

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ МИГРАЦИИ КАЛЬЦИЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ВНЕСЕНИИ МЕЛИОРАНТА ПРИ ИЗВЕСТКОВАНИИ (МОДЕЛЬНЫЙ ОПЫТ)

О. Ю. Павлова¹, А. В. Литвинович^{1,2}, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}

¹Агрофизический научно-исследовательский институт

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, Россия;

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

196601, Санкт-Петербург – Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия;

³Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9, Россия

E-mail: pou1953@rambler.ru

Поступила в редакцию 30 ноября 2019 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

В модельном опыте на колонках проведено изучение миграционной подвижности Са в свежепроизвесткованной почве, мелиорируемой в широком интервале доз. Опыт имитировал неравномерное размещение мелиоранта в отдельных частях поля. Установлено, что многократное промывание почвы (12 промываний), моделирующее ежегодный объём просачивающейся сквозь культивируемый слой влаги, способствовало выщелачиванию кальция из почвы. Кальций обнаружен во всех порциях фильтрата. За 12 промываний из непроизвесткованной почвы было удалено 10,44 мг кальция. В вариантах с известкованием миграционные потери возрастали с повышением дозы мелиоранта: при увеличении дозы применения извести в 2–4 раза количество мигрирующего кальция возросло в 1,1–1,36 раза. Абсолютные потери (мг) кальция в вариантах с известкованием составили: 0,5 дозы извести – 16,46 мг; 0,75 дозы – 14,67 мг; полная доза – 22,87 мг; 1,5 дозы – 23,57 мг; две дозы – 31,09 мг; три дозы – 26,55 мг; четыре дозы – 31,1 мг. Динамика выщелачивания кальция во всех изученных вариантах носила сходный характер. Вне зависимости от дозы применения извести фильтраты первого промывания характеризовались максимальным содержанием кальция, во второй порции фильтрата его концентрация снижалась резко, в растворах 3–12 промывок – постепенно. Полного удаления кальция из почвы не было достигнуто ни в одном из вариантов опыта. Представлены эмпирические модели, адекватно описывающие процесс миграции Са при многократном промывании почвы, известкованной в широком интервале доз. Проведена кластеризация моделей, основанная на количестве (объёме) выщелачиваемого Са в отдельных вариантах опыта.

Ключевые слова: известкование, кальций, элювиальные потери, эмпирические модели.

A COMPARATIVE STUDY OF CALCIUM MIGRATION INTENSITY IN DIFFERENT PARTS OF THE FIELD AT UNEVEN APPLICATION OF MELIORANT (MODEL EXPERIMENT)

O. Yu. Pavlova¹, A. V. Litvinovich^{1,2}, A. V. Lavrishev², V. M. Bure^{1,3}

¹Agrophysical Research Institute

14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia;

²Saint-Petersburg State Agrarian University

2, Peterburgskoye highway, Saint-Petersburg – Pushkin, 196601, Russia;

³Saint-Petersburg State University

7-9, Universitetskaya quay, Saint-Petersburg, 199034, Russia

E-mail: pou1953@rambler.ru

The migration mobility of Ca in freshly-limed (with a wide range of rates) soil was studied in the model experiment in columns. The experiment imitated the uneven placement of ameliorant in different parts of a field. It was found that repeated washing of the soil (12 washes), imitating the annual volume of precipitation seeping through the cultivated layer, contributed to the leaching of calcium from the soil. Calcium was found in all portions of the filtrate. During 12 washes, 10.44 mg of calcium was removed from the unlimed soil. In different liming treatments, migration losses increased with an increase of the ameliorant rate. With a 2–4-time increase in the lime rate, the amount of leached calcium increased 1.1–1.36 times. The absolute losses (mg) of calcium in all the different treatments were: 0.5 dose of lime – 16.46 mg; 0.75 doses – 14.67 mg; full dose – 22.87 mg; 1.5 doses – 23.57 mg; two doses – 31.09 mg; three doses – 26.55 mg; four doses – 31.1 mg. The dynamics of calcium leaching in all the studied treatments was similar. Regardless of the rate of lime, the filtrates of the first wash were characterized by the maximum calcium content, in the second portion of the filtrate calcium concentration decreased sharply, in solutions of 3rd to 12 washings – decreased gradually. Complete removal of calcium from the soil was not achieved in any of the experimental treatments. The paper presents empirical models that adequately describe the process of Ca migration during the repeated washings of the soil limed in a wide range of rates. The clustering of models was carried out based on the amount (volume) of leached Ca in individual experimental treatments.

Key words: liming, calcium, eluvial losses, empirical models.

ВВЕДЕНИЕ

Дерново-подзолистые почвы в естественном состоянии характеризуются высокой пространственной неоднородностью кислотно-основных свойств (Литвинович и др., 2006). При их вовлечении в культуру и несоблюдении технологических требований к внесению минеральных удобрений и извести неоднородность агрохимических свойств усиливается (Литвинович, 2007).

Измерения величины pH_{KCl} в 70 индивидуальных почвенных пробах, отобранных по диагонали поля, промелиорированного известняковой мукой в дозе 6 т га^{-1} , показали, что при исходной величине pH_{KCl} почвы, соответствующей 4,1 ед., колебания составили от 4,5 до 7,5 ед. (Литвинович и др., 2006).

По данным А. П. Голубевой с соавт. (1971), при внесении извести в дозе, соответствующей полной гидролитической кислотности (6 т га^{-1}), скопление мелиоранта в отдельных частях поля может достигать величин, соответствующих 2–3 дозам, рассчитанным по гидролитической кислотности (Нг).

Известь при заделке обычно распределяется в толще пахотного слоя неравномерно. При однократной культивации большая часть мелиоранта скапливается в верхнем разрыхлённом слое почвы, а при заделке известковых удобрений под плуг – в так называемых «очагах» в середине борозды (Кнашис, 1976). Очевидно, что скорость растворения мелиорантов при их неравномерном размещении в толще пахотного слоя будет неодинаковой.

В опытах И. А. Шильникова с соавт. (1987) известь тонкого помола вносилась весной под вспашку в трёх дозах: 0,5; 1,0; 1,5 Нг. Образцы почвы отбирались на следующий год весной послойно (0–2 см, 2–4 см, 4–6 см и т. д. до глубины 18–20 см). Исследования показали, что в отдельных слоях пахотного горизонта величина pH_{KCl} изменялась от 4,0 до 7,2. При повышении дозы извести от половинной до полуторной количество очагов со слабокислой и близкой к нейтральной реакцией увеличилось. Однако даже при внесении извести в полуторной дозе (15 т га CaCO_3) в 35% случаев реакция слоёв пахотного горизонта была сильнокислой или среднекислой ($pH_{KCl} < 5$) при средней величине pH_{KCl} 6,5 в смешанном образце почвы.

В реальных условиях свежепроизвесткованная почва представляет собой гетерогенную систему, где наряду с нейтрализованными до разного уровня кислотности участками существуют «очаги» кислой реакции и частицы ещё не прореагировавшей извести (Небольсин, Небольсина, 2005).

Теоретически при многократных обработках неоднородность культивируемого слоя известкованных почв и кислотно-основные показатели должны со временем выравниваться, однако на практике этого не происходит.

В упомянутых выше опытах (Шильников и др., 1987) величина pH почвы определялась через четыре года после известкования по указанной методике. Образцы отбирались послойно через каждые 2 см. До отбора было проведено три вспашки, три культивации

в два следа, две междурядных обработки и боронование по всходам картофеля. Несмотря на большое количество обработок почвы величина pH в отдельных частях пахотного горизонта изменялась от 3,7 до 5,4 ед. при внесении половинной дозы и от 3,9 до 6,1 ед. при использовании полной дозы мелиоранта.

В работе А. П. Голубевой с соавт. (1971) установлено, что, несмотря на многократные обработки почвы, полного перемешивания извести с почвой не было достигнуто даже за 10 лет её применения (колебания pH составили от 4,9 до 5,6 ед.), хотя известь уже достаточно полно прореагировала с почвой. Полного выравнивания кислотности пахотного горизонта не произошло даже за 30 лет известкования (pH изменялся от 3,9 до 4,2 ед.) (Белоконь и др., 1971). Следовательно, при неравномерном рассеивании извести по поверхности поля и её «очаговом» размещении в культивируемом слое скорость растворения мелиорантов будет зависеть от их количества, сосредоточенного в отдельных частях поля, а в пахотном горизонте в течение длительного времени будет сохраняться неоднородность кислотно-основных свойств.

Биоклиматические условия Северо-Западного региона способствуют формированию почв с повышенным уровнем кислотности, а положительные изменения, достигнутые в результате известкования, постепенно утрачиваются (Литвинович, Небольсина, 2012). Основной причиной возврата произвесткованных почв к исходному уровню кислотности является вынос оснований с отчуждаемой продукцией растениеводства и их потери с просачивающейся влагой атмосферных осадков.

К настоящему времени накоплен определённый фактический материал, посвящённый масштабам миграции оснований из мелиорируемых дерново-подзолистых почв (Бобрицкая, 1975; Чернов, 1984; Мельникова, 1985; Шильников и др., 2004; Яковлева, 2012; Аканова и др., 2017). Однако исследования, направленные на определение миграционной подвижности кальция при неравномерном распределении мелиоранта в отдельных частях поля, до настоящего времени не проводились.

Цель исследований заключалась в том, чтобы установить масштабы миграции Са в условиях лабораторного опыта, моделирующего неравномерное размещение мелиоранта в пахотном слое.

В задачи исследований входили:

- разработка эмпирических моделей, адекватно описывающих элювиальные потери Са в отдельных частях поля, произвесткованного в широком интервале доз, при непрерывном промывании почвы;

- проведение кластеризации моделей на основе данных о количестве кальция, выщелачиваемого в результате многократного промывания почвы,

моделирующего ежегодный объём просачивающейся сквозь культивируемый слой влаги.

Таблица 1. **Вымывание кальция из кислой дерново-подзолистой супесчаной почвы при неравномерном распределении извести в пахотном слое**

Вариант опыта	Сроки наблюдений												Внесено всего, мг	Вымыто всего, мг
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1) Контроль	$\frac{13,8 \pm 1,5}{5,53}$	$\frac{1,4 \pm 0,2}{0,55}$	$\frac{1,9 \pm 0,1}{0,75}$	$\frac{1,25 \pm 0,1}{0,50}$	$\frac{1,0 \pm 0,09}{0,40}$	$\frac{1,0 \pm 0,1}{0,4}$	$\frac{0,75 \pm 0,06}{0,33}$	$\frac{1,25 \pm 0,2}{0,50}$	$\frac{1,85 \pm 0,1}{0,50}$	$\frac{0,88 \pm 0,05}{0,35}$	$\frac{0,75 \pm 0,05}{0,33}$	$\frac{0,75 \pm 0,04}{0,33}$	–	10,44
2) 0,5 дозы извести	$\frac{13,75 \pm 1,6}{5,5}$	$\frac{6,01 \pm 0,5}{2,43}$	$\frac{4,34 \pm 0,9}{1,75}$	$\frac{2,4 \pm 0,3}{0,95}$	$\frac{3,01 \pm 0,4}{1,23}$	$\frac{1,9 \pm 0,2}{0,75}$	$\frac{1,9 \pm 0,3}{0,75}$	$\frac{1,4 \pm 0,1}{0,55}$	$\frac{1,9 \pm 0,3}{0,75}$	$\frac{1,9 \pm 0,1}{0,75}$	$\frac{1,4 \pm 0,1}{0,55}$	$\frac{1,25 \pm 0,1}{0,50}$	225	16,46
3) 0,75 дозы извести	$\frac{13,31 \pm 0,1}{5,25}$	$\frac{4,2 \pm 0,3}{1,68}$	$\frac{3,75 \pm 0,6}{1,50}$	$\frac{2,0 \pm 0,2}{0,80}$	$\frac{1,9 \pm 0,25}{0,75}$	$\frac{1,7 \pm 0,2}{0,68}$	$\frac{1,9 \pm 0,15}{0,76}$	$\frac{1,9 \pm 0,2}{0,76}$	$\frac{1,9 \pm 0,2}{0,75}$	$\frac{1,58 \pm 0,3}{0,63}$	$\frac{1,4 \pm 0,08}{0,56}$	$\frac{1,4 \pm 0,3}{0,55}$	337,5	14,67
4) Полная доза извести	$\frac{15,8 \pm 2,0}{6,33}$	$\frac{5,1 \pm 0,6}{2,03}$	$\frac{8,75 \pm 0,7}{3,50}$	$\frac{5,8 \pm 1,0}{2,30}$	$\frac{2,8 \pm 0,2}{1,13}$	$\frac{2,5 \pm 0,3}{1,00}$	$\frac{2,0 \pm 0,1}{0,8}$	$\frac{2,54 \pm 0,2}{1,00}$	$\frac{2,5 \pm 0,4}{1,20}$	$\frac{2,8 \pm 0,1}{1,13}$	$\frac{3,63 \pm 0,4}{1,45}$	$\frac{2,5 \pm 0,3}{1,00}$	450	22,87
5) 1,5 дозы извести	$\frac{14,4 \pm 0,9}{5,75}$	$\frac{6,5 \pm 0,8}{2,58}$	$\frac{8,1 \pm 1,0}{3,25}$	$\frac{4,34 \pm 0,8}{1,75}$	$\frac{3,2 \pm 0,1}{1,28}$	$\frac{3,33 \pm 0,1}{1,33}$	$\frac{3,1 \pm 0,3}{1,23}$	$\frac{2,88 \pm 0,7}{1,15}$	$\frac{3,25 \pm 0,5}{1,30}$	$\frac{2,88 \pm 0,5}{1,15}$	$\frac{3,5 \pm 0,4}{1,40}$	$\frac{3,5 \pm 0,2}{1,40}$	675	23,47
6) 2 дозы извести	$\frac{19,0 \pm 2,5}{7,60}$	$\frac{8,4 \pm 0,5}{3,35}$	$\frac{10,0 \pm 1,2}{4,00}$	$\frac{6,4 \pm 0,9}{2,55}$	$\frac{5,6 \pm 0,5}{2,25}$	$\frac{3,95 \pm 0,6}{1,58}$	$\frac{4,33 \pm 0,3}{1,73}$	$\frac{3,83 \pm 0,26}{1,53}$	$\frac{5,0 \pm 0,9}{2,00}$	$\frac{5,0 \pm 0,8}{2,00}$	$\frac{3,1 \pm 0,3}{1,25}$	$\frac{3,1 \pm 0,25}{1,25}$	900	31,09
7) 3 дозы извести	$\frac{20,6 \pm 2,1}{8,25}$	$\frac{8,75 \pm 0,6}{3,5}$	$\frac{8,9 \pm 1,1}{3,56}$	$\frac{5,0 \pm 0,6}{2,00}$	$\frac{3,1 \pm 0,25}{1,25}$	$\frac{2,5 \pm 0,15}{1,00}$	$\frac{2,5 \pm 0,25}{1,00}$	$\frac{3,83 \pm 0,25}{1,53}$	$\frac{3,1 \pm 0,2}{1,25}$	$\frac{2,88 \pm 0,3}{1,15}$	$\frac{2,58 \pm 0,16}{1,03}$	$\frac{2,58 \pm 0,2}{1,03}$	1350	26,55
8) 4 дозы извести	$\frac{20,6 \pm 2,0}{8,25}$	$\frac{10,0 \pm 1,0}{4,00}$	$\frac{10,2 \pm 1,3}{4,08}$	$\frac{5,6 \pm 0,5}{2,25}$	$\frac{4,63 \pm 0,3}{1,85}$	$\frac{3,2 \pm 0,2}{1,28}$	$\frac{5,6 \pm 0,6}{2,25}$	$\frac{3,83 \pm 0,2}{1,53}$	$\frac{3,8 \pm 0,4}{1,50}$	$\frac{2,06 \pm 0,35}{0,83}$	$\frac{3,63 \pm 0,3}{1,45}$	$\frac{4,58 \pm 0,5}{1,83}$	1800	31,10

Примечание: над чертой – мг л⁻¹; под чертой – мг.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлась дерново-подзолистая легкосуглинистая почва со следующими физико-химическими показателями: $pH_{KCl} = 4,1$; гумус – 2,1%; содержание частиц $< 0,01 \text{ мм} = 23,5\%$. В качестве мелиоранта использовалась доломитизированная известняковая мука (содержание $CaCO_3 = 81,5\%$, $MgCO_3 = 7,3\%$). Мелиорант просеивался сквозь сито с диаметром отверстий 0,25 мм. Необходимое для известкования количество мелиоранта рассчитано согласно «Научным основам и технологии использования...» (1997). Пересчёт полной дозы мелиоранта, необходимой для известкования одного гектара на одну колонку, проводился из расчёта, что масса пахотного слоя на 1 га равна 3000 тонн.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Почва в воздушно-сухом состоянии, предварительно просеянная через сито с размером ячеек 1 мм, известковалась расчетным количеством мелиоранта и помещалась в стаканы. Произвесткованная почва компостировалась в термостате Бруве и регулярно перемешивалась. Продолжительность компостирования составила 30 дней. Влажность почвы в процессе компостирования поддерживалась на уровне полной полевой влагоёмкости. После компостирования почва извлекалась из стаканов и помещалась в делительные воронки. Масса почвы в воронке составляла 300 г, высота почвенного слоя – 17 см, плотность почвы в воронке – $1,0 \text{ г см}^{-3}$. Опыт проводился в 3-кратной повторности. Схема опыта приведена в табл. 1. Для каждого промывания использовалось 400 мл воды. Расчёт количества влаги, необходимого для одного промывания, приведён в работе (Литвинович и др., 2015). Всего проведено 12 промываний, общий объём просочившейся влаги составил 4,8 л. В каждой порции фильтрата определялось содержание Са. Данные определений обработаны с помощью статистических методов. Для построения эмпирических моделей использовалась программа MS Excel (Буре, 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что вне зависимости от срока промывания в контрольном варианте опыта без известкования Са был обнаружен во всех порциях

фильтрата. Максимальные потери пришлось на первое промывание и составили 5,53 мг. Далее на протяжении всего эксперимента содержание элювируемого кальция в отдельных порциях фильтрата колебалось незначительно (от 0,75 до 0,35 мг). Всего за 12 промываний из нативной почвы было удалено 10,44 мг Са.

В вариантах с известкованием потери Са при промывании возрастали при увеличении дозы применения мелиоранта. Динамика выщелачиваемого Са во всех изученных вариантах опыта носила сходный характер. Вне зависимости от дозы применения фильтраты первого промывания характеризовались максимальным содержанием Са. Во второй порции фильтрата концентрация кальция снижалась резко, в 3–12 порциях – постепенно.

Абсолютные потери кальция по всем вариантам опыта составили: 0,5 дозы – 16,46 мг; 0,75 дозы – 14,67 мг; полная доза – 22,87 мг; 1,5 дозы – 23,67 мг; 2 дозы – 31,09 мг; 3 дозы – 26,55 мг; 4 дозы – 31,10 мг. Таким образом, повышение дозы применения извести в 2–4 раза по сравнению с научно-обоснованной (полной) дозой способствовало увеличению потерь Са в 1,1–1,36 раза.

Если допустить, что вымывание изначально содержащегося в мелиорируемой почве Са сопоставимо с выщелачиванием подвижного почвенного Са в непроизвесткованной почве, то доля выщелачиваемого Са, внесённого с известью (относительные потери), составила: 0,5 дозы ~ 3%; 0,75 дозы ~ 1,25%; полная доза ~ 2,76%; 2 дозы ~ 2,29%; 3 дозы ~ 1,19%; 4 дозы ~ 1,14%. Таким образом, относительные потери кальция (% от внесённого количества извести) при увеличении дозы применения извести снизились, а в переизвесткованных частях поля в течение длительного будет сохраняться запас способного к миграции кальция.

Для построения эмпирических моделей по данным табл. 1 целесообразно прологарифмировать данные и построить логарифмы эмпирических моделей на основе многочленов второй степени. Уравнения, описывающие миграционные потери кальция в отдельных вариантах опыта в результате 12 промываний, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Эмпирические модели, описывающие миграцию кальция

Вариант опыта	Эмпирическая модель			F	R ²
1. Контроль	$\ln(y_1) = 1,284 - 0,564t + 0,0325t^2$	(1)	8,148	0,64	
2. 0,5 дозы извести	$\ln(y_2) = 1,9 - 0,498t + 0,025t^2$	(2)	46,74	0,91	
3. 0,75 дозы извести	$\ln(y_3) = 1,659 - 0,483t + 0,026t^2$	(3)	24,49	0,84	
4. Полная доза извести	$\ln(y_4) = 2,117 - 0,5t + 0,029t^2$	(4)	17,08	0,79	
5. 1,5 дозы извести	$\ln(y_5) = 2,0197 - 0,449t + 0,0264t^2$	(5)	44,895	0,9	
6. Две дозы извести	$\ln(y_6) = 2,0948 - 0,3298t + 0,0157t^2$	(6)	24,7	0,85	
7. Три дозы извести	$\ln(y_7) = 2,407 - 0,53t + 0,0029t^2$	(7)	35,98	0,89	
8. Четыре дозы извести	$\ln(y_8) = 2,442 - 0,48t + 0,00266t^2$	(8)	25,178	0,84	

Все построенные эмпирические модели (1) – (8) на всем промежутке измерений от срока 1 до срока 12 обладают очень высокой статистической значимостью по F-критерию (критерий Фишера). Для сравнения

эмпирических моделей рассмотрим совместно графики моделей (1) – (8), представленные на рис. Как видно из рисунка, построенные эмпирические модели очень похожи друг на друга.

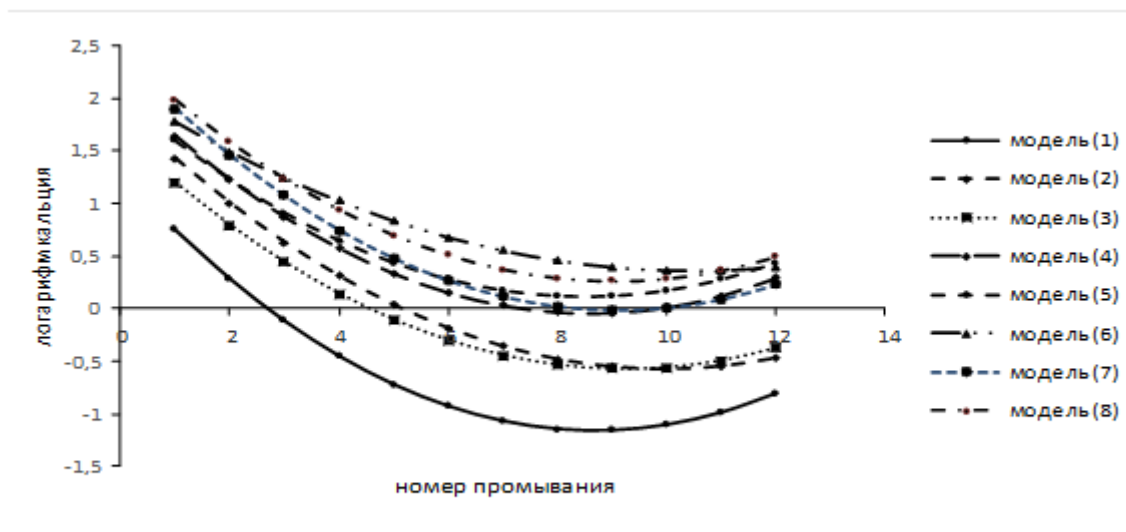


Рис. Эмпирические модели выщелачивания кальция в отдельных вариантах опыта

Модели можно разбить на три группы. Первая группа включает модели (4) – (8). Графики указанных моделей пересекаются и расположены близко друг к другу. Вторая группа включает модели (2) и (3). Их графики пересекаются между собой, но отделены от графиков моделей, входящих в первую группу. Третья группа включает модель (1). График данной модели отделен от всех остальных графиков. Таким образом, эмпирические модели образуют три непересекающихся кластера.

Для более формального объяснения проведенной кластеризации введем следующую числовую характеристику, и для каждой модели найдем сумму значений логарифмов модели для всех сроков от 1 до 12:

$$1) s_4 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_4(t)) = 5,2; s_5 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_5(t)) = 6,389;$$

$$s_6 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_6(t)) = 9,63; s_7 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_7(t)) = 6,396;$$

$$s_8 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_8(t)) = 9,01;$$

$$2) s_2 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_2(t)) = 0,268; s_3 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_3(t)) = -0,79;$$

$$3) s_1 = \sum_{t=1}^{12} \ln(y_1(t)) = -7,46.$$

Сумма $s_1 = -7,46$ (входящая в третий кластер) сильно отличается от сумм $s_2 = 0,268$ и $s_3 = -0,79$ (входящих во второй кластер), при этом суммы s_2 и s_3 различаются меньше, чем на 1,1. Суммы s_4, s_5, s_6, s_7, s_8 (входящие в первый кластер) очень сильно отличаются от сумм из третьего и второго кластеров и мало

различаются между собой. Таким образом, вычисленные значения введенной характеристики подтверждают правильность кластеризации.

Известно, что как недостаточное, так и избыточное внесение извести отрицательно сказывается на росте и развитии растений (Небольсин, Небольсина, 2005). Проведённое исследование показывает, что скопление извести в количестве выше научно обоснованной дозы применения на длительный период создаёт в почве неблагоприятные условия для функционирования растений и усиливает непроизводительные потери кальция.

ВЫВОДЫ

1. Проведено изучение миграционной подвижности Са при многократном промывании дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, мелиорируемой в широком интервале доз. Кальций обнаружен во всех порциях фильтрата. В контрольном варианте опыта без известкования суммарное количество удаленного кальция составило 10,44 мг; в вариантах с внесением извести: 0,5 дозы – 16,46 мг; 0,75 дозы – 14,67 мг; полная доза – 22,87 мг; 1,5 дозы – 23,67 мг; 2 дозы – 31,09 мг; 3 дозы – 26,55 мг; 4 дозы – 31,10 мг. Повышение дозы применения извести в 2–4 раза по сравнению с научно-обоснованной дозой способствовало увеличению потерь Са при миграции в 1,1–1,36 раза.

2. Разработаны эмпирические модели, описывающие процесс выщелачивания Са на всём промежутке изучения. Проведена кластеризация моделей, основанная на количестве (объёме) вымываемого Са в отдельных вариантах опыта.

Список литературы

- Аканова Н. И., Шильников И. А., Ефремова С. Ю., Аваков М. С. Значение химической мелиорации в земледелии и потери кальция и магния из почвы // Проблемы агрохимии и экологии. 2017. Вып. 1. С. 28–35.
- Белоконь В. Д., Игнатов В. Г., Шильников И. А. Изменение кислотности отдельных слоёв пахотного горизонта дерново-подзолистых почв при известковании // Химия в сельском хозяйстве. 1971. № 12. С. 14–17.
- Бобрицкая М. А. Вымывание питательных элементов из пахотных почв Нечерноземной зоны РСФСР // Почвоведение. 1975. № 11. С. 344–353.
- Голубева А. П., Пекова З. Н. Об определении рН солевой вытяжки в известкованных почвах // Бюл. ВИУА. 1971. № 11. С. 11–15.
- Кнашис В. И. Эффективность различных способов заделки известковых удобрений // Вопросы известкования кислых почв. 1976. Вып. 3. С. 36–42.
- Литвинович А. В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
- Литвинович А. В., Павлова О. Ю., Дричко В. Ф. Пространственная неоднородность кислотности почв // Агрохимический вестник. 2006. № 6. С. 10–12.
- Литвинович А. В., Лаврищев А. В., Буре В. М., Павлова О. Ю. Интенсивность миграции кальция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, произвесткованной различными дозами мелиоранта (по данным модельного опыта) // Агрохимия. 2015. № 6. С. 84–89.
- Литвинович А. В., Небольсина З. П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79–94.
- Мельникова М. Н. Результаты многолетних лизиметрических опытов и баланс кальция в почвах // Земледелие. Вып. 60. Киев: Урожай, 1985. С. 9–53.
- Научные основы и технологии использования удобрений и извести. Методические рекомендации. СПб., 1997. 52 с.
- Небольсин А. Н., Небольсина З. П. Теоретические основы известкования почв. СПб., 2005. 152 с.
- Чернов Д. В. Миграция водорастворимых веществ в дерново-подзолистых суглинистых пахотных почвах. Дис. канд. с.-х. наук. Л. – Пушкин: Архив СПбГАУ, 1984. 189 с.
- Шильников И. А., Аканова Н. И., Федотова Л. С. Определение потерь кальция из пахотных почв по данным полевых опытов // Плодородие. 2004. № 2. С. 21–23.
- Яковлева Л. В. Миграция оснований в дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России. СПб., 2013. 105 с.

References

- Akanova N. I., Shil'nikov I. A., Efremova S. Yu., Avakov M. S. Znachenije khimicheskoi melioratsii v zemledelii i poteri kal'ciya i magniya iz pochvy [The importance of chemical reclamation in agriculture and the loss of calcium and magnesium from the soil] // *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2017, vyp. 1, pp. 28–35.
- Belokon' V. D., Ignatov V. G., Shil'nikov I. A. Izmeneniye kislotnosti otdel'nykh sloyov pakhotnogo gorizonta dernovo-podzolistykh pochv pri izvestkovanii [Change of acidity of separate layers of arable horizon of sod-podzolic soils at liming] // *Himiya v sel'skom khozyaistve*, 1971, no. 12, pp. 14–17.
- Bobritskaya M. A. Vymyvaniye pitatel'nykh elementov iz pakhotnykh pochv Nechernozemnoi zony RSFSR [Leaching of nutrients from arable soils of the non-Chernozem zone of the RSFSR] // *Pochvovedeniye*, 1975, no. 11, pp. 344–353.
- Chernov D. V. *Migratsiya vodorastvorimyykh veschestv v dernovo-podzolistykh suglinistykh pakhotnykh pochvakh*. Diss. kand. s.-kh. nauk [Migration of water-soluble substances in sod-podzolic loamy arable soils. Dis. cand. agr. Sci.], L. – Pushkin: Arhiv SPbGAU, 1984, 189 p.
- Golubeva A. P., Pekova Z. N. Ob opredelenii rH solevoi vytyazhki v izvestkovannykh pochvakh [On determination of pH of salt extract in limed soils] // *Byul. VIUA*, 1971, no. 11, pp. 11–15.
- Knashis V. I. Effektivnost' razlichnykh sposobov zadelki izvestkovykh udobrenii [The effectiveness of different methods of incorporation of lime fertilizers] // *Voprosy izvestkovaniya kisllykh pochv*, 1976, vyp. 3, pp. 36–42.
- Litvinovich A. V. Prostranstvennaya neodnorodnost' agrokhimicheskikh pokazatelei pakhotnykh dernovo-podzolistykh pochv [Spatial heterogeneity of agrochemical indicators of arable sod-podzolic soils] // *Agrokhimiya*, 2007, no. 5, pp. 89–94.
- Litvinovich A. V., Pavlova O. Yu., Drichko V. F. Prostranstvennaya neodnorodnost' kislotnoti pochv [Spatial heterogeneity of soil acidity] // *Agrokhimicheskii vestnik*, 2006, no. 6, pp. 10–12.
- Litvinovich A. V., Lavrishev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Yu. Intensivnost' migratsii kal'ciya iz dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvy, proizvestkovannoi razlichnymi dozami melioranta (po dannym model'nogo opyta) [The intensity of calcium migration from sod-podzolic sandy loam soil, limed by different doses of meliorant (according to model experience)] // *Agrokhimiya*, 2015, no. 6, pp. 84–89.
- Litvinovich A. V., Nebol'sina Z. P. Prodolzhitel'nost' deistviya izvestkovykh meliorantov v pochvakh i effektivnost' izvestkovaniya [Duration of action of calcareous meliorants in soils and efficiency of liming] // *Agrokhimiya*, 2012, no. 10, pp. 79–94.

- Mel'nikova M. N. Rezul'taty mnogoletnikh lizimetricheskikh opytov i balans kal'ciya v pochvakh [Results of long-term lysimetric experiments and calcium balance in soils] // *Zemledeleye*, Kiev: Urozhaj, 1985, vyp. 60, pp. 9–53.
- Nauchnyye osnovy i tekhnologii ispol'zovaniya udobrenij i izvesti [Scientific bases and technologies of fertilizers and lime use], *Metodicheskiye rekomendacii*, Saint-Petersburg, 1997, 52 p.
- Nebol'sin A. N., Nebol'sina Z. P. *Teoreticheskiye osnovy izvestkovaniya pochv* [Theoretical foundations of soils liming], Saint-Petersburg, 2005, 152 p.
- Shil'nikov I. A., Akanova N. I., Fedotova L. S. Opredeleniye poter' kal'ciya iz pakhotnykh pochv po dannym polevykh opytov [Determination of calcium losses from arable soils according to field experiments data] // *Plodorodiye*, 2004, no. 2, pp. 21–23.
- Yakovleva L. V. *Migratsiya osnovanij v dernovo-podzolistykh pochvakh Severo-Zapada Rossii* [Migration of bases in sod-podzolic soils of the North-West of Russia], Saint-Petersburg, 2013, 105 p.

УДК 631.8.022.3

DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.06

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ПОЛЕВОМ СЕВООБОРОТЕ

Н. А. Цыганова

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

196601, Санкт-Петербург – Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, лит. А

E-mail: nats-2012y@yandex.ru

Поступила в редакцию 28 января 2020 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

Минеральные удобрения являются одним из факторов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур, обеспечивающим до 70% прироста урожайности на Северо-Западе Российской Федерации. Однако эффективность их применения в значительной степени зависит от неоднородности почвенного плодородия, весьма характерной для данного региона. Методической основой исследования являлся стационарный ландшафтный полевой опыт, проведенный в 2008–2012 гг. Объектами исследования выступали сельскохозяйственные культуры зернотравянопропашного севооборота и варианты системы удобрения, различающиеся методическими подходами к учету пространственной неоднородности агрохимических свойств почвы. В ходе исследования установлено, что на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах минеральные удобрения остаются одним из самых эффективных факторов повышения производительности и эффективности труда в сельском хозяйстве. При их равномерном применении прибавка урожая основной продукции составила 2,05 т га⁻¹, коэффициент энергетической эффективности – 1,4, рентабельность – 256%. В условиях повышенной пестроты почвенного плодородия, свойственной пахотным угодьям Северо-Запада Российской Федерации, энергетически и экономически обоснованным является использование точных минеральных систем удобрения, базирующихся на ежегодном дифференцированном применении туков или разовом приеме дифференцированного окультуривания и их последующем равномерном использовании. Применение данных систем удобрения привело к увеличению урожайности сельскохозяйственных культур зернотравянопропашного севооборота на 110–112%, при этом коэффициент энергетической эффективности составил 2,1–2,4, а уровень рентабельности – 257–499%.

Ключевые слова: минеральные удобрения, неоднородность почвенного плодородия, дифференцированное применение удобрений, энергетическая эффективность, экономическая эффективность.