

5. Shpedt A.A., Aksenova Y.V. Soil Exhaustion Criteria for Central Siberia // Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. – 2018. – V. 10(4). – pp. 870-873.
6. Бобренко И.А., Аksenova Ю.В. Модели плодородия пахотных почв Омской области // Достижения науки и техники АПК. – 2021. – Т. 35. – №5. – С. 9-14.
7. Мищенко Л.Н., Мельников А.Л., Аksenova Ю.В. Почвы Западной Сибири: учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – Омск: ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2018. – 284 с.
8. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. – М.: Росинформагротех, 2003. – 240 с.
9. Azarenko Yu.A. Assessing the Fund of Strongly Bound and Mobile Forms of Zinc in the soils of agrocenoses in the forest-steppe and steppe zones of the Omsk Irtysh Land // Annals of Biology. – 2019. – 35 (1). – P. 67-72.
10. Агрохимические нормативные показатели минерального питания яровой пшеницы в лесостепи Западной Сибири / Н.В. Гоман, И.А. Бобренко, В.В. Попова, А.А. Гайдар // Известия ТСХА. – 2021. – №1. – С. 5-17.
11. Азаренко Ю.А. Содержание меди в почвах агроландшафтов Омского Прииртышья // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2021. – № 4 (44). – С. 7-18.
12. Степанова М.В., Остапенко В.А., Каледин А.П. Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в почвах сельскохозяйственного назначения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 6 (86). – С. 15-21.
13. Азаренко Ю.А. Содержание микроэлементов в растениях на почвах лесостепных и степных ландшафтов Омского Прииртышья // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2016. – № 4 (24). – С. 65-74.
14. Изменчивость содержания макро- и микроэлементов в зерне твердой пшеницы в условиях южной лесостепи Западной Сибири / И.В. Потоцкая, М.Н. Кошкин, А.Л. Шпигель, В.П. Шаманин // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2 (50). – С. 58-67.
15. Конарбаева Г.А., Якименко В.Н. Изменение содержания тяжелых металлов в агроценозе при различной интенсивности применения минеральных удобрений // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31. – № 10. – С. 44-48.
16. Урожайность и потребление элементов питания яровой пшеницей при применении микроудобрений / Н.В. Гоман, И.А. Бобренко, В.В. Попова, А.А. Гайдар // Агрохимический вестник. – 2022. – №5. – С. 5-17.

MONITORING OF HEAVY METALS AND ARSENIC IN CHERNOZEMS AND PLANTS OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

V.M. Krasnitsky¹, I.A. Bobrenko², A.G. Schmidt¹, E.G. Bobrenko²

¹Agrochemical Service Center "Omskiy", 644012, Omsk, Korolev ave.. 34

² Omsk State Agrarian University, 644008, Omsk, Institutskaya Square, 1; E-mail: bobrenko67@mail.ru

The level and dynamics of the content of heavy metals and arsenic in chernozems and cultivated plants of the steppe zone of the South of Western Siberia have been determined. The basis of the research is the data of monitoring of the chernozems of the steppe in the south of Western Siberia, carried out by FGBI "CAC "Omsk" 1994-2023 on reference sites located on arable land in the Omsk region. Objects of research: cultivated plants and chernozems. The gross content of Cd, Pb is at the same level throughout the profile; As – increases with depth, and Cr and Hg – decreases, as does Zn (except for southern chernozem, where its concentration decreases along the profile, then increases); Ni – decreases in ordinary chernozem, in southern – increases; the largest amount of Cu It is observed in a layer of 40-80 cm in the studied chernozems. The indicators do not exceed the MPC. In the 0-20 cm layer, the content of mobile forms of heavy metals varied within the following limits (mg/kg): in ordinary medium-sized low-humus heavy loam chernozem: Cu – 0.14-0.29; Zn – 0.21-0.49; Cd – 0.05-0.14; Pb – 0.60-1.39; Ni – 0.39-0.75; Cr – 0.49-0.90; in ordinary low-power low-humus sandy loam: Cu – 0.10-0.14; Zn – 0.18-0.54; Cd – 0.03-0.07; Pb – 0.41-0.74; Ni – 0.24-0.64; Cr – 0.25-0.56; in the southern chernozem of shortened capacity, low-humus heavy loam: Cu – 0.13-0.29; Zn – 0.22-0.53; Cd – 0.05-0.10; Pb – 0.58-1.00; Ni – 0.38-0.75; Cr – 0.27-0.94. There is a lower content of mobile forms in sandy loam soil, compared with heavy loamy ones. Monitoring has shown that the content of heavy metals and As in cultivated plants meets environmental requirements. The Cu content was 0.7-7.8 mg/kg; Zn – 4.1-21.6; Cd – <0.02 -0.79; Pb – 0.11-0.98; and Hg and As – did not exceed the minimum level.

Keywords: heavy metals, arsenic, monitoring, chernozem, steppe, plants.

УДК 631.412

DOI: 10.25680/S19948603.2024.141.24

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАЛИЯ И РАДИОАКТИВНОГО ЦЕЗИЯ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР НА ТОРФЯНОЙ НИЗИННОЙ ПОЧВЕ

М.А. Ефремова¹, к.б.н., К.И. Цивка¹, В.М. Буре², д.т.н.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»,

196601, г. Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское ш., д.2

E-mail: marina_efremova@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет

Увеличение содержания калия в торфяной низинной почве снижает накопление ¹³⁷Cs в злаковых культурах, однако эффективность взаимодействия этих элементов возрастает при увеличении дозы калийного удобрения выше 150 кг д.в./га в полевых условиях и 358±90 мг/кг почвы в лабораторном опыте, или в 5 и 13 раз соответственно. При этом наблюдается нелинейное изменение содержания обменного калия в торфяной почве, её водоудерживающей способности, концентрации минеральных и органических веществ в лизиметрических водах. По-видимому, это связано со снижением устойчивости органогенных супрамолекулярных комплексов, составляющих основу твердой фазы почвы. Математическая модель, описывающая взаимодействие калия и радиоактивного цезия в системе почва-растение, достаточно чувствительна к физико-химическим изменениям, протекающим в твердой фазе торфяной низинной почвы.

Ключевые слова: торфяная низинная почва, калий, радиоактивный цезий, коэффициент накопления, водоудерживающая способность почвы.

Согласно своему положению в периодической системе Д.И. Менделеева, многие химические элементы имеют близкие или подобные химические свойства, что приводит к проявлению различных эффектов взаимодействия между ними в системе почва-растение [1]. Пары элементов, внутри которых установлены отношения по типу антагонизма при накоплении растениями из почвы: Ca-Sr, K-Cs, хорошо известны в радиологических исследованиях, что явилось основой для разработки и широкого применения мероприятий по снижению накопления радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в растениях из почвы [2,3]. Однако применение калийных удобрений в малых дозах на торфяных почвах, загрязненных радиоактивным цезием, в ряде случаев увеличивало накопление ^{137}Cs в сельскохозяйственных культурах или не приводило к желаемому радиоэкологическому эффекту [4].

Для оценки эффективности взаимодействия между химическими элементами в системе почва-растения была предложена математическая модель [5]. Она связывает накопление элементов в растениях с их содержанием в почве, при некоторых допущениях рассматривая корневую систему растений как отдельную ионообменную твердую фазу почвы. При взаимодействии макро- и микроэлемента (ультрамикроэлемента) основное уравнение модельного ряда имеет вид прямолинейной функции:

$$\frac{1}{\text{КН}_i} = \frac{S_1}{S_2 \theta_i} + \left(\frac{\theta_j - 1}{\theta_i} \right) \frac{C_{1j}}{S_2} = a + b C_{1j}, \quad (1)$$

где КН_i – коэффициент накопления ультрамикроэлемента в растениях, т.е. отношение концентраций этого элемента в растениях и почве; S_1, S_2 [ммоль(экв)·кг⁻¹] – ёмкость твёрдой фазы почвы и корневой системы растений; θ_{ij} – безразмерный коэффициент, величина которого регулируется отношением скоростей сорбции и десорбции с их поверхности; C_{1j} [ммоль(экв)·кг⁻¹] – концентрация макроэлемента в твердой фазе почвы;

Согласно уравнению (1), величина обратная коэффициенту накопления микроэлемента растениями (1/КН) находится в прямолинейной зависимости от концентрации макроэлемента в почве. Предложенная математическая модель была использована ранее для описания результатов взаимодействия ионов калия и радиоактивного цезия в системе почва-растение при постановке вегетационных опытов [5, 6]. Анализ процессов накопления этой пары элементов растениями из торфяной низинной почвы показал, что изменение обратной величины коэффициента накопления радиоцезия растениями из торфяной низинной почвы (1/КН) описывается функцией (1), состоящей из двух линейных участков, соответствующих разной эффективности взаимодействия катионов $\text{K}^+ - \text{Cs}^+$ на двух диапазонах концентрации калия в почве.

Согласно данным [7-10], твердая фаза торфяной низинной почвы в среднем на 50-70% состоит из гуминовых веществ, макромолекулы которых удерживаются вместе в основном посредством сил Ван-дер-Ваальса и водородных связей. Эти связи отвечают за большой размер агрегатов, их устойчивость поддерживается скручиванием молекул гуминовых веществ в двух-, трех-, шестиспиральные образования, которые затем

сворачиваются в кольца, образуя устойчивые супрамолекулярные комплексы. Таким образом, гуминовые вещества – биополимеры, т.е. состоят из набора «сходных частей», отражающих характерное поведение полимера. Элементы этой системы свободно изменяют свои отношения друг с другом под влиянием факторов окружающей среды, поэтому гуминовые вещества рассматривают как системы вероятностных ограничений. Изменение содержания химического элемента в такой системе может быть фактором, модифицирующим её состояние.

Цель исследования – изучить механизмы взаимодействия ионов K^+ и Cs^+ в системе торфяная почва-растение, загрязненной ^{137}Cs , при увеличении содержания в ней калия с использованием математической модели [5].

Методика. Для достижения поставленной цели математическая модель была применена для обработки данных полевого опыта, поставленного в Новозыбковском районе Брянской области (п. Святск) на мелиорированной торфяной низинной почве, загрязненной радиоактивным цезием после аварии на Чернобыльской АЭС, а также для изучения взаимодействия пары элементов $\text{K} - ^{137}\text{Cs}$ в лабораторных лизиметрических исследованиях, проведенных на торфяной почве, искусственно загрязненной радионуклидом.

Полевой опыт был заложен через четыре года после поверхностного загрязнения территории в результате Чернобыльской аварии и через два года после проведения специальных мероприятий, в частности глубокой вспашки почвы с оборотом пласта и посева многолетних трав (кострец безостый). Размер делянки – 4 м², повторность опыта – 5-кратная. Схема опыта включала десять вариантов, различающихся дозой калийного удобрения, примененного на фоне смеси азотного и фосфорного удобрений (см. табл. 1). В качестве удобрений использовали аммиачную селитру, простой суперфосфат и хлористый калий. Удобрения вносили поверхностно весной перед отрастанием костреца безостого. За три года было проведено 5 укосов многолетних трав: в первый и второй годы исследования по два укоса трав, в третий год – один укос. Далее по тексту используется сквозная нумерация укосов.

Почва опыта – торфяная низинная высокозольная, зольность 16,3% (ГОСТ 11306-65), степень разложения высокая – 55% (ГОСТ 28245-89), глубина торфяного слоя более 130 см, реакция среды нейтральная – рН_{KCl} 5,9 (ГОСТ 26483-85), степень насыщенности основаниями высокая – 96% (ГОСТ 26487-85), содержание подвижного фосфора для почв такого типа – среднее, 562 мг P₂O₅/кг, подвижного калия – низкое, 104 мг K₂O/кг (ГОСТ 26207-91).

Пробы почвы для установления активности ^{137}Cs на разной глубине корнеобитаемого слоя отбирали керновым буром. Для определения содержания в почве обменного калия пробы отбирали с каждой делянки тростьевым буром с глубины почвенного слоя 0-20 см 3 раза за время проведения опыта. Обменные формы калия и радиоцезия в торфяной почве определяли по методу Масловой, в вытяжке 1 М раствора ацетата аммония (ГОСТ 26210-91), при отношении почвы к раствору 1:100.

В лабораторном эксперименте в торфяную низинную почву, загрязненную ^{137}Cs , была внесена соль – KCl , доза которой возрастала в 23 вариантах от 24 до 576 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$ почвы. В задачи эксперимента входили определение содержания радиоцезия в составе водного раствора, профильтрованного через торфяную массу, определение коэффициентов накопления ^{137}Cs в пшенице, выращенной на торфяной почве после окончания периода пропускания через нее воды.

Опыт заложен в пластиковых сосудах объемом 250 мл, в каждый сосуд помещалось 246 г почвы с влажностью 80% ПВ. Торфяная низинная почва для лабораторного опыта отобрана в Волосовском районе Ленинградской области на мелиорированной территории. По степени разложения торфа (51%), содержанию подвижного фосфора (575 мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{кг}$) эта почва близка к почве полевого опыта, однако имеет меньшую зольность (12,0%), более кислую обменную реакцию (pH_{KCl} 4,8), меньшую степень насыщенности основаниями (70,3%) и более высокое содержание подвижного калия (408 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$).

При закладке опыта хлористый калий и ^{137}Cs были внесены в почву в составе водных растворов. Активность радионуклида в почве составила 141 кБк/кг сухой почвы. В течение 7 мес почва компостировалась в условиях постоянной влажности (75% ПВ) и температуры воздуха (18-20°C). После этого через почву пропустили дистиллированную воду в количестве, близком к годовой норме осадков (V), рассчитанной по формуле [11]:

$$V = \frac{\pi r^2 H}{1000}, \quad (2)$$

где r – радиус сосуда, мм; H – примерное количество осадков, ежегодно просачивающихся через почву в условиях Северо-Западного региона РФ, которое по данным [16] составляет 200 мл; 1000 – перевод в мл.

Для пропускания воды через почву была использована только треть полученного количества (V), так как 2/3 используется растениями для транспирации.

В связи с тем, что общее количество воды (V), приходящееся на один сосуд с радиусом поверхности 44 мм, составило 1200 мл, полив проводили в течение 40 сут, из расчета 30 мл/сут на 1 сосуд. Фильтрат накапливали для определения его общего объема. В полученном фильтрате определили сухой остаток, прокаленный остаток по методике, предназначенной для контроля состава питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом (ПНДФ 14.1:24.261-2010). Количество органического вещества в лизиметрических водах определяли по разности между сухим и прокаленным остатком.

После пропускания через почву воды в количестве, приближенном к годовой норме осадков, была посеяна яровая пшеница сорта Сударыня. Пшеница росла 2 мес, затем в фазе кущения её надземная часть была убрана и высушена. В опыте определяли сухую массу растений, удельную активность радиоцезия в растениях, его коэффициент накопления в растениях.

В обоих опытах активности ^{137}Cs в почве и растениях были измерены на сцинтилляционном гамма-спектрометре с кристаллом NaI.

Для расчета коэффициента накопления ^{137}Cs в растениях в полевом опыте брали отношение удельной активности радионуклида в растениях к его удельной активности в абсолютно сухой почве, в лабораторном опыте – к удельной активности ^{137}Cs в растворе, просочившемся сквозь почву.

Результаты и их обсуждение. Применение калийных удобрений в дозах 150-180 кг $\text{K}_2\text{O}/\text{га}$ в условиях полевого опыта достоверно увеличивало урожайность кострца безостого, наибольшую эффективность калийные удобрения показали в пятом укосе опыта (табл. 1).

1. Урожайность кострца безостого в полевом опыте, т/га

Вариант	Укосы трав в опыте				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
1. Контроль (б/у)	1,60	2,44	3,47	2,21	1,60
2. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}$ – фон	1,76	2,94	4,32	2,51	1,76
3. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$	2,24	2,56	5,11	2,96	2,24
4. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{120}$	2,40	3,52	5,52	2,91	2,40
5. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{150}$	2,24	3,14	5,60	3,63	2,24
6. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{180}$	2,58	3,58	6,04	3,78	2,58
7. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{210}$	2,58	3,23	6,02	3,11	2,58
8. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{240}$	2,58	3,36	5,68	3,49	2,58
9. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{300}$	2,86	3,30	5,70	3,86	2,86
10. $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{360}$	2,72	3,68	5,40	3,71	2,72
HCP_{05}	0,32	0,49	0,67	0,44	0,32

После глубокой вспашки почвы с оборотом пласта, проведенной на следующий год после выпадения радиоактивных осадков, распределение ^{137}Cs по верхнему корнеобитаемому слою торфяной низинной почвы оказалось неравномерным (табл. 2). Коэффициент вариации содержания радиоцезия в трех слоях почвы: 0-10, 10-20 и 20-30 см по делянкам изменялся от 35 до 140%.

Содержание ^{137}Cs в кострце безостом сильно варьировало по укосам (табл. 3), что связано, по-видимому, как с неравномерным загрязнением поверхностного слоя почвы радиоцезием по делянкам, так и с неоднородностью погодных условий по годам и внутри каждого вегетационного сезона.

2. Активность ^{137}Cs в торфяной низинной почве

Время отбора	Глубина слоя, см	Активность ^{137}Cs , кБк/кг									
		№ варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
После 1-го укоса	0-10	51,8	48,1	51,8	51,8	29,6	48,1	7,4	22,2	22,2	33,3
	10-20	92,5	81,4	81,4	18,5	18,5	74	11,1	11,1	11,1	25,8
	20-30	7,4	170,2	11,1	37	25,9	29,6	133,2	40,7	22,2	133,2
После 2-го укоса	0-10	40,7	51,8	48,1	48,1	48,1	25,9	29,6	44,4	29,6	25,9
	10-20	29,6	33,3	133,2	22,2	40,7	22,2	14,8	22,2	14,8	18,5
	20-30	70,3	37	22,2	22,2	48,1	29,6	140,6	247,9	44,4	88,8
$\bar{x}$	-	48,7	70,3	58	33,3	35,2	38,2	56,1	64,8	24,1	54,3
σ	-	30,1	51,8	44,3	14,4	12,3	19,7	63,1	90,6	11,9	46,4
V, %	-	62	74	76	43	35	51	112	140	49	85

Примечание. $\bar{x}$ – среднее значение, σ – стандартное отклонение, V, % – коэффициент вариации.

3. Активность ^{137}Cs в костреце безостом (кБк/кг)

Вариант	1-й укос*	2-й укос	3-й укос	4-й укос	5-й укос
Контроль (б/у)	11,10±6,44	21,50±9,25	3,59±1,11	9,18±3,07	12,95±6,29
N ₉₀ P ₉₀ – фон	7,33±3,77	10,43±2,04	5,29±1,15	10,06±1,37	21,83±12,95
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	8,07±5,84	15,61±1,51	3,48±1,96	11,69±0,88	7,40±4,07
N ₉₀ P ₉₀ K ₁₂₀	6,96±2,59	2,51±1,63	4,88±0,19	6,73±0,63	4,81±2,59
N ₉₀ P ₉₀ K ₁₅₀	13,62±3,85	25,05±7,05	5,37±1,63	7,47±1,48	3,70±1,11
N ₉₀ P ₉₀ K ₁₈₀	8,44±2,48	9,99±1,41	4,18±0,44	10,03±1,33	4,44±3,33
N ₉₀ P ₉₀ K ₂₁₀	7,96±3,26	6,99±2,00	5,25±1,11	3,55±0,56	5,18±1,48
N ₉₀ P ₉₀ K ₂₄₀	3,40±1,48	7,96±1,22	4,88±1,48	4,55±0,07	5,92±4,44
N ₉₀ P ₉₀ K ₃₀₀	3,66±1,33	8,07±1,04	3,03±2,07	2,11±0,85	3,33±2,59
N ₉₀ P ₉₀ K ₃₆₀	6,59±1,89	7,18±1,18	1,96±1,22	2,52±1,22	2,22±1,11
R**	-0,391	-0,272	-0,648	-0,836	-0,746

*Среднее арифметическое ± стандартное отклонение. **Коэффициент корреляции между дозой калийного удобрения и активностью радиоцезия в растениях без учета контрольного варианта.

Поверхностный способ внесения калийного удобрения, постепенное проникновение калия на глубину корнеобитаемого слоя почвы в первый год исследования не создали условий для взаимодействия калия и радиоцезия в системе почва-растение. В первые два укоса трав корреляционный анализ показал слабую связь между активностью ^{137}Cs в растениях и дозой хлористого калия. На второй и третий годы исследований (третий, четвертый, пятый укосы костреца безостого) обнаружена достоверная корреляционная связь между дозой калийного удобрения и содержанием ^{137}Cs в костреце безостом.

Анализ содержания обменного калия в почве, проведенный на второй и третий годы полевых исследований, показал существенное увеличение его количества в почве по отношению к фону в вариантах с дозой хлористого калия более 210 кг д.в/га (рис. 1).

Содержание обменной формы ^{137}Cs в торфяной низинной почве, определенное в тех же почвенных образцах, что и обменный калий (рис. 2), статистически не зависело от дозы калийного удобрения, хотя можно отметить некоторую тенденцию к увеличению содержания обменного цезия при возрастании дозы хлористого калия. Средняя измеренная величина содержания обменного цезия-137 в пределах стандартного отклонения составила 4,68±1,17 кБк/кг. Доля обменной формы радиоцезия была на уровне 8,0% от общей активности в почве.

Из-за большой неоднородности загрязнения почвы радионуклидом для расчета коэффициентов накопления ^{137}Cs кострецом безостым была использована средняя по опыту величина его содержания в почве – 70 кБк/кг, определенная после усреднения активностей почвенных образцов, отобранных с каждой делянки тростьевидным буром с глубины 0-20 см.

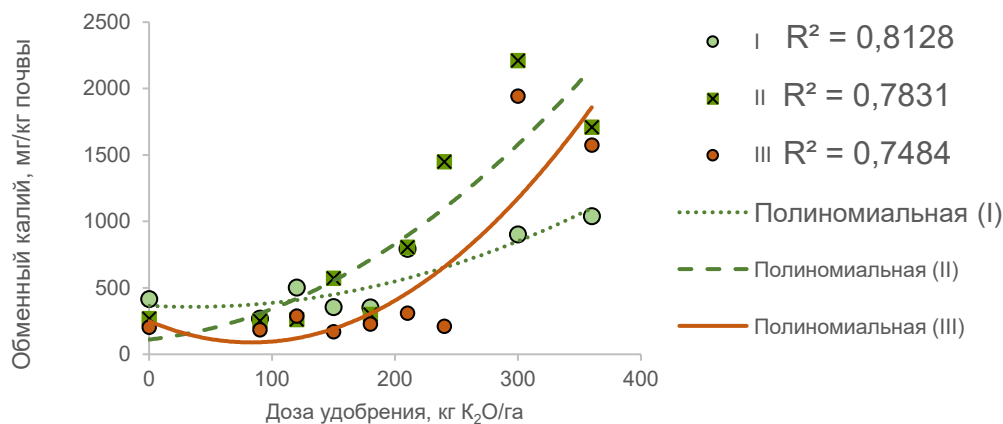


Рис. 1. Динамика содержания обменного калия в пахотном слое почвы: I – весна, перед отрастанием трав 3-го укоса, II – после 3-го укоса трав, III – после 4-го укоса трав

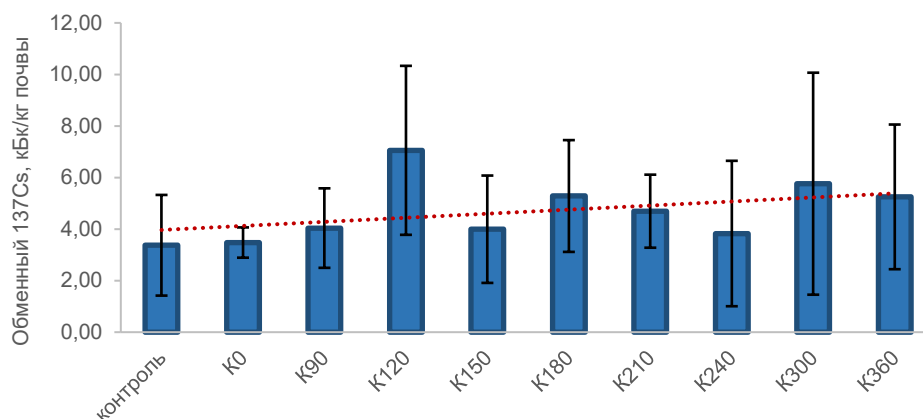


Рис. 2. Содержание обменного ^{137}Cs в торфяной низинной почве

Обратный коэффициент накопления радиоцезия растениями из почвы ($1/KH$) увеличивался с ростом

концентрации в почве калия (рис. 3), что соответствовало условиям сорбционной модели [5].

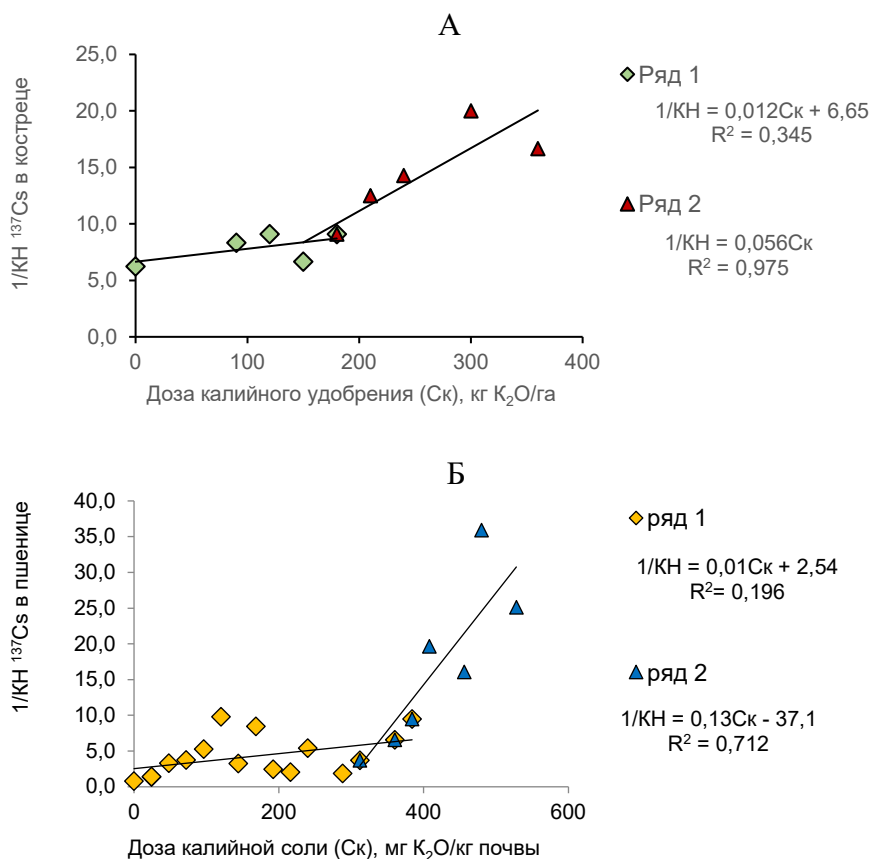


Рис. 3. Зависимость обратной величины коэффициента накопления ($1/KH$) ^{137}Cs в растениях от содержания калия в почве: А – полевой опыт (средние данные по всем укосам), Б – лабораторный опыт

Зависимость $1/KH_{\text{Cs}}$ от дозы калийного удобрения отмечена на двух прямолинейных участках с разным наклоном, следовательно, с разной эффективностью взаимодействия цезия и калия в системе почва-растение: на первом участке доз калия снижение накопления ^{137}Cs коострецом при увеличении содержания макроэлемента в почве протекало менее интенсивно, чем на втором. Подобные результаты также получены в разные годы в вегетационных опытах, проведенных на торфяной низинной почве [6]. На втором участке исследуемой зависимости (ряд 2), где дозы хлористого калия составляли более 180-210 кг $\text{K}_2\text{O}/\text{га}$, эффективность взаимодействия между ^{137}Cs и калием возрастала в 4,7 раза. Это

соответствует соотношению коэффициентов прямолинейной регрессии двух участков зависимости (рис. 3). Таким образом, эффективность взаимодействия ионов $\text{Cs}^+ - \text{K}^+$ возрастала на фоне заметного увеличения содержания обменного калия в почве.

В лабораторном опыте увеличение дозы хлористого калия привело к нелинейному изменению водоудерживающей способности торфяной низинной почвы. Для описания зависимости объема водного раствора, просочившегося сквозь толщу почвы в сосуде, от дозы калийной соли, представленной на рисунке 4, оказалась наиболее применима полиномиальная функция с экстремумом, соответствующим дозе соли 292 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$ почвы.

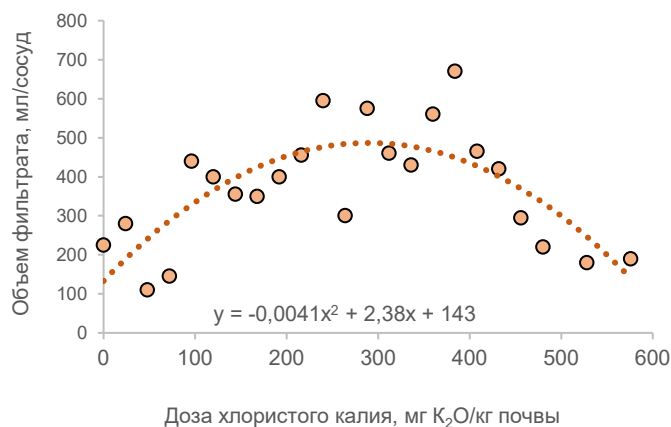


Рис. 4. Количество водного раствора, профильтровавшегося через торфяную низинную почву

Таким образом, при увеличении дозы калийной соли выше экстремума водоудерживающая способность почвы возрастала. Визуально почва в сосудах становилась более влажной, несколько увеличиваясь в объеме, т.е. набухала. В этом диапазоне доз калийного удобрения любой прирост концентрации калия в почве вызывал некоторое увеличение в просочившемся сквозь почву фильтрате содержания сухого вещества как минеральной, так и органической природы (табл. 4).

4. Состав и свойства раствора, фильтрующегося через торфяную почву

Доза K ₂ O, мг/кг почвы	pH	Сухой остаток	Прокаленный остаток	Органическое вещество	Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг
		мг/сосуд			
0	5,03	1,48	0,48	1,00	67,6
24	7,07	-	-	-	82,9
48	7,02	2,64	0,64	2,01	84,2
72	6,2	1,84	0,6	1,24	64,7
96	6,63	0,80	0,20	0,6	62,7
120	7,48	1,32	0,44	0,88	72,1
144	6,96	1,48	0,80	0,68	63,6
1	7,56	1,52	0,48	1,04	84,6
192	7,02	0,80	0,28	0,52	57,6
216	7,51	1,16	0,32	0,84	64,1
240	6,71	0,68	0,36	0,32	51,4
264	7,33	1,36	0,44	0,92	-
288	6,8	0,72	0,32	0,40	53,0
312	6,61	0,8	0,24	0,56	56,5
336	7,35	1,24	0,36	0,88	-
360	6,5	0,84	0,24	0,6	47,9
384	6,83	0,48	0,24	0,24	44,2
408	7,52	1,16	0,32	0,84	92,9
432	6,94	1,12	0,28	0,84	70,6
456	7,38	1,32	0,40	0,92	-
480	6,98	1,04	0,40	0,64	86,0
528	6,61	1,24	0,28	0,96	71,5
576	-	1,04	0,36	0,68	61,6
Доверит.	6,84	1,18	0,38	0,80	67,0
интервал	-	0,20	0,06	0,16	6,4

Примечание. 1. Доверительный интервал определен на уровне вероятности 0,95: $\bar{x} \pm t_{0,05} \cdot S_{\bar{x}}$

2. При вычислении доверительного интервала не использовали контрольный вариант: над чертой – среднее значение по выборке, под чертой – отклонение $t_{0,05} \cdot S_{\bar{x}}$.

Зависимости содержания сухого вещества, его прокаленного остатка и органического вещества в фильтрате от дозы хлористого калия также хорошо описала полиномиальная функция, экстремумы которой сформировались при близких значениях содержания калия в почве. Среднее значение экстремума для всех перечисленных полиномиальных функций составило 358 ± 90 мг K₂O/кг (табл. 5).

Изменение водно-физических свойств торфяной почвы и увеличение эффективности взаимодействия между K и ¹³⁷Cs в системе торфяная почва–растения пшеницы проявились при сопоставимых значениях содержания калия в почве (см. табл. 4). Это подчеркивает общие причины событий, связанные с изменениями в структуре твердой фазы торфяной низинной почвы.

Результаты исследований, проведенных с гидрофильным синтетическим гелем сшитого поливинилового спирта [12], показали, что ионы растворенных во внешнем растворе веществ могут, не вступая в контакт с полярными группами полимера, влиять на степень его набухания. При этом увеличение концентрации раствора снижает количество воды, сорбированной синтетическим полимерным гелем, а также расстояние между полимерными цепями, что способствует возрастанию числа разного рода координационных связей между ними, в основном водородных.

Можно предположить, что подобные процессы трансформации твердой фазы торфяной почвы протекали на первом интервале доз калийного удобрения в нашем лабораторном опыте, т.е. при увеличении концентрации калия в почве возрастало количество водородных связей между макромолекулами органического вещества, уменьшалось расстояние между ними, снижалась степень набухания биополимера, увеличивалось количество лизиметрических вод.

На втором интервале доз калийного удобрения, превышающих значения экстремума (358 ± 90 мг K₂O/кг), степень набухания твердой фазы торфяной почвы возрастала, что связано, по-видимому, с катионообменными процессами, протекающими на поверхности почвенного поглощающего комплекса.

5. Зависимость состава раствора, фильтрующегося через торфяную почву, от дозы калийного удобрения

Показатель	Функция	R ²	p-value	Экстремумы (K ₂ O, мг/кг почвы)
Объем фильтрата, мл/сосуд	$y = 2,38x - 0,004x^2 + 143$	0,542	0,0004	290
Содержание сухого вещества, мг/кг раствора	$y = -0,006x + 7,8 \cdot 10^{-6}x^2 + 1,96$	0,378	0,0109	361
Содержание минерального вещества, мг/кг раствора	$y = -0,001x + 1,5 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,59$	0,306	0,0311	428
Содержание органического вещества, мг/кг раствора	$y = -0,004x + 6,3 \cdot 10^{-6}x^2 + 1,4$	0,325	0,0240	351
$\bar{x} \pm t_{0,05} \cdot S_{\bar{x}}$	-	-	-	358±90
Активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	$y = -0,111x + 2 \cdot 10^{-4}x^2 + 77,9$	0,148	0,255	292

Следует отметить, что кислотность лизиметрических вод не зависела от дозы калийной соли, во всех вариантах опыта она была одинаково ниже, чем на контроле, т.е. ион водорода не принимал заметного участия в физико-химических процессах взаимодействия катионов (см. табл. 3).

В свою очередь, по данным акад. В.Н. Ефимова (1986), валовое содержание кальция в торфяной низинной почве может находиться на уровне 5%, причем этого количества достаточно, чтобы насытить все ионообменные группы твердой фазы органогенной почвы. Можно предположить, что при повышении дозы калийного удобрения ион калия постепенно диффундирует в объем полимерного раствора твердой фазы торфяной низинной

почвы, замещает двухвалентные катионы кальция, адсорбированные на функциональных группах макромолекул органического вещества.

В исследованиях, проведенных на волокнистых и зернистых искусственных карбоксильных ионитах [13], показано, что количество поглощенной ими воды зависит от природы противоиона в солевом растворе и уменьшается в ряду солевых растворов: Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺. Натриевая форма искусственного карбоксильного волокнистого сорбента не только имела большую склонность к гидратации, но и была сильнее ионизирована, чем магниевая и кальциевая. Калий обладает близкими химическими свойствами к натрию, так как оба элемента являются щелочными металлами. Используя метод

аналогий, можно предположить, что ионный обмен кальция и калия на внутреннем каркасе твердой фазы торфяной низинной почвы приводит к изменению электроповерхностных характеристик гумусовых веществ: увеличению электрокинетического потенциала коллоидов твердой фазы почвы и степени ионизации ионообменника. Это согласуется с результатами исследований, проведенных на искусственных полимерах [14].

Содержание в почве калия, при котором наблюдается пересечение двух прямолинейных участков изучаемой зависимости обратной величины коэффициента накопления ^{137}Cs ($1/\text{KH}$) от дозы калийного удобрения (см. рис. 3), по-видимому, соответствует такой величине электрокинетического потенциала на границе раздела фаз, при которой возможна пептизация некоторой части коллоидной фракции гуминовых веществ. Этот процесс сопровождается разрывом слабых химических связей (водородных, ван-дер-ваальсовых и др.) между структурными компонентами супрамолекулярных комплексов гуминовых веществ, изменением конфигурации и перегруппировкой молекул органического вещества в каркасе твердой фазы торфяной почвы, что не противоречит литературным данным [15]. При этом вытеснение иона кальция во внутренний контур твердой фазы почвы (в фазу полимерного раствора) при эквивалентном обмене на калий может быть причиной увеличения степени набухания природного ионита, так как радиус гидратированного иона Ca^{2+} составляет 0,845 нм, что практически в 3 раза превышает радиус гидратированного иона K^+ [12].

Описанные выше физико-химические явления должны сопровождаться увеличением емкости сорбционной поверхности твердой фазы почвы (S_f) и, согласно уравнению (1), изменением эффективности взаимодействия в паре ионов $\text{Cs}^+ - \text{K}^+$ в системе почва-растение. Это подтверждается результатами лабораторного опыта: при возрастании дозы хлористого калия выше 358 ± 90 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$ эффективность взаимодействия ионов увеличилась в 13 раз (см. рис. 3).

В состав отмеченного интервала значений доз калия также вошел экстремум полиномиальной функции, описывающей изменение активности ^{137}Cs в лизиметрических водах по вариантам опыта – 318 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$ (см. табл. 5). Коэффициент детерминации данных используемой функции незначителен, однако, по результатам опыта (см. табл. 4), содержание радиоцезия в лизиметрических водах существенно снижалось в интервале доз калийной соли 240–384 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$.

Заключение. Сопряженные данные полевого и лабораторного опытов показывают, что увеличение дозы хлористого калия способствовало снижению накопления ^{137}Cs в злаковых культурах. Полученные зависимости обратной величины коэффициента накопления радиоцезия растениями от содержания калия в почве

состояли из двух прямолинейных участков, соответствующих разной эффективности взаимодействия калия и ^{137}Cs . Причина этого явления заключается, по-видимому, в пространственной трансформации твердой фазы торфяной низинной почвы под действием калия, что подтверждается изменением водно-физических свойств почвы в том же диапазоне доз хлористого калия, что и увеличение эффективности взаимодействия ионов $\text{K}^+ - \text{Cs}^+$ в системе почва-растение: более 150 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{га}$ – в полевом опыте и более 358 ± 90 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$ в лабораторном эксперименте.

Математическая модель, описывающая взаимодействие калия и радиоактивного цезия в системе почва-растение, достаточно чувствительна к физико-химическим изменениям, протекающим в твердой фазе торфяной низинной почвы.

Литература

1. Битюцкий, Н.П. Минеральное питание растений – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2014. – 540 с.
2. Санжарова Н.И., Панов А.В., Исамов Н.Н. и др. Защитные и реабилитационные мероприятия в сельском хозяйстве: к 30-летию аварии на ЧАЭС // Агрохимический вестник. – 2016. – № 2. – С. 5-9.
3. Подолья А.Г., Персикова Т.Ф. Опыт обеспечения радиационной безопасности территорий Республики Беларусь после катастрофы на Чернобыльской АЭС // Агрохимический вестник. – 2023. – № 1. – С. 64-68.
4. Санжарова Н.И. Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем и ведение сельского хозяйства в зоне воздействия атомных электростанций. – Обнинск, 1997. – 366 с.
5. Дричко В.Ф., Ефремова М.А., Изосимова А.А. Математическая модель накопления радионуклидов и тяжелых металлов растениями из почвы // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49. – № 2. – С. 166-171.
6. Ефремова М.А., Дричко В.Ф. Влияние калия на физико-химические свойства торфяной низинной почвы // Агрохимия. – 2010. – № 4. – С. 3-10.
7. Дмитриева Е.Д., Леонтьева М.М., Осина К.В. Изучение влияния ионов тяжелых металлов на агрегацию гуминовых веществ на слюде методом атомно-силовой микроскопии // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика. Химия. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 127-137.
8. Юдина Н.В., Савельева А.В. Влияние механохимической модификации гуминовых кислот на формирование коллоидов в растворе // Химия твердого топлива. – 2023. – № 5. – С. 22-26.
9. Попов А.И., Зеленков В.Н., Теплякова Т.В. Биологическая активность и биохимия гуминовых веществ. Ч. 1. Биохимический аспект (обзор литературы) // Вестник Российской академии естественных наук. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 11-18.
10. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. – М.: GEOS, 2015. – 233 с.
11. Лаврищев А.В., Литвинович А.В. Стабильный стронций в агроэкосистемах: монография. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 192 с.
12. Газарин А.Н., Токмачев М.Г., Тротов Х.Т. и др. Влияние энергии гидратации ионов на степень набухания геля сшитого поливинилового спирта // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94. – №1. – С. 82-88.
13. Перегудов Ю.С., Бондарева Л.П., Астапов А.В. и др. Изменение термодинамических характеристик гидратации карбоксильного волокнистого сорбента при обмене катионов магния и кальция // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2020. – Т. 63. – Вып. 4. – С. 42-48.
14. Агапов И.О., Ферапонтов Н.Б., Токмачев М.Г. и др. Свойства фаз полимерных гелей на основе сшитого полистирола и влияние на них состава внешнего раствора // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. – 2019. – Т. 60. – № 5. – С. 279-287.
15. Петрунина В.А., Гамаюнов Н.И., Испирян С.Р. Тепло- и водно-физические свойства торфа и торфоминеральных удобрений // Агрохимический вестник. – 2012. – № 3. – С. 16-18.

THE INTERACTION OF POTASSIUM AND RADIOACTIVE CAESIUM IN THE PEAT LOWLAND SOIL – CEREAL CROPS SYSTEM

M.A. Efremova, K.I. Tsivka, V.M. Bure

St. Petersburg State Agrarian University, 196601, Saint Petersburg, Pushkin, Peterburgskoe shosse 2

An increase in the potassium content in peat lowland soil reduces the accumulation of ^{137}Cs in cereals, however, the effectiveness of the interaction of these elements increases significantly with an increase in the dose of potassium fertilizer above 150 kg $\text{K}_2\text{O}/\text{ha}$ in the field experiment and 358 ± 90 mg $\text{K}_2\text{O}/\text{kg}$ of soil in laboratory experiment by 5 and 13 times, respectively. At the same time, we can saw a nonlinear change in the content of exchangeable potassium in peat soil, its water retention capacity, and the concentration of mineral and organic substances in lysimetric waters, which is apparently associated with a decrease in the stability of organogenic supramolecular complexes that form the basis of the solid phase of this soil. The mathematical model describing the interaction of potassium and radioactive caesium in the soil-plant system is quite sensitive to physical and chemical changes occurring in the solid phase of peat lowland soil.

Keywords: peat lowland soil, potassium, radioactive caesium, accumulation factor, soil water retention capacity.