to calculate the buffering over the pH value intervals. The authors provide diagrams to show the buffering value dependence on pH. The research findings reveal that when a soil solution is acidified or alkalinized, buffer mechanisms are triggered with

the participation of certain components of the soil solid phase. The participants of acid-alkaline buffer reactions in the pH range from 4.2 to 8 are mainly the soil cation exchange capacity, soil carbonates and silicates. With an increase in the proportion of sand in the granulometric composition of soils, the acid-base buffer capacity decreases, resulting in a reduced ability to resist acidification in conditions of Cd, Pb, and As pollution, due to hydrolysis and displacement of protons from the soil absorbing complex, the latter being caused by exchange processes with cations. The nature of the dependence is determined by the composition of the solid phase, the presence of carbonates and exchange cations in it. The authors suggest that a change in the acid-base buffering parameters may be used as an objective criterion for assessing the qualitative condition of soil.

Keywords: Buffering capacity, Haplic Chernozem, soil substrates, physico-chemical properties, acidity

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-24-00646) at the Southern Federal University.

For citation: Zamulina I.V., Larina E.V., Burachevskaya M.V., Lacynnik E.S., Minkina T.M., Mandzhieva S.S. 2024. Acid-Base Buffering of Soils with Different Granulometric Composition in the Conditions of Heavy Metal Pollution. *Regional Geosystems*, 48(4): 616–627. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-4-616-627

Введение

Методы оценки экологического состояния через изучение функционирования буферных систем играют важную роль в контроле трансформационных изменений в почвах. Изменения pH почв имеют прямое влияние на экологическую устойчивость, а кислотно-основные буферные системы играют ключевую роль в поддержании постоянного pH. Реакция почвенного раствора зависит от суммарного действия нескольких факторов: минералогического состава, наличия содержания свободных солей, химического состава минеральной части почвы, качества и количества органического вещества, влажности почвы, жизнедеятельности почвенной биоты [Русакова и др., 2012; Соколова и др., 2012; Надточий, Мыслыва, 2014; Ковалев, Ковалева, 2020].

Кислотно-основные свойства почв являются фактором, влияющим на подвижность и доступность металлов в почве [Perelomov et al., 2021]. В щелочных условиях при высоком содержании органических веществ, емкости катионного обмена и карбонатов металлы образуют осадки гидроксидов и прочно адсорбируются твердой фазой почв, что снижает их подвижность. Отрицательный заряд на поверхности глинистых минералов, гидратированных оксидов и органического вещества будет увеличиваться по мере увеличения pH почвы, что усиливает адсорбцию ионов ТМ и снижает концентрацию их в почвенном растворе [Шабанов, Маричев, 2020; Shabanov et al., 2024]. При снижении pH системы отрицательный заряд почвенных коллоидов снижается, конкурентный эффект H^+ усиливается, в результате чего увеличивается растворимая и обменная фракции металлов [Медведев, Деревягин, 2017; Perelomov et al., 2021]. Кислотно-основная буферность, как способность почв противостоять изменению pH в условиях загрязнения тяжелыми металлами, может быть использована для оценки экологического состояния почв [Козлова, Керимадзе, 2020; Головатый и др., 2021].

Цель работы – изучить изменения параметров кислотно-основной буферности почвы различного гранулометрического состава при модельном загрязнении Cd, Pb и As, что позволит учитывать регуляторную функцию почв при экологическом нормировании.

Объекты и методы исследования

Кислотно-основная буферность почв различного гранулометрического состава была исследована в рамках экспериментального модельного опыта с верхним слоем черно-



зема (0–20 см) южного среднemocного тяжелосуглинистого. Образцы почвы отбирались в Миллеровском районе Ростовской области на фоновом участке, не подверженном антропогенному влиянию (согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017¹) (табл. 1). Черноземы южные являются преобладающим подтипом почв данного района и занимают более 70 % территории [Безуглова, Хырхырова, 2008].

Таблица 1
Table 1

Физико-химические свойства чернозема южного
Physico-chemical properties of Haplic Chernozem

Горизонт, глубина в см	рН	Физическая глина (<0,01 мм)	Ил (<0,001 мм)	Сорг	CaCO ₃	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	ЕКО
		%					смоль·кг ⁻¹
А, 0–20	7,5	49,3	24,6	2,9	0,3	35,9	36,5

Для проведения модельного эксперимента в сосуды с дренажем помещали по 2 кг воздушно-сухой почвы, предварительно очищенной от крупных органических остатков, измельченной пестиком с резиновым наконечником и просеянной через сито с размером ячеек 2 мм. В соответствии с экспериментальной схемой (табл. 2) в почву добавляли нитраты Pb, Cd и As в форме арсената натрия. Дозы загрязнения отражали невысокий (2 ОДК), средний (5 ОДК) и высокий (10 ОДК) уровень загрязнения почвы [Minkina et al., 2017] (ОДК Pb = 130 мг/кг; ОДК Cd = 2 мг/кг; ОДК As = 10 мг/кг по СанПиН 1.2.3685-21). (ОДК Pb = 130 мг/кг; ОДК Cd = 2 мг/кг; ОДК As = 10 мг/кг)². Для того, чтобы выяснить совместный эффект загрязнения на высокой дозе загрязнения (10 ОДК) были заложены варианты с полиэлементным загрязнением Pb, Cd и As. Варианты опыта отражали почвы с различным гранулометрическим составом и содержанием органического вещества, карбонатов и рН при помощи создания почвенных субстратов путем разбавления кварцевым песком в разных соотношениях (25, 50 и 75 % от массы почвы) (см. табл. 2). Почвенные образцы инкубировали в течение 6 месяцев при влажности, составляющей 60 % от полной влагоемкости, при температуре +20–22°C и естественном освещении.

Для изучения влияния кислотно-основных свойств почв на трансформацию ТМ и As в почвах и их субстратах была проведена оценка буферности методом непрерывного потенциометрического титрования водных суспензий. Титрование выполнялось в суспензиях при соотношении почва : вода 1 : 25 до значения рН 3 при титровании кислотой (0,1 н. HCl) и до рН 10 при титровании основанием (0,1 н. NaOH). Титрант вводили порциями по 0,2 мл, регистрируя изменение рН через 4 минуты после каждой добавки. На основе полученных данных построены кривые титрования, а величины общей буферности к кислоте и основанию определены как объем титранта, необходимый для достижения рН 3 и 10 на единицу массы почвы, соответственно [Соколова и др., 2012].

Для оценки изменения кислотно-основной буферности при воздействии Cd, Pb, As были выбраны варианты совместного внесения 10 ОДК в условиях разбавления песком 0–75 %. По кривым титрования рассчитана буферность по интервалам значений рН и построены диаграммы зависимости этой величины от рН.

¹ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. 2019. М., Стандартинформ, 12 с.

² СанПиН 1.2.3685-1. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Электронный ресурс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 28.10.2024)

Таблица 2
Table 2Схема модельного опыта с загрязнением почв и разбавлением песком
Scheme of the model experiment with soil contamination and sand dilution

№	Варианты опыта
1	Контроль
2	Контроль + 25 % песка
3	Контроль + 50 % песка
4	Контроль + 75 % песка
5	2 ОДК Pb / Cd / As
6	2 ОДК Pb / Cd / As + 25 % песка
7	2 ОДК Pb / Cd / As + 50 % песка
8	2 ОДК Pb / Cd / As + 75 % песка
9	5 ОДК Pb / Cd / As
10	5 ОДК Pb / Cd / As + 25 % песка
11	5 ОДК Pb / Cd / As + 50 % песка
12	5 ОДК Pb / Cd / As + 75 % песка
13	10 ОДК Pb / Cd / As
14	10 ОДК Pb / Cd / As + 25 % песка
15	10 ОДК Pb / Cd / As + 50 % песка
16	10 ОДК Pb / Cd / As + 75 % песка
17	10 ОДК Pb + Cd + As
18	10 ОДК Pb + Cd + As + 25 % песка
19	10 ОДК Pb + Cd + As + 50 % песка
20	10 ОДК Pb + Cd + As + 75 % песка

Результаты и их обсуждение

Изменение рН чернозема южного в условиях модельного опыта

По результатам модельного опыта выявлено снижение рН при моно- и полиэлементном загрязнении Cd, Pb, As по сравнению с контролем (рис. 1). Особенно ярко этот эффект проявляется в условиях полиметалльного загрязнения и облегчения гранулометрического состава. При внесении дозы 2 ОДК снижение рН незначительно и не превышает $0,2 \pm 0,04$ единицы, в то время как для дозы 10 ОДК Cd, Pb, As эта разница составляет $0,5 \pm 0,09$ единиц. При загрязнении в дозе 10 ОДК разница рН между вариантами без внесения песка и 75 % песка составляет 1,7 единиц.

В литературе описан факт снижения рН с увеличением доли металла в почве [Понизовский, Мироненко, 2001; Медведев, Деревягин, 2017; Белопухов и др., 2020; Шабанов, Маричев, 2020]. При высоком уровне загрязнения разница между рН исходных и конечных растворов может достигать 2,5–3,0 единиц и сохраняться стабильной на протяжении длительного времени [Pinskii et al., 2018]. Характер зависимости определяется составом твердой фазы, присутствием в ней карбонатов и обменных катионов [Шабанов, Маричев, 2020; Гукалов, Савич, 2021]. С увеличением доли песка количество этих компонентов снижается, в связи с чем подкисляющая роль ТМ увеличивается. Подкисление почв в условиях загрязнения ТМ обусловлено двумя процессами: гидролизом катионов ТМ в растворе и вытеснением протонов из почвенного поглощающего комплекса в результате обменных процессов с катионами ТМ. Гидролиз ТМ сопровождается образованием гидротализованных форм, таких как $Me(OH)$, что приводит к связыванию анионов OH^- и, как следствие, снижению рН [Савич и др., 2017; Pinskii et al., 2018].

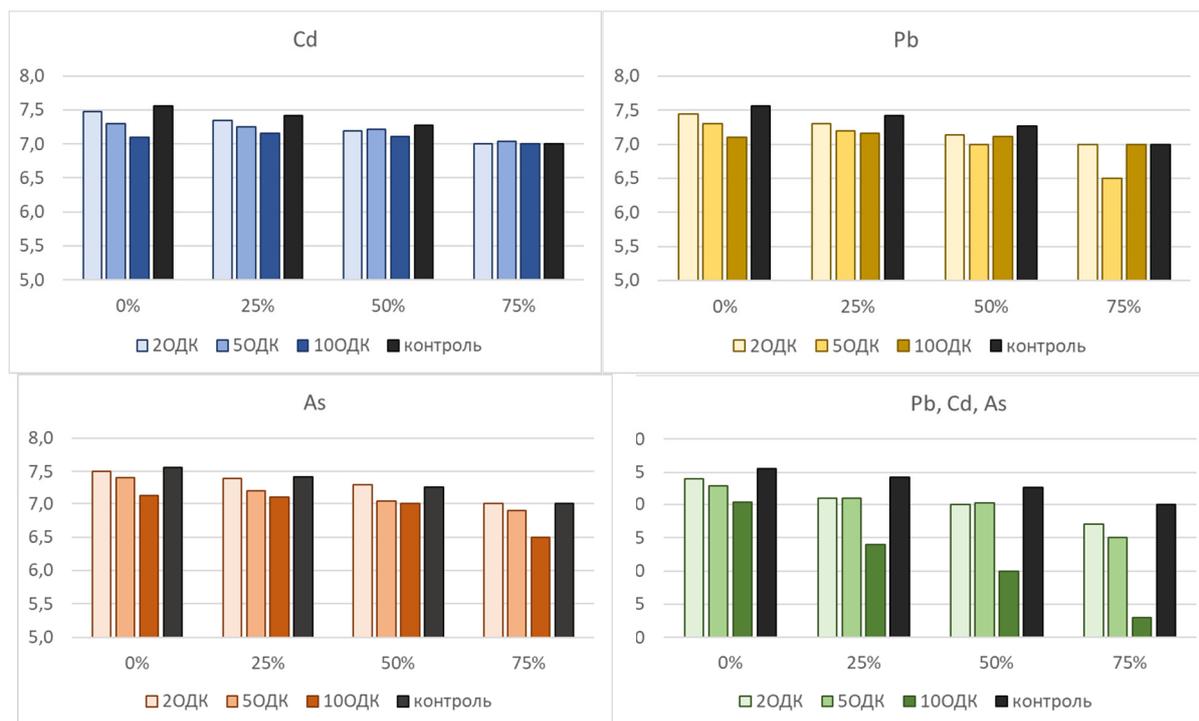


Рис. 1. Изменение pH почв с моделируемым гранулометрическим составом и при загрязнении Pb, Cd и As

Fig. 1. Change in the pH of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

Кислотно-основная буферность чернозема южного в условиях модельного опыта

В виду максимально выраженных изменений pH при совместном загрязнении Cd, Pb, As в дозе 10 ОДК в условиях разбавления песком 0–75 % именно эти варианты были выбраны для оценки изменения кислотно-основной буферности. По результатам непрерывного потенциометрического титрования построены кривые титрования (рис. 2) и оценена величина общей буферности (рис. 3).

Физико-химические свойства чернозема южного обуславливают высокую устойчивость к подкислению. Наиболее высокой буферной способностью характеризуются тяжелые хорошо гумусированные почвы с высокой удельной поверхностью, высоким содержанием обменных оснований [Соколова и др., 2012]. При этом буферность к кислоте существенно превышает суммарное содержание обменных оснований, что объясняется действием дополнительных буферных механизмов, помимо вытеснения протонами обменных оснований. В то же время общая буферность к основаниям на изученных вариантах опыта оказалась значительно ниже, чем кислотная.

С облегчением гранулометрического состава общая буферность по отношению к кислоте и щелочи снижается более чем 75 % по сравнению с контрольным образцом (до 12 и 11 смоль/кг, соответственно), в связи с уменьшением количества органического вещества, обменных оснований, карбонатов и функциональных групп. Высокая буферная способность наблюдается в тех случаях, когда концентрации компонентов буферного раствора значительно превышают количество сильных кислот или щелочей, вводимых в систему. Внесение 10 ОДК Cd, Pb, As снижает показатель общей буферности по отношению к кислоте и основанию на 23–25 % на варианте с внесением 25 % песка (см. рис. 2).

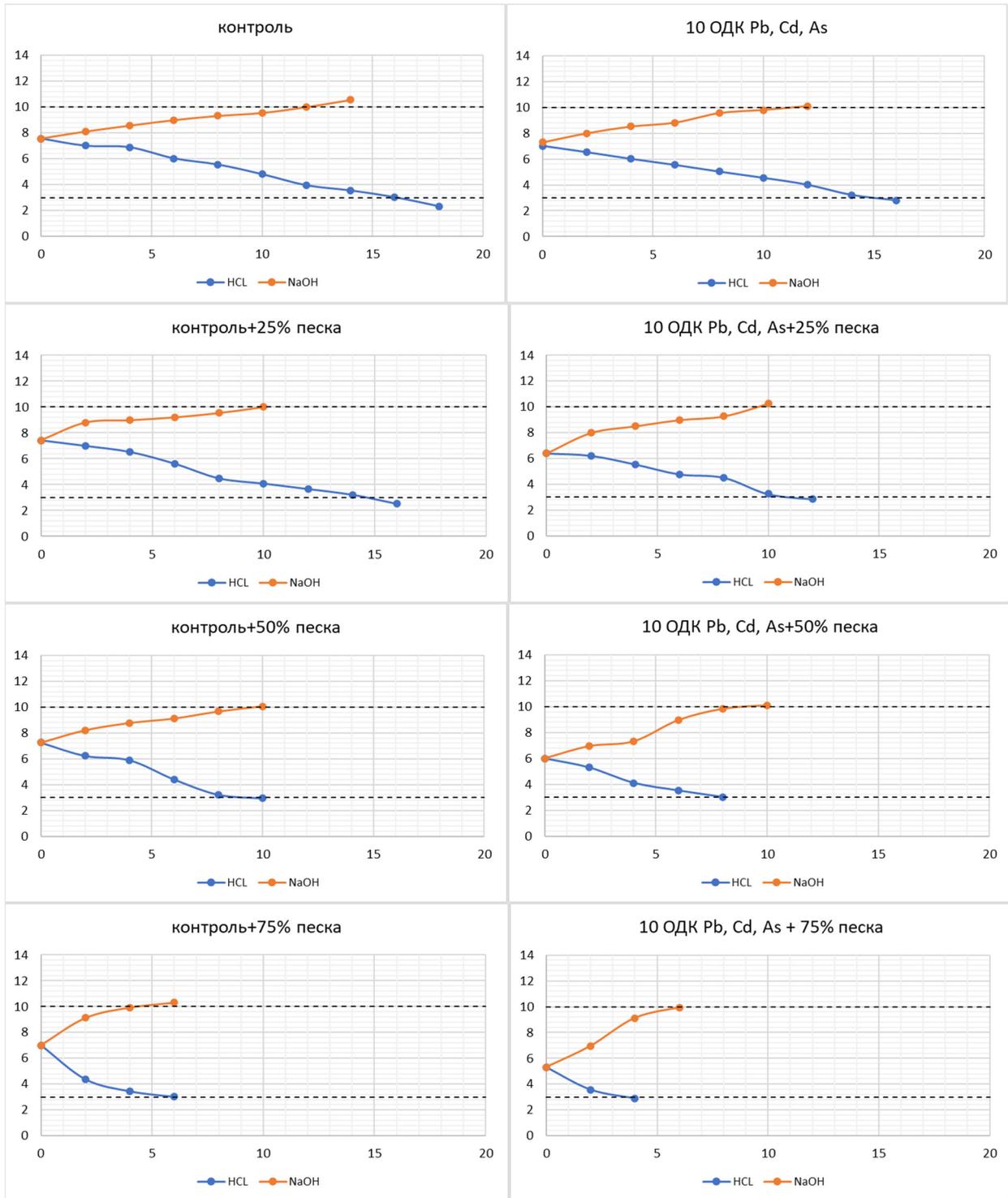


Рис. 2. Кривые потенциометрического титрования почв с моделируемым гранулометрическим составом и при загрязнении Pb, Cd и As
Fig. 2. Potentiometric titration curves of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

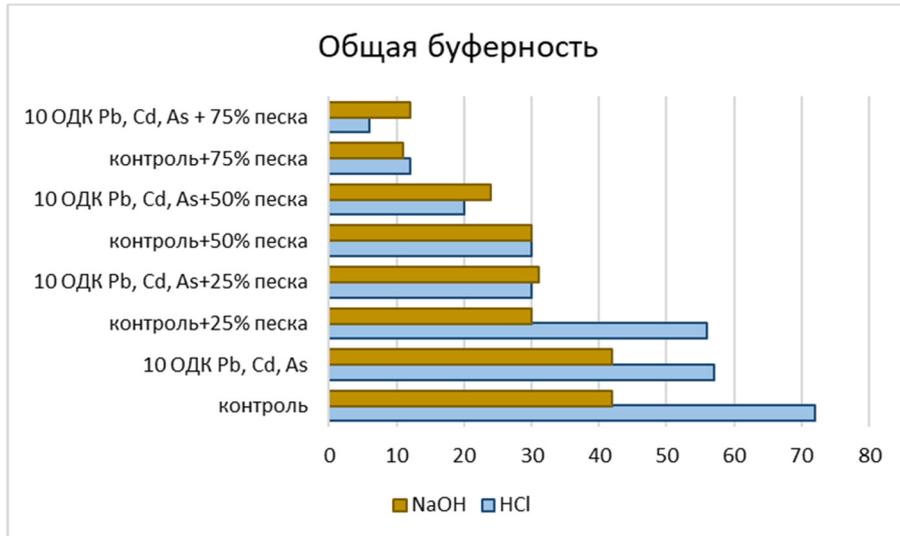


Рис. 3. Общая буферность почв с моделируемым гранулометрическим составом и при загрязнении Pb, Cd и As

Fig. 3. Total buffering of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

В результате потенциометрического титрования выявлено, что суммарная буферность чернозема южного максимальна и составляет по отношению к кислоте 72 смоль/кг по отношению к основанию 42 смоль/кг (см. рис. 3).

Общая буферность к основаниям на вариантах опыта значительно ниже кислотной. В карбонатных почвах увеличение содержания протонов компенсируется растворением карбоната кальция, тогда как избыток гидроксид-ионов уравнивается образованием карбоната кальция [Русакова и др., 2012].

По кривым титрования рассчитана буферность по интервалам значений pH и построены диаграммы зависимости этой величины от pH (рис. 4).

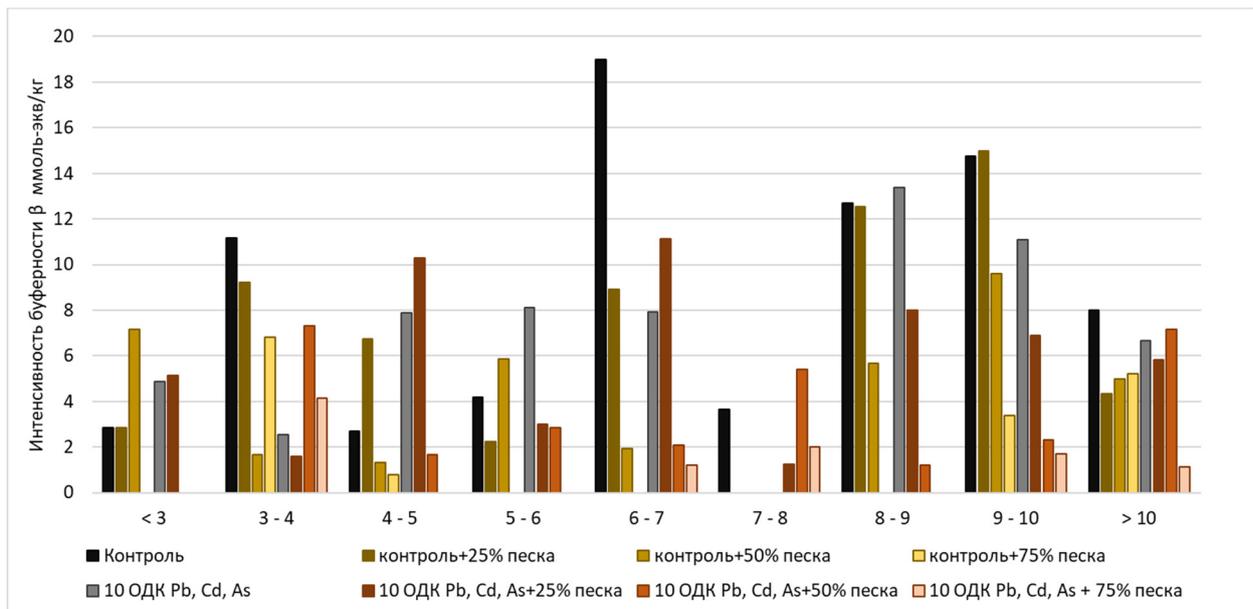


Рис. 4. Структура буферности к кислоте и к основанию чернозема южного разного гранулометрического состава при загрязнении Pb, Cd и As в условиях модельного опыта

Fig. 4. Structure of acid/base buffering of soils with simulated granulometric composition and with Pb, Cd and As contamination

Для теоретического обоснования буферности по отношению к кислотам широко используется концепция буферных систем Б. Ульриха [Соколова и др., 2012], которая отражает доминирующие буферные механизмы в зависимости от величины рН. График зависимости интенсивности буферности, построенный по кривой титрования с шагом изменения рН в 1 единицу, позволяет оценить структуру буферности и выявить присутствие различных буферных компонентов. Можно выделить процессы, связанные с участием минеральных компонентов почвы, специфических и неспецифических органических соединений, а также органо-минеральных комплексов [Покатилова, 2008; Дмитраков и др., 2012; Головатый и др., 2021; Гукалов и др., 2021].

Диапазон значений рН почвенного раствора от 6,2 до 8,6 соответствует карбонатной буферной системе, где основным механизмом, обеспечивающим буферность, является быстро протекающая реакция растворения карбонатов. Именно этой зоне соответствует максимальная интенсивность вариантов опыта без разбавления и с разбавлением песка до 50 %, при этом степень загрязнения влияния не оказывает. Интервал значений рН 5–6,2 относится к силикатной буферной зоне, где доминирующей буферной реакцией является растворение силикатов. Емкость этой зоны можно считать неограниченной ввиду большого количества силикатов в минералогическом составе почв. Данная зона присутствует для всех вариантов опыта. Интервал значений рН 4,2–5 соответствует катионно-обменной буферной зоне. Доминирующая реакция – вытеснение протоном обменных оснований из ППК. В условиях загрязнения данная зона имеет большую выраженность.

Также при взаимодействии с кислотой происходят реакции протонирования гидроксильных групп, находящихся на поверхности частиц боковых сколов глинистых кристаллитов, которые присутствуют в составе тонких фракций [Русакова и др., 2012].

При $\text{pH} < 4,2$ происходит вытеснение протоном в раствор алюминия, который в исходных образцах может быть представлен тонкодисперсными аморфными гидроксидами, комплексами Al с органическими лигандами, прослойками гидроксида Al в почвенных хлоритах, а также Al в кристаллических решетках других глинистых минералов [Соколова и др., 2012; Соколова и др., 2016; Савич и др., 2017]. Буферность в данном диапазоне рН сохраняется даже при максимальном разбавлении почвы кварцевым песком на 75 % и усиливается под воздействием загрязняющих веществ.

При взаимодействии с основанием происходит депротонирование зависимых от рН-зависимых обменных позиций. Для южного чернозема (контроль), характеризующегося высоким содержанием органического вещества, основной буферной реакцией при титровании основанием является депротонирование функциональных групп органических кислот, соответствующее их значениям рКа. В диапазоне рН до 7 титруются карбоксильные группы, а в диапазоне рН 7–8 – преимущественно группы NH_2 , тогда как при $\text{pH} > 9$ – фенольные гидроксилы [Русакова и др., 2012; Соколова и др., 2016]. Также до рН 8,6 действует карбонатная зона, где нейтрализация избытка гидроксид ионов происходит за счет образования карбоната кальция [Покатилова, 2008].

Кроме того, при титровании основанием суспензий органогенных горизонтов происходит буферная реакция увеличения основности и растворимости алюмоорганических и железо-органических комплексов. В вариантах опыта с добавлением 75 % песка и загрязнением буферная способность к основаниям оказывается выше, чем к кислотам. НТТ в этом случае составляет 5,30 единицы. Значения рН точки нулевого заряда гидроксидов железа и алюминия находятся в области > 7 [Русакова и др., 2012; Shabanov et al., 2024], поэтому при титровании до рН 10 эти группы демонстрируют выраженные буферные свойства по отношению к основаниям.

Заключение

Показатели кислотно-основной буферности определяют способность почв сохранять стабильный рН в изменяющихся экологических условиях, особенно антропогенного воздействия. Чернозем южный характеризуется высокой устойчивостью к подкислению, что объясняется его физико-химическими свойствами. Выявлено снижение рН при моно- и полиэлементном загрязнении почв Cd, Pb, As по сравнению с контролем. Особенно ярко этот эффект проявляется в условиях полиметалльного загрязнения и облегчения гранулометрического состава. С облегчением гранулометрического состава общая буферность по отношению к кислоте и щелочи уменьшается более чем 75 % по сравнению с исходным почвенным образцом. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на кислотно-основную буферность заключается в смещении буферных зон в диапазон более низких значений рН, что становится особенно заметно с облегчением гранулометрического состава. Основными процессами устойчивости к подкислению в таких условиях являются растворение карбонатов и силикатов и вытеснение обменных оснований из ППК протоном. Увеличение кислотности снижает плодородие почв, увеличивается подвижность катионов щелочно-земельных металлов, что снижает их долю в почвенном поглощающем комплексе; также тяжелых металлов, что способствует загрязнению сопредельных сред. Выделение основных буферных зон рН отражает эколого-геохимический потенциал почв. Практическое применение анализа кислотно-основной буферности почв имеет важное значение для определения способности почвенной среды смягчать воздействие загрязнителей кислотной или щелочной природы и осуществить переход к оценке устойчивости ландшафтов на основании параметров компонентов экосистем. Рассмотрение экологического состояния через призму химических процессов, происходящих в почве, является необходимым шагом для разработки мер по ее защите и восстановлению.

Список литературы

- Безуглова О.С., Хырхырова М.М. 2008. Почвы Ростовской области. Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ, 352 с.
- Белопухов С.Л., Савич В.И., Байбеков Р.Ф. 2020. Комплексообразование ионов металлов в почвенных растворах. *Агрофизика*, 1: 1–8. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.01.01>
- Головатый С.Е., Хилимончик П.Р., Савченко С.В., Кузьмич А.Н., Дузинчук В.Д. 2021. Подходы к экологическому нормированию тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных земель. В кн.: Сахаровские чтения 2021 года: Экологические проблемы XXI века. Материалы 21-й международной научной конференции, Минск, 20–21 мая 2021. Минск, ИВФ Минфина: 162–166. <https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-162-166>
- Гукалов В.В., Савич В.И. 2021. Оценка свойств, процессов и режимов кислотно-основного состояния дерново-подзолистых почв. *Агроэкоинфо*, 1(43): 15. <https://doi.org/10.51419/20211110>
- Гукалов В.В., Савич В.И., Поляков А.М. 2021. Интегральная оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния системы почва-растение. В кн. Почвы – стратегический ресурс России. Доклады VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв, Сыктывкар, 22 апреля – 08 июня 2021. Москва – Сыктывкар, ИЮБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН: 78–87.
- Дмитраков Л.М., Дмитракова Л.К., Пинский Д.Л., Самсонова В.П. 2012. Буферность почв и нормирование в них тяжелых металлов. *Проблемы агрохимии и экологии*, 1: 53–56.
- Ковалев И.В., Ковалева Н.О. 2020. Экологические функции почв и вызовы современности. *Экологический вестник Северного Кавказа*, 16(2): 4–16.
- Козлова Н.В., Керимзаде В.В. 2020. Использование показателей кислотно-основной буферности в оценке состояния агрогенно-измененных бурых лесных почв Черноморского побережья Западного Кавказа. *Проблемы агрохимии и экологии*, 3: 44–50. <https://doi.org/10.26178/AE.2020.46.87.002>
- Медведев И.Ф., Деревягин С.С. 2017. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов, Ракурс, 178 с.

- Надточий П.П., Мыслыва Т.Н. 2014. Эталонные величины кислотно-основной буферности дерново-подзолистых почв для фонового мониторинга. *Агрохимия*, 3: 83–89.
- Покатилова А.Н. 2008. Кислотно-основная буферность черноземных почв Южного Зауралья и её изменение при антропогенном воздействии. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Челябинск, 19 с.
- Понизовский А.А., Мироненко Е.В. 2001. Механизмы поглощения свинца (II) почвами. *Почвоведение*, 4: 418–429.
- Русакова Е.С., Ишкова И.В., Толпешта И.И., Соколова Т.А. 2012. Кислотно-основная буферность почв транзитных и транзитно-аккумулятивных позиций ненарушенных ландшафтов Южной тайги. *Почвоведение*, 5: 562–573.
- Савич В.И., Белопухов С.Л., Подволоцкая Г.Б., Бакланова А.А., Гукалов В.В. 2017. Влияние эффектов протонирования и гидратообразования на вытеснение марганца за счет комплексообразования на дерново-подзолистых почвах. *Бутлеровские сообщения*, 52(12): 46–51.
- Соколова Т.А., Толпешта И.И., Русаков Е.С. 2016. Вклад отдельных реакций в формирование кислотно-основной буферности почв пойм ручьев (Центрально-лесной государственный заповедник). *Почвоведение*, 4: 434–447. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16040134>
- Соколова Т.А., Толпешта И.И., Трофимов С.Я. 2012. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе. Тула, Гриф и К, 124 с.
- Шабанов М.В., Маричев М.С. 2020. Адсорбция Zn, Cd, Pb, Cu в почвах, подверженных техногенной активности, на примере Красноуральского промузла. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 5(1): 79–89.
- Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Fedorov Y.A., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V. 2017. Heavy Metals in the Soil-Plant System of the Don River Estuarine Region and the Taganrog Bay Coast. *Journal of Soils and Sediments*, 17(5): 1474–1491. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1381-x>
- Perelomov L., Atroshchenko Y., Mukhtorov L., Sarkar B., Pinsky D., Perelomova I., Mazur A. 2021. Trace Elements Adsorption by Natural and Chemically Modified Humic Acids. *Environmental Geochemistry and Health*. 43(1): 127–138. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00686-0>
- Pinskii D.L., Minkina T.M., Bauer T.V., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V. 2018. Copper Adsorption by Chernozem Soils and Parent Rocks in Southern Russia. *Geochemistry International*, 56(3): 266–275. <https://doi.org/10.1134/S0016702918030072>
- Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Sokolov A.A. 2024. Oxidation of Man-Made Mineral Formations with Acid Waste Water at Sulphide-Containing Waste Dumps: A Case-Study of Karabash agglomeration. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 4: 69–85. <https://doi.org/10.25018/0236149320244069>

References

- Bezuglova O.S., Hyrhyrova M.M. 2008. *Pochvy Rostovskoj oblasti [Soils of the Rostov Region]*. Rostov-na-Donu, Publ. JuFU, 352 p.
- Belopuhov S.L., Savich V.I., Baybekov R.F. 2020. Complex Formation of Metal Ions in Soil Solutions. *Agrophysica*, 1: 1–8 (in Russian). <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.01.01>
- Golovaty S.E., Khilimonchik P.R., Savchenko S.V., Kuzmich A.N., Duzinchuk V.D. 2021. Approaches to Ecological Rating of Heavy Metals in Agricultural Lands. In: *Sakharov Readings 2021: Environmental Problems of the 21st Century. Proceedings of the 21st International Scientific Conference, Minsk, 20–21 May 2021*. Minsk, Publ. IVF Minfina: 162–166 (in Russian). <https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-162-166>
- Gukalov V.V., Savich V.I. 2021. Evaluation of Properties, Processes and Modes of Acid-Base Conditions on Sod-Podzolic Soils. *AgroEcoInfo*, 1(43): 15 (in Russian). <https://doi.org/10.51419/20211110>
- Gukalov V.V., Savich V.I., Poljakov A.M. 2021. Integral'naja ocenka kislotno-osnovnogo i oksislitel'no-vosstanovitel'nogo sostojaniya sistemy pochva-rastenie [Integral Assessment of Acid-Base and Oxidation-Reduction State of the Soil-Plant System]. In: *Pochvy – strategicheskij resurs Rossii [Soils are a Strategic Resource of Russia]*. Reports of the VIII Congress of the V.V. Dokuchaev Soil Science Society and the School of Young Scientists on Soil Morphology and Classification, Syktyvkar, 22 April – 08 June 2021. Moscow – Syktyvkar, Publ. IJuB FIC Komi NC UrO RAN: 78–87.



- Dmitrakov L.M., Dmitrakova L.K., Pinsky D.L., Samsonova V.P. 2012. Soil Buffer Capacity and the Establishment of Heavy Metals Marginal Levels in Soils. *Agrochemistry and Ecology Problems*, 1: 53–56 (in Russian).
- Kovalev I.V., Kovaleva N.O. 2020. Ecological Functions of Soils and New Challenges. *The North Caucasus Ecological Herald*, 16(2): 4–16 (in Russian).
- Kozlova N.V., Kerimzade V.V. 2020. The Use of Indicators of Acid-Basic Buffering Capacity in the Assessment of the State of Agrogen-Changed Brown Forest Soils on the Black Sea Coast of the West Caucasus. *Agrochemistry and Ecology Problems*, 3: 44–50 (in Russian). <https://doi.org/10.26178/AE.2020.46.87.002>.
- Medvedev I.F., Derevjagin S.S. 2017. Heavy Metals in Ecosystems. Saratov, Publ. Rakurs, 178 p. (in Russian).
- Nadtochy P.P., Myslyva T.N. 2014. Standard Values of Acid-Basic Buffering Capacity of Soddy-Podzolic Soils for Background Monitoring. *Agrohimiâ*, 3: 83–89 (in Russian).
- Pokatilova A.N. 2008. Kislotno-osnovnaja bufernost' chernozemnyh pochv Juzhnogo Zaural'ja i ejo izmenenie pri antropogennom vozdejstvii [Acid-Base Buffering Capacity of Chernozem Soils of the Southern Trans-Urals and Its Change Under Anthropogenic Impact]. Abstract. dis. ... cand. agric. sciences. Cheljabinsk, 19 p.
- Ponizovskiy A.A., Mironenko E.V. 2001. Mehanizmy pogloshhenija svinca (II) pochvami [Mechanisms of Lead(II) Absorption by Soils]. *Pochvovedenie*, 4: 418–429.
- Rusakova E.S., Ishkova I.V., Tolpeshta I.I., Sokolova T.A. 2012. Acid-Base Buffering of Soils in Transitional and Transitional-Accumulative Positions of Undisturbed Southern-Taiga Landscapes. *Eurasian Soil Science*, 45(5): 503–513. <https://doi.org/10.1134/S1064229312050110>
- Savich V.I., Belopukhov S.L., Podvolotskaya G.B., Baklanova A.A., Gukalov V.V. 2017. Effect of Protonation and Hydrate Formation on the Displacement of Manganese Due to Complexation from Sod-Podzolic Soils. *Butlerov Communications*, 52 (12): 46–51.
- Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Rusakov E.S. 2016. Contributions of Separate Reactions to the Acid-Base Buffering of Soils in Brook Floodplains (Central Forest State Reserve). *Eurasian Soil Science*, 49(4): 399–411. <https://doi.org/10.1134/S1064229316040128>
- Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Trofimov S.Ja. 2012. Pochvennaja kislotnost'. Kislotno-osnovnaja bufernost' pochv. Soedinenija aljuminija v tverdoj faze pochvy i v pochvennom rastvore [Soil Acidity. Acid-Base Buffering Capacity of Soils. Aluminum Compounds in the Solid Phase of Soil and in the Soil Solution]. Tula, Publ. Grif and K, 124 p.
- Shabanov M.V., Marichev M.S. 2020 Adsorption of Zn, Cd, Pb, Cu in Soils Affected by Anthropogenic Activity, Case Study of the Krasnouralskiy Industrial Hub. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 5(1): 79–89 (in Russian).
- Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Fedorov Y.A., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V. 2017. Heavy Metals in the Soil-Plant System of the Don River Estuarine Region and the Taganrog Bay Coast. *Journal of Soils and Sediments*, 17(5): 1474–1491. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1381-x>
- Perelomov L., Atroshchenko Y., Mukhtorov L., Sarkar B., Pinsky D., Perelomova I., Mazur A. 2021. Trace Elements Adsorption by Natural and Chemically Modified Humic Acids. *Environmental Geochemistry and Health*. 43(1): 127–138. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00686-0>
- Pinskii D.L., Minkina T.M., Bauer T.V., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V. 2018. Copper Adsorption by Chernozem Soils and Parent Rocks in Southern Russia. *Geochemistry International*, 56(3): 266–275. <https://doi.org/10.1134/S0016702918030072>
- Shabanov M.V., Marichev M.S., Minkina T.M., Sokolov A.A. 2024. Oxidation of Man-Made Mineral Formations with Acid Waste Water at Sulphide-Containing Waste Dumps: A Case-Study of Karabash agglomeration. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 4: 69–85. <https://doi.org/10.25018/0236149320244069>

*Поступила в редакцию 03.11.2024;
поступила после рецензирования 02.12.2024;
принята к публикации 06.12.2024*

*Received November 03, 2024;
Revised December 02, 2024;
Accepted December 06, 2024*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Замулина Инна Валерьевна, старший преподаватель кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Ларина Эльвира Вагифовна, магистрант кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Бурачевская Марина Викторовна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мониторинга биосферы Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Лацынник Елизавета Сергеевна, магистрант кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Минкина Татьяна Михайловна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Манджиева Сагара Сергеевна, кандидат биологических наук, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мониторинга биосферы Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Inna V. Zamulina, Senior Lecturer of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Elvira V. Larina, Master's student of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Marina V. Burachevskaya, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of Research Laboratory for Biosphere Monitoring, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Elizaveta S. Lacynnik, Master's student of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Tatiana M. Minkina, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Saglara S. Mandzhieva, Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher of the Research Laboratory of Biosphere Monitoring, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia