

УДК 631.416.7:631.445.24:633.85.494:631.821

ТРАНСЛОКАЦИЯ КАЛЬЦИЯ В РАСТЕНИЯ ЯРОВОГО РАПСА ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ, МЕЛИОРИРОВАННОЙ КОНВЕРСИОННЫМ МЕЛОМ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ДОЗ. СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

© 2023 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург—Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.04.2023 г.

После доработки 14.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В 24-вариантном вегетационном прецизионном опыте, заложенном на кислой дерново-подзолистой супесчаной почве, мелиорированной конверсионным мелом (КМ) в широком интервале доз, установлено влияние известкования на содержание доступного для растений кальция в почве и его транслокацию в ткани рапса. Результаты свидетельствовали, что рапс является экологически пластичным видом растений. Возрастание количества внесенного мела от 0.1 до 3-х полных доз, рассчитанных по гидролитической кислотности, привело к увеличению концентрации Са в рапсе в год известкования от 0.81 до 3.14%. Разработаны эмпирические зависимости концентрации кальция в почве и растениях от дозы применения мела. Рассмотрены 3 подхода к анализу экспериментальных данных, описывающие взаимосвязь содержания кальция в почве с его накоплением в тканях растений. Показано, что искусственное усреднение данных содержания кальция в почве при одинаковой дозе применения мелиоранта в отдельных повторностях приводило к потере информации, что отражалось в статистических характеристиках построенных эмпирических моделей.

Ключевые слова: дерново-подзолистая супесчаная почва, известкование, конверсионный мел, яровой рапс, эмпирические зависимости, транслокация кальция в растения из почвы.

DOI: 10.31857/S000218812311008X, EDN: PPDBNM

ВВЕДЕНИЕ

Рапс относится к ценным пищевым и кормовым культурам [1]. Посевные площади ярового рапса в Ленинградской обл. неуклонно увеличиваются: с 2017 по 2022 г. они возросли в 4.2 раза (с 1.3 до 5.5 тыс. га). Потенциальные возможности регионов, по данным ФНЦ “ВИК им. В.Р. Вильямса”, позволяют расширить посевы культуры до 2.0–2.5 млн га [2].

Считается общепризнанным, что баланс минеральных элементов в рационах сельскохозяйственных животных не менее важен, чем баланс других питательных веществ, а формирование пищевой ценности рапса с помощью удобрений и

мелиорантов является перспективным агрохимическим приемом [3, 4].

В лаборатории мелиорации почв АФИ (г. Санкт-Петербург) изучают влияние удобрений и мелиорантов на формирование химического состава рапса. Например, в работе [5] проведено сравнительное изучение удобрительной ценности различных видов фосфорных удобрений (суперфосфата, преципитата, фосфоритной муки и фосфатного шлама) на продуктивность и химический состав ярового рапса, выращенного на кислой дерново-подзолистой почве. Проведенное исследование показало, что применение фосфорных удобрений является эффективным приемом регулирования баланса макро- и микроэле-

ментов в растениях рапса, позволяя существенным образом изменять его химический состав.

В серии вегетационных опытов [6] изучен химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произведенных гажой, феррохромовым шлаком, конверсионным мелом и доломитовой мукой. Установлено, что на формирование элементного состава ярового рапса влияют сложные процессы антагонизма и синергизма при поглощении корнями растений отдельных элементов. В работах [7, 8] показано, насколько различна насыщенность ярового рапса марганцем, цинком, железом, медью, стронцием и кальцием в год применения мелиоранта и после его полного разложения в почве спустя 5 лет после применения.

Эти и другие исследования, проведенные специалистами лаборатории [9–12], позволили заключить, что яровой рапс является экологически пластичным видом, а на формирование его элементного состава влияет химическая обстановка в почве. Цель работы — в контролируемых условиях вегетационного прецизионного опыта, проведенного на кислой дерново-подзолистой почве, мелиорированной КМ в широком интервале доз, установить концентрацию доступных для растений соединений кальция, выявить содержание кальция в тканях ярового рапса спустя 1 год после известкования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели был заложен 24-вариантный прецизионный опыт, охватывающий количество мелиоранта (конверсионного мела — КМ) от 0.1 до 3-х доз, рассчитанных по гидролитической кислотности (0.8–24 т $\text{CaCO}_3/\text{га}$) с шагом различий 800 кг/га. Схема опыта приведена в табл. 1.

Опыт закладывали следующим образом. Варианты опыта 1, 2, 4, 7, 8, 10, 17, 23 заложены в трехкратной повторности. Во всех остальных вариантах опыта использовали однократную повторность. Это позволило изучить возможно большее количество ситуаций, встречающихся в полевых условиях при известковании [13–15].

При построении моделей, описывающих взаимосвязь содержания подвижного кальция в почве и его транслокацию в растения, использовали несколько подходов. Первый подход заключался в использовании 40 независимых наблюдений без усреднения данных, полученных в 8-ми вариантах проведенного эксперимента. Второй подход предусматривал использование для построения моделей материалов опыта с предварительным

усреднением экспериментальных данных 8-ми вариантов опыта, заложенных в трехкратной повторности. Количество определений, используемых для построения моделей, равно 24. При третьем подходе для построения моделей использовали данные 8-вариантного вегетационного опыта, заложенного в трехкратной повторности. Применяли традиционный подход к обработке данных эксперимента, когда опытные данные в отдельных вариантах опыта усредняли по повторениям. Количество данных при построении моделей равно 8.

Таким образом, при построении моделей усредняли наблюдения с различным содержанием кальция в почве при одинаковом количестве кальция, внесенного в составе мелиоранта, т.е. происходило искусственное сглаживание данных эксперимента.

Количество сосудов, используемых в опыте — 40 шт. Сосуды вмещали 5 кг почвы. Физико-химическая характеристика почвы: pH_{KCl} 4.1, $H_{\text{г}}$ — 5.4 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус — 3.02%, содержание частиц <0.01 мм — 18.6%.

Культура — яровой рапс сорта Оредеж-4. Растения убирали в фазе цветения. Извлечение доступного для растений кальция из почвы проводили после уборки растений, используя ацетатно-аммонийный буфер pH 4.8. Определение кальция в растениях осуществляли после озоления в муфеле при температуре, равной 550°C. Анализ почвы и растений проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре. Построение математических зависимостей осуществляли согласно [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные содержания кальция в почве и растениях при использовании возрастающих доз мела приведены в табл. 1. Показано, что минимальная концентрация кальция была характерна для контрольного варианта опыта без известкования (420 мг/кг массы почвы). Доза применения мела оказала решающее влияние на содержание подвижного кальция в почве. Несмотря на некоторую (и неизбежную) вариабельность данных, установлено постепенное увеличение концентрации подвижного кальция в почве известкованных сосудов. Размах изменений составил от 460 до 21800 мг/кг воздушно-сухой почвы.

Эмпирическая модель (1.1), описывающая взаимосвязь содержания доступных для растений соединений кальция в почве от дозы применения, имела следующий вид:

$$y_{1.1} = 858.33 + 0.031 \cdot x, \quad (1.1)$$

где, $y_{1.1}$ — содержание Ca в почве, x — доза CaCO_3 .

Таблица 1. Содержание кальция в почве и растениях при использовании возрастающих доз конверсионного мела (КМ)

Вариант	Сосуд, №	Содержание Са в почве	Содержание Са в почве (среднее)	Содержание СаО в растениях	Содержание Са в растениях (среднее)
		мг/кг		%	
1. Контроль без известкования	1	420	453	0.81	0.96
	2	460		1.16	
	3	480		0.9	
2. КМ по 0.1 H_T	4	620	655	1.22	1.20
	5	646		1.22	
	6	700		1.16	
3. КМ по 0.2 H_T	7	760	760	1.16	1.16
4. КМ по 0.3 H_T	8	880	880	1.75	1.94
	9	820		2.21	
	10	940		1.86	
5. КМ по 0.4 H_T	11	1060	1060	1.92	1.92
6. КМ по 0.5 H_T	12	1140	1140	1.92	1.92
7. КМ по 0.6 H_T	13	1060	1140	2.15	2.06
	14	1120		1.98	
	15	1240		2.04	
8. КМ по 0.7 H_T	16	1180	1290	2.18	2.16
	17	1460		2.21	
	18	1240		2.1	
9. КМ по 0.8 H_T	19	1200	1200	2.44	2.44
10. КМ по 0.9 H_T	20	1320	1490	2.39	2.33
	21	1620		2.27	
	22	1540		2.33	
11. КМ по 1.0 H_T	23	1600	1600	1.8	1.80
12. КМ по 1.1 H_T	24	1700	1700	2.21	2.21
13. КМ по 1.2 H_T	25	1720	1720	1.98	1.98
14. КМ по 1.3 H_T	26	1920	1920	2.27	2.27
15. КМ по 1.4 H_T	27	1760	1760	2.47	2.47
16. КМ по 1.5 H_T	28	2040	2040	2.21	2.21
17. КМ по 1.6 H_T	29	2060	2090	2.04	2.12
	30	2140		2.27	
	31	2060		2.04	
18. КМ по 1.7 H_T	32	2040	2040	2.39	2.39
19. КМ по 1.8 H_T	33	2220	2220	2.56	2.56
20. КМ по 1.9 H_T	34	1560	1560	2.47	2.47
21. КМ по 2.0 H_T	35	1540	1540	2.62	2.62
22. КМ по 2.2 H_T	36	2120	2120	3.32	3.32
23. КМ по 2.5 H_T	37	2120	2130	2.85	2.97
	38	2180		3.14	
	39	2100		2.91	
24. КМ по 3.0 H_T	40	1940	1940	2.33	2.33

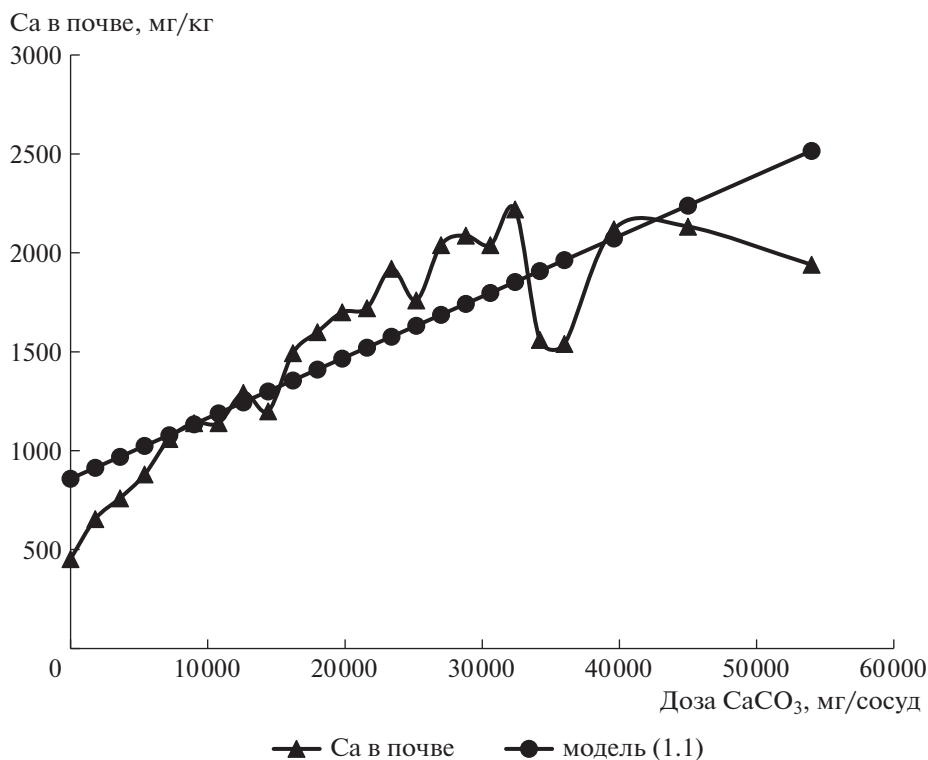


Рис. 1. Влияние дозы применения КМ на содержание подвижного кальция в почве.

Для модели (1.1) $p = 1.33E - 07$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.724$. Модель (1.1) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.1) представлен на рис. 1. Во всем промежутке изучения доз имелась сильная связь между дозой CaCO_3 и содержанием Ca в почве.

Изменение содержания доступных для растений соединений кальция в почве непосредственно сказалось на накоплении этого элемента в тканях рапса. Минимальная концентрация кальция в зеленой массе рапса установлена в контрольном варианте опыта. Добавление в почву возрастающих доз конверсионного мела привело к росту концентрации кальция в рапсе. Размах изменений его содержания в опыте составил от 0.81 до 3.14%, т.е. изменялся в 3.88 раза. Таким образом, экологическая ситуация, складывавшаяся в отдельных сосудах опыта при известковании возрастающими дозами мела, была определяющим фактором, влияющим на концентрацию Ca в растениях рапса.

Эмпирическая модель (1.2) влияния дозы применения мелиоранта на концентрацию кальция в зеленой массе рапса описывается уравнением:

$$y_{1.2} = 1.53 + 0.000029 \cdot x, \quad (1.2)$$

где $y_{1.2}$ — содержание Ca в растениях; x — доза CaCO_3 .

Для модели (1.2) $p = 6.93E - 06$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.608$. Модель (1.2) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.2) представлен на рис. 2. Во всем промежутке изучения доз имелась сильная связь между дозой CaCO_3 и содержанием Ca в растениях.

Таким образом, результаты изучения свидетельствовали, что использование возрастающих доз КМ приводило к обогащению почвы доступными для растений соединениями кальция и его накоплению в тканях ярового рапса уже в год известкования.

Одной из задач настоящего исследования являлась оценка статистической значимости моделей, описывающей взаимосвязь содержания кальция в почве и его транслокацией в растения при использовании различных подходов к анализу экспериментальных данных.

Зависимость концентрации Ca в растениях от содержания Ca в почве (40 наблюдений без усреднения). Эмпирическая модель для $y_{1.3}$ — Ca (рапс, без усреднения) имела следующий вид:

$$y_{1.3} = 0.906 + 0.00083 \cdot x, \quad (1.3)$$

где x — содержание Ca в почве.

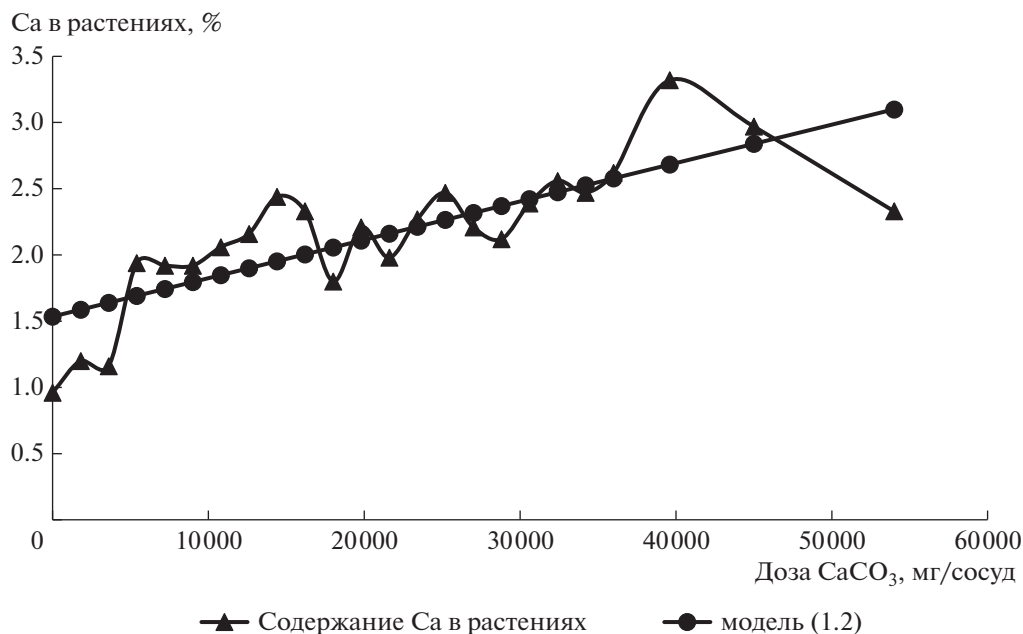


Рис. 2. Зависимость содержания кальция в растениях рапса от дозы КМ.

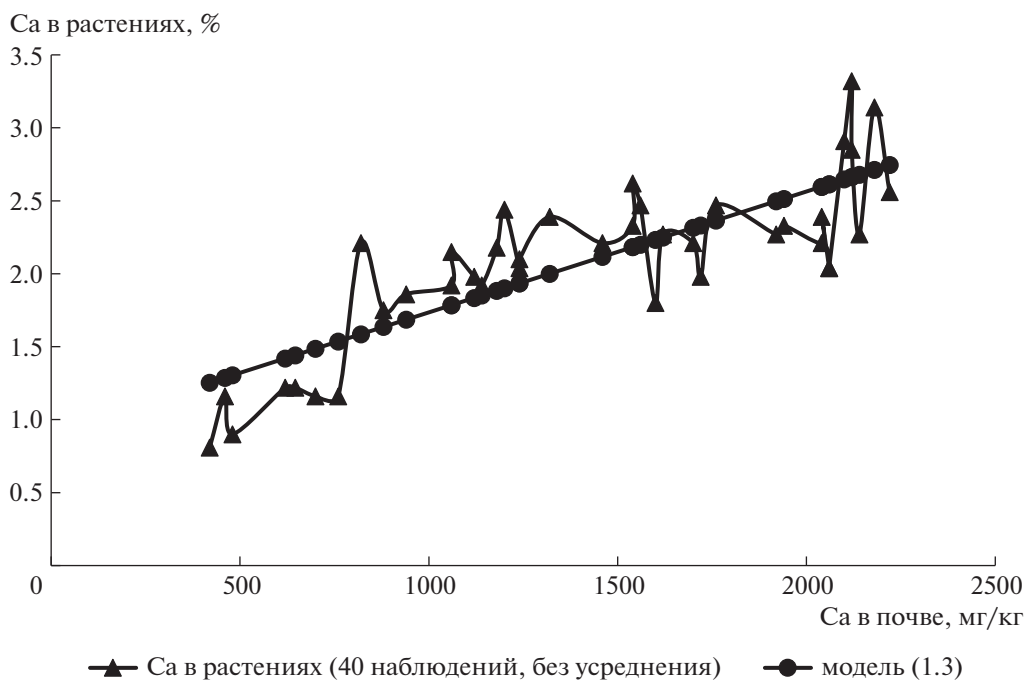


Рис. 3. Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (40 наблюдений без усреднения).

Для модели (1.3) $p = 2.41E - 10$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.656$. Модель (1.3) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.3) представлен на рис. 3.

Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (усредненные данные

24-х определений). Эмпирическая модель для $y_{1.4}$ – Са (рапс, усредненные данные) имела следующий вид:

$$y_{1.4} = 0.934 + 0.00081 \cdot x, \quad (1.4)$$

где x – содержание Са в почве. Для модели (1.4) $p = 6.5E - 06$ (p -value по F -критерию), коэффи-

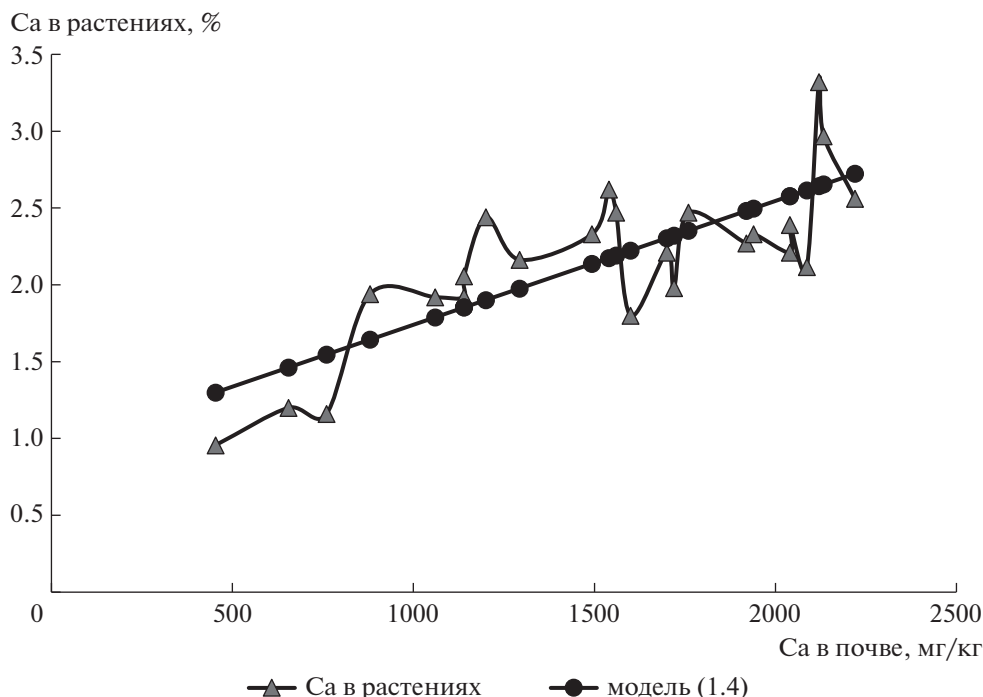


Рис. 4. Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (24 наблюдения с усреднением).

коэффициент детерминации $R^2 = 0.61$. Модель (1.4) статистически значима на очень высоком уровне значимости. График модели (1.4) представлен на рис. 4.

Зависимость концентрации Са в растениях от содержания Са в почве (8 наблюдений с усреднением). Эмпирическая модель для $y_{1.5}$ – Са (рапс, 8 наблюдений) имела следующий вид:

$$y_{1.5} = 0.846 + 0.00088 \cdot x, \quad (1.5)$$

где x – содержание Са в почве. Для модели (1.5) $p = 0.0058$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.74$. Модель (1.5) статистически значима на высоком уровне значимости. График модели (1.5) представлен на рис. 5.

Таким образом, рассмотрены 3 подхода к анализу данных взаимосвязи содержания Са в почве (объясняющая переменная) и содержания Са в растении рапса (результатирующий показатель, отклик). Первый подход заключался в построении эмпирической модели (1.3) по результатам 40 независимых наблюдений, в которых варьировалось содержание Са в почве (количественная переменная), при этом варьировалось количество Са в мелиоранте (количественная и качественная переменная). Содержание Са в почве складывалось из фонового содержания Са в почве до внесения мелиоранта и Са, внесенного с мелиорантом.

Второй подход заключался в предварительном усреднении наблюдений с одним и тем же содержанием Са в мелиоранте. В результате каждому внесенному количеству Са с мелиорантом соответствовало только одно наблюдение. Количество наблюдений уменьшилось до 24 наблюдений (24 варианта опыта с разным содержанием Са в мелиоранте). По результатам 24 наблюдений была построена эмпирическая модель (1.4). Второй подход искусственно агрегировал различные наблюдения с одним и тем же содержанием мелиоранта, но разным окончательным содержанием Са в почве в одно наблюдение с помощью усреднения наблюдений.

Сравнивая построенные эмпирические модели (1.3) и (1.4) необходимо отметить, что, как следует из сравнения величин p -value по F -критерию, статистическая значимость модели (1.3) существенно выше статистической значимости модели (1.4), коэффициент детерминации для модели (1.3) также больше, чем коэффициент детерминации для модели (1.4). Следовательно, эмпирическая модель (1.3) обладает очевидными преимуществами по сравнению с эмпирической моделью (1.4).

Более высокое качество модели (1.3) по сравнению с моделью (1.4) становится особенно заметным при сравнении графиков на рис. 3 и 4. График модели (1.3) на рис. 3 лучше соответствует наблюдениям по сравнению с графиком модели (1.4) на рис. 4.

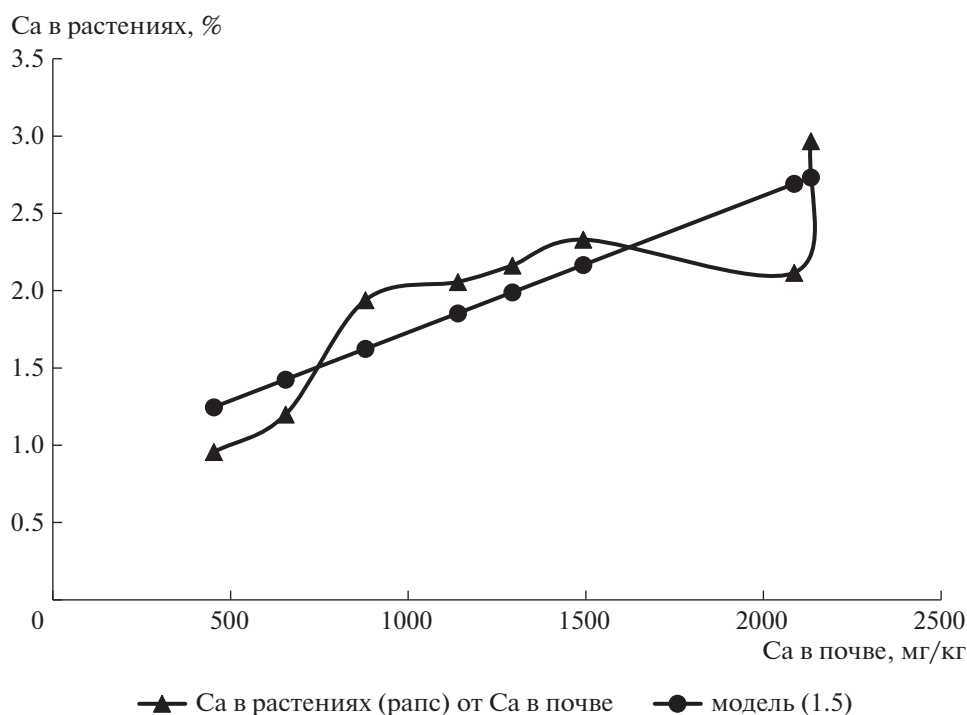


Рис. 5. Концентрация Са в растениях в зависимости от содержания Са в почве.

В опыте на рис. 4 присутствует искусственное сглаживание данных, вызванное усреднением наблюдений. Усредняются наблюдения с разным содержанием кальция в почве при внесении одинакового количества кальция вместе с мелиорантом. Такое усреднение приводит к потере информативности наблюдений, снижает качество собранной статистической информации.

Эмпирическая модель (1.5) построена по 8-ми усредненным наблюдениям (третий подход). Статистическая значимость модели (1.5) существенно меньше, чем моделей (1.3) и (1.4). График на рис. 5 очевидно содержит сглаженные данные, которые определяют искусственную взаимозависимость по сравнению с рис. 3 и 4.

Коэффициент детерминации модели (1.5) несколько больше, чем в моделях 1.3 и 1.4, что связано со сглаживанием данных, по которым строили модель (1.5). Коэффициент детерминации не определяет качество построенных моделей в полной мере. Сглаживание вносит в данные искусственную зависимость, которой на самом деле нет. Именно поэтому коэффициент детерминации не может служить главным критерием при оценке качества эмпирической модели.

Величина p -value по F -критерию показывает действительное качество построенных эмпирических моделей (1.3), (1.4) и (1.5). Очевидно, что модель (1.5) проигрывает моделям (1.3) и (1.4).

Из 3-х моделей наиболее достоверной является модель (1.3), т.к. она построена на основе независимых наблюдений. Данные не содержали искусственно внесенных в результате сглаживания (усреднения) зависимостей, характеристика p -value по F -критерию была минимальной по отношению к 2-м другим моделям.

ВЫВОДЫ

1. Рапс является экологически пластичным видом растений. На формирование его химического состава существенным образом влияет химический состав почвы. Рост количества внесенного в почву мела с 0.1 до 3 полных доз, рассчитанных по величине H_r , способствовал увеличению концентрации Са в рапсе с 0.81 до 3.14%.

2. Разработаны эмпирические модели, описывающие связь между дозой применения мелиоранта, концентрацией подвижного кальция в почве и его содержанием в растениях.

3. Рассмотрены 3 подхода к анализу экспериментальных данных, описывающих взаимосвязь содержания кальция в почве и его транслокации в растения. Показано, что искусственное усреднение данных содержания кальция в почве при одинаковой дозе применения мелиоранта приводило к потере информации, что отразилось в статистических характеристиках построенных эмпирических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемов И.В.* Перспективы использования рапса в кормопроизводстве России // Кормопроизводство России. М., 1997. С. 74–82.
2. Перспективы развития рапсосоения в Северо-Западном регионе РФ // Постановление научного координационного совета по земледелию, мелиорации и растениеводству Северо-Западного научно-методического центра РАСХН от 26 июня 2007 г. СПб. – Пушкин, 2007. 35 с.
3. *Микхеев А.И.* Минеральный состав кормов. Петрозаводск: Карелия, 1974. 144 с.
4. *Оль Ю.К.* Минеральное питание животных в различных природоохозяйственных условиях. Л.: Колос, 1967. 215 с.
5. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Волкова Е.Н.* Влияние различных видов фосфорных удобрений и фосфатного шлама на химический состав зеленой массы ярового рапса на кислой дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2006. № 3. С. 34–39.
6. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Алексеев Ю.В., Огелудин А.С.* Химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произвесткованных промышленными отходами // Агрохимия. 2008. № 7. С. 50–55.
7. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Нейбауэр А.О.* Поступление стронция в растения рапса в процессе растворения отходного мела, используемого для мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2012. № 3. С. 77–84.
8. *Литвинович А.В., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О.* Исследование микроэлементного состава ярового рапса на разных стадиях растворения химических мелиорантов // Агрохимия. 2014. № 5. С. 66–73.
9. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В.* Накопление стабильного стронция сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистых почв конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 9. С. 80–88.
10. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // Агрохимия. 2002. № 4. С. 81–87.
11. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В.* О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // Агрохимия. 2001. № 2. С. 74–78.
12. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Влияние фосфатного шлама на урожай и качество растениеводческой продукции // Удобрения и химические мелиоранты в агроэкосистемах. Мат-лы 5-й науч.-практ. конф. СПб., 1998. С. 149–153.
13. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // Агрохимия. 2010. № 10. С. 3–10.
14. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф.* Пространственная неоднородность кислотности почв // Агрохим. вестн. 2006. № 6. С. 10–12.
15. *Литвинович А.В.* Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
16. *Буре В.М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб., 2007. 141 с.

Translocation of Calcium into Spring Rape Plants from Sod-Podzolic Sandy Loam Soil Reclaimed with Conversion Chalk in a Wide Range of Doses. Comparison of Data Preparation Techniques for Building Empirical Models

A. V. Litvinovich^{a,b,#}, A.V. Lavrishchev^b, and V. M. Bure^{a,c}

^aAgrophysical Research Institute
Grazhdansky ave. 14, St. Petersburg–Pushkin 195220, Russia

^bSankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia

^cSankt-St. Petersburg State University
Universitetskaya nab., 7–9, St. Petersburg 199034, Russia

[#]E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

In a 24-year vegetation precision experiment based on acidic sod-podzolic sandy loam soil reclaimed with conversion chalk (CC) in a wide dose range, the effect of liming on the content of calcium available to plants in the soil and its translocation into rapeseed tissue was established. The results showed that rapeseed is an ecologically plastic plant species. An increase in the amount of chalk introduced from 0.1 to 3 full doses calculated by hydrolytic acidity led to an increase in the Ca concentration in rapeseed in the liming year from 0.81 to 3.14%. Empirical dependences of calcium concentration in soil and plants on the dose of chalk application have been developed. 3 approaches to the analysis of experimental data describing the relationship of calcium content in the soil with its accumulation in plant tissues are considered. It is shown that artificial averaging of the data on the calcium content in the soil with the same dose of meliorant in individual repetitions led to loss of information, which was reflected in the statistical characteristics of the constructed empirical models.

Keywords: sod-podzolic sandy loam soil, liming, conversion chalk, spring rape, empirical dependencies, translocation of calcium into plants from soil.