

УДК 546.42:631.416.13:633.633.2:631.821:631.445.24

## БИОВЫНОС $^{137}\text{Cs}$ И НИТРАТОВ МНОГОЛЕТНИМИ ТРАВАМИ ПРИ ИЗВЕСТКОВАНИИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПЕСЧАНЫХ ПОЧВ

© 2020 г. С. М. Пакшина<sup>1</sup>, Л. П. Харкевич<sup>1</sup>, Н. М. Белоус<sup>1</sup>, Е. В. Смольский<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> Брянский государственный аграрный университет  
243365 Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская, 2а, Россия

\*E-mail: sev\_84@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

После доработки 18.03.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

Исследовали влияние карбоната кальция, внесенного в слабокислую дерново-подзолистую песчаную почву в дозе, превышающей необходимую для нейтрализации гидролитической кислотности. Объектом исследования служил травостой, состоящий из *Dactylis glomerata* L., *Poa pratensis* L., *Bromopsis inermis* Holub. Установлено, что природный карбонат кальция, внесенный в слабокислую почву, увеличивал урожайность биомассы, транспирацию, доступность почвенной влаги корневой системе растений. Внесение известкового материала в неудобренную и удобренную полным минеральным удобрением почву увеличивало содержания нитратов и уменьшение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в сене многолетних трав. Для объяснения обнаруженных явлений была использована математическая модель корневого поглощения ионов, согласно которой адсорбция на корнях растений прямо пропорциональна разности межфазных потенциалов на границах раздела корень–почвенный раствор, почва–раствор, которая существенно меняется при внесении природного карбоната кальция. Установлено, что основными факторами биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов из почвы многолетними травами была разность между плотностью зарядов на поверхности корневой системы и почвы, зависящая от внесения природного карбоната кальция, биодоступности почвенной влаги корневой системе растений, числа Пекле, константы ионного обмена  $^{137}\text{Cs}$  на ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ . Полученные данные открывают возможные пути управления процессами биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов из почвы продукцией растениеводства.

**Ключевые слова:** минеральные удобрения, природный карбонат кальция,  $^{137}\text{Cs}$ , нитраты, математическая модель, адсорбция, константы ионного обмена, число Пекле.

DOI: 10.31857/S0002188120010111

### ВВЕДЕНИЕ

Известкование является методом химической мелиорации кислых почв, который заключается во внесении известковых удобрений, основанный на замене ионов  $\text{H}^{+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  почвы на содержащиеся в удобрениях ионы  $\text{Ca}^{2+}$  или  $\text{Mg}^{2+}$ . Дозу внесения карбонатов кальция рассчитывают по величине гидролитической кислотности почвы [1].

Установлено, что природный карбонат кальция, входящий в доломит, известняк, мергель, мел является минералом солевого типа. Заряд поверхности карбоната кальция зависит не только от преимущественной адсорбции или перехода в раствор одного из потенциалопределяющих ионов, но и их гидролиза и кислотно-основного равновесия в растворе. При рН раствора, превышающих изоэлектрическую точку ( $\text{pH} > 8.2\text{--}8.4$ ), поверхность карбонатов кальция заряжается отрицательно, при  $\text{pH} < 8.2\text{--}8.4$  — положительно [2].

В работе [3] предложена формула для расчета поверхностного потенциала ( $\psi_0$ ) коллоидных частиц с зависящим от величины рН зарядом. Формула для расчета  $\psi_0$  имеет следующий вид:

$$\psi_0 = 59(ZPC - \text{pH}), \text{ мВ при } 25^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где  $ZPC$  — изоэлектрическая величина рН [3].

Для расчета плотности поверхностных зарядов ( $\sigma$ ) частиц карбонатов кальция используют следующую формулу:

$$\sigma = \sqrt{C\varepsilon RT/2\pi sh(eZ\psi_0/2kT)}, \quad (2)$$

где  $C$  — количество ионов в  $1 \text{ см}^3$  раствора,  $R$  — газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура,  $^\circ\text{K}$ ,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $\text{Кл}^2/\text{Дж м}$ ,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\text{Дж}/^\circ\text{K}$ ,  $e$  — заряд электрона,  $\text{Кл}$ ,  $\sigma$  — поверхностная плотность зарядов,  $\text{Кл}/\text{м}^2$  [4].

Дополнительные данные о свойствах природных карбонатов кальция учитывают при анализе процессов адсорбции  $\text{Ca}^{2+}$  на почвенном поглощающем комплексе (ППК), растворения и осаждения вновь образованного  $\text{CaCO}_3$  на поверхности коллоидных частиц карбоната кальция в зависимости от рН почвенного раствора. При величинах рН раствора, меньших изоэлектрической точки, путем адсорбции мицеллами карбоната кальция из раствора удаляются преимущественно ионы  $\text{CO}_3^{2-}$ , и  $\text{CaCO}_3$  растворяется. При растворении  $\text{CaCO}_3$  в почвенном растворе и ППК увеличивается содержание Са. При величинах рН раствора, больших изоэлектрической точки, удаляются из раствора ионы Са, которые адсорбируются на поверхности коллоидных частиц карбоната кальция, достраивая его кристаллическую решетку.

В работе [5] получены линейные обратно пропорциональные зависимости содержания поглощенного кальция в ППК от количества карбонатов кальция в мощном, обыкновенном, южном черноземах, а также в пустынно-песчаной почве при рН, превышающем изоэлектрическую точку. При рН почвенного раствора, превышающем 8.2, с увеличением содержания  $\text{CaCO}_3$  уменьшается содержание поглощенного иона  $\text{Ca}^{2+}$  в почве.

По данным работ [6–11], изменение рН почвы при внесении минеральных удобрений изменяет интенсивность процесса поглощения  $^{137}\text{Cs}$  из почвы культурами разных видов.

Цель работы – исследование и теоретическое обоснование роли природных карбонатов кальция в биовыносе многолетними травами  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов при величинах рН почвы меньше изоэлектрической точки.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в период с 2001 по 2003 г. в Новозыбковском р-не Брянской обл. Почва опытного участка – дерново-подзолистая песчаная на древнеаллювиальных отложениях и имеет следующую агрохимическую характеристику:  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  6.4, гидролитическая кислотность – 0.66 мг-экв/100 г почвы, сумма поглощенных оснований – 11.6 мг-экв/100 г почвы, степень насыщенности основаниями – 94.6%, содержание гумуса – 1.2% (по Тюрину), содержание подвижного фосфора и обменного калия – соответственно 337 и 62 мг/кг почвы (по Кирсанову). Плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  территории исследования в период исследования составляла 526–666 кБк/м<sup>2</sup>.

Объектом исследования служила сеяная травосмесь, состоящая из следующих видов многолетних трав: ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.), мятлика лугового (*Poa pratensis* L.), костреца безостого (*Bromopsis inermis* Holub.). В качестве минеральных удобрений использовали  $\text{N}_{\text{aa}}$ ,  $\text{K}_x$  и  $\text{P}_z$ . Имея высокую степень насыщенности основаниями, почва опытного участка не нуждалась в известковании. Для выяснения роли природного карбоната кальция в биовыносе  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов использовали высокую дозу доломитовой муки, с содержанием СаО и MgО соответственно 30 и 25%. Доза внесения доломитовой муки, равная 9 т/га, составила 0.36% от массы почвы в слое 0–20 см.

Схема опыта включала следующие варианты: 1 – контроль, 2 –  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ , 3 –  $\text{N180P60K100}$ , 4 –  $\text{N180P60K100} + \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ . Площадь делянки 40 м<sup>2</sup>, повторность опыта четырехкратная. Учет урожая проводили вручную.

Агрохимический анализ почвы провели методами, принятыми в агрохимической службе. Величину рН определяли ионометрическим методом (ГОСТ-24483-84), содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{K}_2\text{O}$  – по Кирсанову (ГОСТ-206207-84), содержание гумуса – по Тюрину (ГОСТ-26612-83), сумму поглощенных оснований – по Каппену–Гильковичу (ГОСТ-27034-85), содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  – по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ-26207-84). Почвенные образцы для определения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  отбирали в вариантах опыта на глубине пахотного горизонта (0–20 см), растительные пробы – на тех же делянках. Почвенные и растительные образцы отбирали с 2-х несмежных поверхностей. При определении концентрации радиоцезия в растительных и почвенных образцах и тяжелых металлов руководствовались следующими методиками: “Методические указания по определению естественных радионуклидов в почвах и растениях” (1985) “Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства” (1992). Анализы проведены в лаборатории массовых анализов Центра химизации и сельскохозяйственной радиологии “Брянский”. Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  в почвенных и растительных образцах измеряли на универсальном спектрометрическом комплексе “Гамма Плюс” (НПП “Доза” РФ). Ошибка измерений не превышала 10%.

Макроэлементный химический анализ фитомассы трав выполнен во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС) на спектрометре Elan-6100 [11].

Необходимые метеорологические и фитоклиматические показатели в периоды вегетации были рассчитаны по данным метеостанции “Красная Гора”, наиболее близко расположенной к месту проведения исследования.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены метеорологические и фитоклиматические показатели в периоды вегетации 2001–2003 гг. Показано, что в 2001 и 2003 гг. установились приблизительно одинаковые погодные условия. Период вегетации многолетних трав в 2002 г. характеризовался по сравнению с 2001 и 2003 годами повышенной температурой воздуха, высокой испаряемостью, чрезвычайно низкой величиной коэффициента увлажнения (КУ), характерной для зоны черноземов степи, большим дефицитом атмосферной влаги, повышенными показателями радиационного баланса и ФАР. Результаты 2002 г. оказали существенное влияние на средние показатели за годы исследования.

В табл. 2 приведены средние данные урожайности сена многолетних трав, транспирации, коэффициента использования ФАР, транспирационного коэффициента (КТ), биодоступности почвенной влаги в период вегетации в разных вариантах опыта.

Действие природного карбоната кальция на продуктивность многолетних трав сравнивали с контролем и вариантом с внесением полного минерального удобрения. Внесение CaCO<sub>3</sub> · MgCO<sub>3</sub> в удобренную минеральными удобрениями и неудобренную почву повышало все показатели продуктивности многолетних трав, за исключением КТ.

Как было доказано в работе [12], дозы и вид минеральных удобрений не влияют на величину КТ, которая зависит от вида растения и почвенно-климатических условий возделывания. Величины КТ показали, что природный карбонат кальция проявлял свойства минерала солевого типа.

Урожайность, транспирация, K<sub>фар</sub> по сравнению с контролем и вариантом с внесением NPK при добавлении CaCO<sub>3</sub> · MgCO<sub>3</sub> увеличились соответственно на: 6.6 ц/га, 44 мм, 0.24% и 5.2 ц/га, 34 мм, 0.19%.

В табл. 3 представлены данные элементного состава сена многолетних трав. Содержание азота, калия, магния в сене многолетних трав при внесении CaCO<sub>3</sub> · MgCO<sub>3</sub> в удобренную и неудоб-

**Таблица 1.** Метеорологические и фитоклиматические показатели в период вегетации многолетних трав

Год	Показатели							
	<i>t</i>	<i>P</i>	ΣE <sub>0</sub>	<i>H</i>	КУ	<i>H</i> – ΣE <sub>0</sub>	Q <sub>c</sub>	Q <sub>ф</sub>
2001	15.6	73.0	399	293	0.73	–106	984	458
2002	16.3	63.8	563	185	0.33	–378	1390	646
2003	15.0	72.4	401	350	0.87	–51	991	461
Средние	15.6	69.7	454	275	0.64	–179	1120	522

Примечание: *t*, *P* – соответственно температура (°C) и относительная влажность воздуха (%), ΣE<sub>0</sub> – испаряемость (мм), *H* – осадки (мм), КУ – коэффициент увлажнения в вегетационный период, *H* – ΣE<sub>0</sub> – дефицит атмосферного увлажнения (мм), Q<sub>c</sub>, Q<sub>ф</sub> – соответственно радиационный баланс и ФАР в период вегетации, МДж/м<sup>2</sup>.

**Таблица 2.** Показатели продуктивности фитоценоза

Вариант	Урожайность, т/га	Σ <sub>в</sub> E <sub>T</sub> , мм	K <sub>фар</sub> , %	КТ
Контроль	2.83	185	1.02	654
CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	3.49	229	1.26	656
N180P60K100	6.15	402	2.21	654
N180P60K100 + CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	6.67	436	2.40	654

Примечание. Σ<sub>в</sub>E<sub>T</sub> – транспирация, K<sub>фар</sub> – коэффициент использования травами фотосинтетически активной радиации, Σ<sub>в</sub>E<sub>T</sub>/Σ<sub>в</sub>E<sub>0</sub> – относительная транспирация, КТ – транспирационный расход воды (т) на формирование 1 т воздушно-сухой фитомассы трав.

**Таблица 3.** Элементный состав сена многолетних трав

Вариант	Содержание, %				
	фосфор	азот	калий	кальций	магний
Контроль	0.29	1.62	2.05	0.76	0.40
CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	0.42	1.50	1.78	0.75	0.31
N180P60K100	0.43	3.11	2.59	0.51	0.33
N180P60K100 + CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	0.36	2.38	2.48	0.71	0.24

ренную почву уменьшалось. Исключение составляли кальций и фосфор.

При анализе результатов с внесением природного карбоната кальция в удобренную и удобренную почву была использована математическая модель адсорбции ионов на поверхности корневой системы растения. Решение модели имеет следующий вид:

$$K_d = \exp[-(\varphi_k - \varphi_n)], \quad (3)$$

Таблица 4. Влияние известкования почвы на биовынос  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов посевами травосмеси многолетних трав

Вариант	$\Sigma Em/\Sigma Eo$	Pe	A, Cs-137, Бк/кг	C, NO <sub>3</sub> , мг/кг	q, кБк/т, кг/т		Q, МБк/га, NO <sub>3</sub> т/га	
					$^{137}\text{Cs}$	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$^{137}\text{Cs}$	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Контроль	0.41	0.88	385	684	0.59	1.05	1.09	2.02
CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	0.5	0.86	252	1160	0.39	1.78	0.89	4.08
N180P60K100	0.88	0.75	346	12230	0.53	1.87	2.13	7.52
N180P60K100 + CaO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	0.96	0.72	312	16140	0.48	2.47	2.09	10.77

Примечание:  $\Sigma Em/\Sigma Eo$  – относительная транспирация, Pe – число Пекле, A – удельная активность  $^{137}\text{Cs}$ , C – содержание нитратов в сене, q – вынос  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов 1 т транспирационной воды, Q – суммарный вынос  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов с транспирационной водой за период вегетации с 1 га посева; величину q находили как произведение удельной активности цезия-137 и содержания нитратов в фитомассе трав на продуктивность транспирация (1/КТ), величину Q – как произведение величины q и транспирации.

где  $K_d$  – отношение концентрации иона на поверхности корней растений к концентрации в почвенном растворе,  $\phi_k$ ,  $\phi_n$  – межфазные потенциалы на границах раздела корень–почвенный раствор и почва–раствор [13].

При замене межфазных потенциалов на поверхностную плотность зарядов почвы и корней растений формулу (3) приводят к следующему виду:

$$K_d = \exp(-\lambda \Sigma_b E_T), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – параметр биовыноса ионов из почвы корневой системой,  $\Sigma_b E_m$  – транспирация за период вегетации. Формула  $\lambda$  имеет следующий вид:

$$\lambda = 1.8 \times 10^3 (\sigma_k - \sigma_n) \text{Pe} \frac{\sqrt{(z_1 + z_2)/2}}{T}, \quad (5)$$

где  $\sigma_k$ ,  $\sigma_n$  – соответственно поверхностная плотность зарядов корней и почвы, Pe – число Пекле,  $Z_1$ ,  $Z_2$  – валентность аниона и катиона соли, T – абсолютная температура среды [14].

В данной работе величину  $\lambda$  находили по экспериментальным данным, используя равенство:

$$\ln K_{\text{сн}} = \lambda \Sigma_b E_m, \quad (6)$$

где  $K_{\text{сн}}$  – коэффициент снижения активности цезия-137 в растении (отношение содержания иона в растворе в контроле и в варианте) [15]. Формула (6) выведена при анализе опытных данных биовыноса цезия-137 из почвы разными видами культур [15].

В табл. 4 приведены относительная транспирация посевов в течение вегетации, число Pe, содержание нитратов, удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  фитомассы трав, вынос  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов 1 т транспирационной влаги и суммарный вынос  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов за период вегетации при внесении известкового материала в удобренную и неудобренную почву. Показано, что при внесении природ-

ного карбоната уменьшался биовынос  $^{137}\text{Cs}$  и увеличивалось содержание нитратов в фитомассе трав. Содержание NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в сене многолетних трав в вариантах, за исключением контроля, превышало МДУ, равное 1000 мг/кг.

Согласно уравнению (5), интенсивность биовыноса ионов зависела от плотности поверхностных зарядов корневой системы и почвы, которая определяла напряженность электростатических полей и интенсивность потока влаги к корневой системе, числа Pe, которое характеризует вклад диффузионного и конвективного переноса ионов в общем потоке раствора. Показано, что внесение известковых материалов в кислом интервале pH вызывало увеличение доступности влаги корневой системе растений и конвективного потока раствора, при котором переносятся ионы в основном за пределом двойного электрического слоя (ДЭС), приводя к уменьшению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в фитомассе трав и, наоборот, к существенному увеличению содержания ионов NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, находящихся вследствие отрицательной адсорбции за пределом ДЭС.

Для выяснения роли карбоната кальция и минеральных удобрений в корневом поглощении  $^{137}\text{Cs}$  и других катионов были рассчитаны константы ионного обмена  $^{137}\text{Cs}$  на катионы Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>. В табл. 5 представлена характеристика адсорбционной способности корневой системы многолетних трав, рассчитанная по формулам (4) и (6). Показано, что адсорбция NO<sub>3</sub><sup>-</sup> на корнях растений была очень высока и увеличивалась с внесением CaCO<sub>3</sub> в почву. Адсорбция P также была высокой, но снижалась в удобренной почве. Карбонат кальция, внесенный в удобренную и неудобренную почву, снижал адсорбцию  $^{137}\text{Cs}$ , K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. Таким образом, закономерности на-

Таблица 5. Характеристика адсорбционной способности корневой системы многолетних трав

Вариант	$K_d$							$K_{\text{K}^+}^{137\text{Cs}}$	$K_{\text{Ca}^{2+}}^{137\text{Cs}}$	$K_{\text{Mg}^{2+}}^{137\text{Cs}}$	$K_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{Ca}^{2+}}$
	$\text{NO}_3^-$	P	N	$^{137}\text{Cs}$	K	Ca	Mg				
Контроль	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	1.70	1.45	0.92	0.66	0.87	1	0.78	0.76	0.66	0.75	1.28
N180P60K100	1.78	1.49	1.92	0.90	1.27	0.67	0.83	0.71	1.10	0.99	0.81
N180P60K100 + $\text{CaO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	2.37	1.23	1.47	0.81	1.21	0.93	0.60	0.67	0.84	1.05	1.35

копления  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов в надземной фитомассе трав совпадали с корневым поглощением катионов и анионов.

Внесение  $\text{CaCO}_3$  в почву оказывало большое влияние на процессы ионного обмена на поверхности корней. Показано, что при внесении известкового материала в неудобренную почву доля адсорбированного  $^{137}\text{Cs}$  была меньше доли адсорбированных ионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Величины констант ионного обмена  $K_{\text{K}^+}^{137\text{Cs}}$ ,  $K_{\text{Ca}^{2+}}^{137\text{Cs}}$ ,  $K_{\text{Mg}^{2+}}^{137\text{Cs}}$  значили, что эффективная адсорбция  $^{137}\text{Cs}$  на поверхности корней возможна только при значительном поглощении во внутрь корня ионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Поглощение  $^{137}\text{Cs}$  корнями в наибольшей степени, чем  $\text{K}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , задерживал  $\text{Ca}^{2+}$ .

При внесении известкового материала в удобренную почву поглощение  $^{137}\text{Cs}$  корнями в наибольшей степени задерживал  $\text{K}^+$ . Величина  $K_{\text{Ca}^{2+}}^{137\text{Cs}}$ , равная 1.10, в варианте с полным минеральным удобрением указывала на эффективную адсорбцию  $^{137}\text{Cs}$  и ускоренный перенос его из корней в другие органы растения. Данные, полученные в результате исследования поведения  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва–растения (многолетние травы), сопоставимы с данными, полученными на других сельскохозяйственных культурах [16, 17].

Добавление дополнительно к полному минеральному удобрению карбоната кальция изменяло направление процесса ионного обмена, при котором снижалась доступность  $^{137}\text{Cs}$  и повышалась доступность нитратов посевам трав.

## ВЫВОДЫ

Анализ результатов экспериментально-полевых опытов по исследованию влияния природного карбоната кальция на биовынос  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов многолетними травами, возделываемых на слабокислой дерново-подзолистой песчаной почве, позволил сделать следующие выводы.

1. Природный карбонат кальция, внесенный в ненуждающуюся в известковании почву, вызывал повышение урожайности, транспирации, коэффициента использования ФАР, биодоступности почвенной влаги корневой системе растения.

2. Внесение  $\text{CaCO}_3$  в неудобренную и удобренную полным минеральным удобрением почву вызывало увеличение содержания нитратов, превышающее МДУ (1000 мг/кг), и уменьшение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в сене многолетних трав, которая не превышала допустимый уровень (400 Бк/кг).

3. Природный карбонат кальция, внесенный в почву, уменьшал долю адсорбированного  $^{137}\text{Cs}$  на поверхности корней травосмеси по сравнению с долями  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и снижал доступность  $^{137}\text{Cs}$ .

4. Выявлено, что основными факторами биовыноса  $^{137}\text{Cs}$  и нитратов из почвы фитомассой многолетних трав являются разность между плотностью зарядов на поверхности корневой системы и почвы, зависящая от внесения природного карбоната кальция, биодоступность почвенной влаги корневой системе растений, число Пекле, константы ионного обмена  $^{137}\text{Cs}$  на ионы  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .

5. Для получения фитомассы многолетних трав, возделываемых на кислых дерново-подзолистых почвах, с содержанием нитратов и удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$ , не превышающие допустимый уровень, достаточно внесения известковых удобрений в дозе, необходимой для нейтрализации гидролитической кислотности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 376 с.
2. Григоров О.Н., Левашова Г.Л. Исследование электрокинетических свойств природных карбонатов кальция методом потенциала течения на открытой поверхности // Электрокинетические явления в дисперсных системах. М.: Наука, 1972. С. 6–9.

3. *Parks G.A., De Bruyn P.L.* The zero point of charge of oxides // *Y. Phys. Chem.* 1962. V.66. P. 967–973.
4. *Волоцкий С.С.* Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. 512 с.
5. *Пакшина С.М.* Исследование роли природных карбонатов кальция в солонцовом процессе // *Докл. РАСХН.* 2003. № 3. С. 24–26.
6. *Бельченко С.А., Ториков В.Е., Шаповалов В.Ф., Белоус И.Н.* Технологии возделывания кормовых культур в условиях радиоактивного загрязнения и их влияние на содержание тяжелых металлов и цезия-137 // *Вестн. Брянск. ГСХА.* 2016. № 2. С. 58–67.
7. *Корнев В.Б., Воробьева Л.А., Белоус И.Н.* Урожайность кормовых и зерновых культур и накопление <sup>137</sup>Cs в зависимости от внесения возрастающих доз калийных удобрений // *Вестн. Брянск. ГСХА.* 2013. № 5. С. 3–6.
8. *Фесенко С.В., Панов А.В., Алексахин Р.М.* Методический подход к обоснованию защитных мероприятий в сельских населенных пунктах в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиацион. биол. Радиоэкология.* 2001. Т. 41. № 4. С. 415–426.
9. *Жученко Ю.М.* Математическое моделирование потоков радионуклидов из сельскохозяйственных и естественных экосистем с целью радиационной реабилитации загрязненных территорий: Автореф. дис.... д-ра биол. наук. Обнинск, 1998. 40 с.
10. *Фирсакова С.К.* Луговые биогеоценозы как критические радиоэкологические системы и принципы ведения луговодства в условиях радиоактивного загрязнения (на примере Белорусского Полесья после аварии на ЧАЭС): Дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск, 1992. 465 с.
11. *Харкевич Л.П.* Эффективность способов обработки почвы и агрохимических приемов при производстве кормов на радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных угодьях юго-запада России: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Брянск: БрянскГСХА. 2011. 45 с.
12. *Шатилов И.С.* Водопотребление и транспирация растений в полевых условиях // *Научные основы программирования урожаев культур.* М.: Колос, 1977. С. 53–66.
13. *Пакшина С.М., Петухов В.Р.* Влияние двойных электрических слоев поверхности корня и почвенных частиц на доступность питательных элементов растений // *Агрохимия.* 1976. № 5. С. 97–102.
14. *Железная А.Б.* Формула Волобуева–Пакшиной и их использование. М., 2006. 80 с.
15. *Пакшина С.М., Белоус И.М., Силаев А.Л., Смольский Е.В.* Количественная оценка биологического выноса <sup>137</sup>Cs из почвы надземной массой мятликовых трав при внесении минеральных удобрений // *Радиация и риск. Бюл. нац. радиационно-эпидемиологического регистра.* 2017. Т. 26. № 4. С. 99–110.
16. *Алексахин Р.М., Моисеев И.Т., Тихомиров Ф.А.* Поведение <sup>137</sup>Cs в системе почва–растение и влияние внесения удобрений на накопление радионуклидов в урожае // *Агрохимия.* 1992. № 8. С. 127–138.
17. *Моисеев И.Т., Агапкина Г.И., Репух Л.А.* Изучение поведения <sup>137</sup>Cs в почвах и его поступления в сельскохозяйственные культуры в зависимости от различных факторов // *Агрохимия.* 1994. № 2. С. 103–118.

## Biocarrying Out <sup>137</sup>Cs and Nitrates Long-Term Herbs at Lime Application of Cespitose and Podsolic Sandy Soils

S. M. Pakshina<sup>a</sup>, L. P. Harkevich<sup>a</sup>, N. M. Belous<sup>a</sup>, and E. V. Smolsky<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> *Bryansk State Agricultural University*

*ul. Sovetskaya 2a, Bryansk region, Vygonichsky district, d. Kokino 243365, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: sev\_84@mail.ru*

Influence of carbonate of the calcium brought in the subacidic cespitose and podsolic sandy soil in the dose exceeding necessary for neutralization of hydrolytic acidity is investigated. As object of probes served the herbage consisting of *Dactylis glomerata* L., *Poa pratensis* L., *Bromopsis inermis* Holub. It is established that the natural carbonate of calcium brought in the subacidic soil causes increase in productivity, transpiration, availability of soil moisture to the root system of plants. Entering of limy material into the soil which is not fertilized and fertilized by full mineral fertilizer causes increase in content of nitrates and reduction of specific activity <sup>137</sup>Cs in hay of long-term herbs. For explanation of the found phenomena the mathematical model of root absorption of ions according to which adsorption on roots of plants is directly proportional the differences of interphase potentials on limits of the section root – soil solution, the soil – solution which significantly changes at introduction of natural carbonate of calcium has been used. It is revealed that major factors of biocarrying out <sup>137</sup>Cs and nitrates from the soil long-term herbs is the difference between firmness of charges on surface of root system and the soil depending on introduction of natural carbonate of calcium, bioavailability of soil moisture to the root system of plants, Peclet's parameter, constants of ion exchange <sup>137</sup>Cs on ions of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>. The obtained data open possible ways of steering of biocarrying out processes <sup>137</sup>Cs and nitrates from the soil products of crop production.

**Key words:** mineral fertilizers, natural carbonate of calcium, <sup>137</sup>Cs, nitrates, mathematical model, adsorption, constants of ionic exchange, Peclet's number.