

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО ЖЕЛЕЗА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ, МЕЛИОРИРУЕМОЙ ДОЛОМИТОМ

© 2019 г. А. В. Литвинович^{1,*}, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3},
О. Ю. Павлова¹, А. О. Ковлева¹

¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское ш., 2, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*E-mail: avlavr@rambler.ru

Поступила в редакцию 27.10.2017 г.

После доработки 13.11.2017 г.

Принята к публикации 10.12.2018 г.

В 10-вариантном микрополевым опыте, проведенном на сильнокислой дерново-подзолистой почве, известкованной различными по размеру частицами доломита, прослежена динамика содержания подвижного (доступного для растений) железа. Выявлено, что известкование приводило к снижению подвижности железа в почве. Чем больше был размер частиц мелиоранта, тем их влияние на изученный показатель было меньше. Изученные фракции доломита по их влиянию на изменение содержания подвижного железа в почве разбили на 3 группы. В вариантах, мелиорируемых фракциями доломита размером 0.25–1.0, 1–3 и 3–5 мм в научно обоснованной дозе, средние скорости изменения содержания этого элемента во всем промежутке времени изучения значимо не отличались от нуля. В варианте без известкования и вариантах, мелиорируемых известняковой мукой (ИМ) и доломитовой мукой (ДМ), наблюдали значимую положительную динамику этого показателя (тенденцию к возрастанию концентрации железа в среднем на протяжении 10 опыто-лет). В вариантах, известкованных доломитом в заведомо завышенных дозах, выявлена значимая отрицательная динамика содержания железа в почве. Возврат к исходному содержанию изученного элемента в почве до закладки опыта установлен только в вариантах, мелиорируемых доломитовой крошкой размером 1–3 и 3–5 мм. Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие динамику исследованного показателя в почве всех вариантов опыта.

Ключевые слова: динамика изменения содержания, подвижное железо, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, мелиорация, доломит.

DOI: 10.1134/S0002188119030098

ВВЕДЕНИЕ

Железо – необходимый элемент для роста и развития растений. Участие железа в процессах обмена веществ в растительном организме чрезвычайно обширно и отражается на активности и характере метаболизма потребляемых растениями элементов питания. Этот элемент участвует в переносе электронов и окислительно-восстановительных реакциях, таких как окисление углеводов, восстановление сульфатов и нитратов. Большую роль играет железо в фотосинтезе растений, являясь незаменимым компонентом в составе хлоропластов. Недостаток железа тормозит два важнейших процесса энергообмена растений –

фотосинтез и дыхание и вызывает глубокий хлороз развивающихся листьев [1].

Подзолистые и дерново-подзолистые почвы Северо-Запада Нечерноземной зоны содержат очень большие валовые запасы железа. По данным Пестрякова [2], валовое содержание железа в верхних горизонтах почв меняется от 0.7 до 5.0% и более к массе почвы. В зависимости от минералогического состава, степени разрушенности почвенных минералов в легкоподвижные (доступные для растений) формы переходит от 0.01 до 1% общего содержания этого элемента [3].

Состояние железа в почвах изучено достаточно полно [4–6]. Подвижность железа возрастает

от почв с щелочной реакцией к нейтральной и далее к кислым почвам [7]. В кислой среде происходит более интенсивное поглощение этого элемента растениями. Растворимость солей трехвалентного железа при нормальной реакции почвы очень невелика, однако резко возрастает при подкислении: понижение рН почвы с 5.0 до 4.0 увеличивает ее в 1000 раз [3]. Кроме того, переувлажнение почв существенно увеличивает содержание в почве восстановленных форм железа.

Известкование способствует уменьшению концентрации подвижного железа в почве [8]. Максимальное снижение подвижности этого элемента отмечено при рН_{KCl}, соответствующем 6.5–7.2 [3].

В 2011 г. в лаборатории мелиорации почв АФИ (г. С.-Петербург) начато изучение возможности использования отсева щебеночного производства месторождения Елизаветино (Гатчинский р-н Ленинградской обл.) в качестве известкового мелиоранта. Определена скорость растворения, удобрительная ценность и мелиоративные свойства различных по размеру частиц доломита [9–11]. Установлены масштабы миграции катионов кальция и магния из почвы, произвесткованной крупными фракциями доломитовой крошки [12]. Однако невыясненным остается вопрос о влиянии отсева доломита на динамику содержания доступных для растений форм железа в почвах.

Цель работы – в условиях длительного микрополевого опыта изучить динамику содержания подвижного железа в почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями отсева доломита и их сочетаниями между собой; разработать эмпирические модели, адекватно описывающие изменение в почве концентрации этого элемента в длительном последствии мелиоранта; вычислить среднюю скорость изменения содержания железа в почве во время всего срока проведения опыта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были дерново-подзолистая почва и различные по размеру фракции отсева доломита (М). Физико-химическая характеристика почвы следующая: рН_{KCl} 4.2, H_T – 5.6 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 1.76%, содержание частиц <1 мм – 21.2%, содержание обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} – 1.54 и 0.34 ммоль(экв)/100 г почвы соответственно. Содержание подвижного железа – 41 мг/кг почвы.

В микрополевым опыте изучали влияние фракций отсева доломита месторождения Елизаветино размером <0.25 мм – доломитовую муку

(ДМ); 0.25–1, 1–3 и 3–5 мм и их сочетаний между собой. Контролями служили вариант без применения мелиоранта и вариант с использованием стандартной известняковой муки (ИМ), внесенной в эквивалентной отсева дозе. Схема опыта представлена в табл. 1. Повторность опыта четырехкратная.

Методика проведения микрополевого опыта была следующей. Сосуды емкостью 40 л без дна закапывали в почву на глубину 50 см. В них помещали 40 кг почвы, произвесткованной фракциями отсева доломита по полной дозе H_T и их сочетаниями между собой в заведомо завышенных дозах. Последнее открывало путь к созданию мелиоранта пролонгированного действия. Опыт заложен в 2011 г. В опыте последовательно выращивали культуры, отзывчивые на известкование и характеризующиеся высоким уровнем потребления кальция и магния: в 2011 г. – рапс, в 2012 г. – вику и горчицу, в 2013 и 2014 гг. – бобы и горчицу, в 2015 г. – ячмень с подсевом тимофеевки. В 2016 г. провели 2 укоса тимофеевки. Уборку растений проводили в фазе цветения. Концентрацию доступного для растений железа в почве устанавливали после уборки каждой культуры. Всего проведено 10 определений (10 опыто-лет).

При закладке опыта почва была удобрена АФК в количестве 48 г/м². Кроме того, перед посевом растений ежегодно применяли АФК по 6 г/м². Определение Fe вели на атомно-адсорбционном спектрофотометре “Spectr AA 240 FS” фирмы “Varian” методом пламенной атомизации, предварительно извлекая его из почвы ацетатно-аммонийным буфером (ААБ рН 4.8). Математическую обработку данных проводили согласно [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные изучения содержания железа в процессе проведения опыта сведены в табл. 1. Результаты показали, что увеличение концентрации доступных форм железа в почве контрольного варианта зафиксировано уже в год закладки эксперимента после уборки рапса. Несмотря на некоторую (и неизбежную) вариабельность изученного показателя, рост концентрации продолжался до 9-го срока наблюдений, когда концентрация железа в почве возросла по сравнению с исходным содержанием до закладки опыта в 1.7 раза.

По мнению Небольсина с соавт. [3], варьирование содержания подвижного железа по годам в почвах длительных полевых опытов может быть вызвано 3-мя причинами: 1 – различиями в погодных условиях, 2 – влиянием возделываемых культур за счет восстановительного действия кор-

Таблица 1. Динамика содержания подвижного железа в кислой дерново-подзолистой суглинистой почве при известковании различными по размеру частицами доломита, мг/кг почвы

Вариант	Сроки наблюдения, годы									
	2011	2012(1)	2012(2)	2013(1)	2013(2)	2014(1)	2014(2)	2015	2016(1)	2016(2)
1. НРК (фон)	48.9	55.6	46.4	64.1	61.0	69.8	67.3	69.8	70.4	56.3
2. Фон + ИМ по $1H_r$	27.5	32.2	24.0	25.1	30.8	37.7	34.6	31.1	40.4	36.1
3. Фон + $M (<0.25 \text{ мм})$ по $1H_r$	24.6	29.3	20.9	20.5	25.4	33.6	26.0	28.7	35.7	32.3
4. Фон + $M (0.25-1 \text{ мм})$ по $1H_r$	34.5	31.8	21.7	21.0	21.7	28.4	22.6	34.1	32.2	33.4
5. Фон + $M (1-3 \text{ мм})$ по $1H_r$	37.2	44.0	28.2	35.5	37.5	40.0	31.9	34.8	42.1	33.6
6. Фон + $M (3-5 \text{ мм})$ по $1H_r$	39.4	55.9	38.3	50.0	51.3	57.3	49.8	49.6	57.3	37.7
7. Фон + $M (<0.25 \text{ мм})$ по $0.5H_r$ + + $M (0.25-1 \text{ мм})$ по $0.5H_r$ + M ($1-3 \text{ мм})$ по $2H_r$	19.0	25.1	12.6	13.0	12.5	12.0	10.0	14.0	14.4	11.6
8. Фон + $M (<0.25 \text{ мм})$ по $0.5H_r$ + + $M (0.25-1 \text{ мм})$ по $0.5H_r$ + M ($1-3 \text{ мм})$ по $3H_r$	18.6	23.7	12.5	14.7	11.6	12.5	10.8	11.6	13.3	9.3
9. Фон + $M (<0.25 \text{ мм})$ по $0.5H_r$ + + $M (0.25-1 \text{ мм})$ по $0.5H_r$ + M ($1-3 \text{ мм})$ по $5H_r$	17.9	21.1	10.7	14.8	10.5	11.9	9.4	11.2	11.4	8.4
10. Фон + $M (3-5 \text{ мм})$ по $5H_r$	35.2	36.1	21.4	27.2	24.7	22.0	21.2	21.3	21.2	14.2
HCP_{05}	2.9	3.3	2.5	2.8	4.0	3.1	3.8	9.3	5.5	6.6

невых выделений и выноса оснований, 3 – действием активности Солнца и изменением магнитного поля Земли.

Полученные данные хорошо согласовались с динамикой почвенной кислотности в почве опыта. В работе [11] показано, что на протяжении всего периода эксперимента в контрольном варианте наблюдали снижение величины $pH_{КС1}$ и рост величины гидролитической кислотности.

Таким образом, по мере потери оснований из почв, обусловленной выносом растениями и миграцией с просачивающейся влагой атмосферных осадков [14], содержание подвижных форм железа в почве увеличивалось. В контрольном варианте с использованием одних минеральных удобрений на фоне изменений изученного показателя выявлена значимая положительная динамика изменения концентрации железа во времени.

Модель (1.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте 1 без известкования:

$$y_{1,1} = 50.8 + 1.85t, \quad (1.1)$$

где t – время (сроки).

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 1: $v_1 = 1.85$ мг/кг/опыто-год.

Модель (1.1) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (величина статистики $F = 5.4$ при табличной величине $F(0.95, 1, 8) = 5.318$). График модели представлен на рис. 1.

Модель (1.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{1,2} = -13.7 + 126.85t - 88.3t^2 + 28.8t^3 - 4.69t^4 + 0.37t^5 - 0.011t^6. \quad (1.2)$$

Модель (1.2) статистически значима на уровне значимости 21% (F -статистика принимает величину $F = 2.96$ при критической величине $F(0.79, 6, 3) = 2.84$) и хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.85$). График модели представлен на рис. 1.

В варианте опыта 1 отмечена статистически значимая положительная динамика изученного показателя (тенденция к возрастанию показателя в среднем). Средняя скорость нарастания содержания подвижного железа $v_1 = 1.85$ мг/кг/опыто-год.

Известкование ИМ и ДМ в научно обоснованной дозе привело к снижению подвижности железа уже в год мелиорации. По сравнению с содержанием в почве до закладки опыта его концентрация в почве этих вариантов снизилась

соответственно в 1.5 и 1.7 раза. Существенных различий в содержании между вариантами опыта в течение всего периода изучения выявить не удалось. Влияние мелиорации на содержание подвижных форм железа прослеживалось на протяжении всего срока проведения опыта. Несмотря на постепенный рост концентрации железа в почве обоих вариантов, возврата к исходному содержанию в почве до закладки опыта за 10 опыто-лет не произошло.

Модель (2.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте с ИМ:

$$y_{2,1} = 25.14 + 1.245t. \quad (2.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 2: $v_2 = 1.245$ мг/кг/опыто-год.

Модель (2.1) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (F -статистика принимает величину $F = 7.7$ при критической величине $F(0.95, 1, 8) = 5.318$). График модели представлен на рис. 2.

Модель (2.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{2,2} = -89.4 + 231.8t - 156.6t^2 + 48.6t^3 - 7.58t^4 + 0.58t^5 - 0.02t^6. \quad (2.2)$$

Модель (2.2) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (F -статистика принимает величину $F = 12.27$ при критической величине $F(0.95, 6, 3) = 8.94$) и очень хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.96$). График модели представлен на рис. 2.

Таким образом, в варианте опыта 2 присутствует значимая положительная динамика показателя (тенденция к возрастанию показателя в среднем в опыте). Средняя скорость увеличения содержания подвижного железа: $v_2 = 1.245$ мг/кг/опыто-год.

Модель (3.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте с ДМ:

$$y_{3,1} = 21.8 + 1.08t. \quad (3.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 3: $v_3 = 1.08$ мг/кг/опыто-год.

Модель (3.1) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (F -статистика принимает величину $F = 5.38$ при критической величине $F(0.95, 1, 8) = 5.318$). График модели представлен на рис. 3.



Рис. 1. Динамика содержания подвижного железа в варианте без известкования.



Рис. 2. Динамика содержания подвижного железа в варианте, произвесткованном ИМ.



Рис. 3. Динамика содержания подвижного железа в варианте, произвесткованном ДМ.



Рис. 4. Динамика содержания подвижного железа в варианте, произвесткованном фракцией доломита с размером частиц 0.25–1 мм.

Модель (3.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{3,2} = -89.6 + 226.28t - 152.5t^2 + 47.24t^3 - 7.36t^4 + 0.56t^5 - 0.017t^6 \quad (3.2)$$

Модель (3.2) статистически значима на уровне значимости 10% (F -статистика принимает величину $F = 5.43$ при критической величине $F(0.9, 6, 3) = 5.28$) и очень хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.915$). График модели представлен на рис. 3.

Средняя скорость изменения концентрации подвижного железа: $v_3 = 1.08$ мг/кг/опыто-год.

Нейтрализация почвенной кислотности фракцией крошки размером 0.25–1 мм также привела к снижению содержания подвижного железа уже в год известкования. Однако величина концентрации железа в год проведения мелиорации была больше, чем в вариантах с ИМ и ДМ. Максимальное осаждение железа достигнуто к концу 2012 г. Такое его содержание сохранялось до конца 2013 г. Далее наметился рост концентрации изученного показателя. Возврата к исходному содержанию железа в почве до закладки опыта в этом варианте также не установлено.

Модель (4.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте, мелиорируемом отсевом размером 0.25–1 мм.

$$y_{4,1} = 25.96 + 0.4t. \quad (4.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 4: $v_4 = 0.4$ мг/кг/опыто-год.

Модель (4.1) статистически незначима (F -статистика принимает величину $F = 0.379$ при критической величине $F(0.5, 1, 8) = 0.499$). График модели представлен на рис. 4.

Модель (4.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{4,2} = -2.1 + 78.1t - 56t^2 + 17.1t^3 - 2.58t^4 + 0.19t^5 - 0.006t^6. \quad (4.2)$$

Модель (4.2) статистически значима на уровне значимости 29% (F -статистика принимает величину $F = 2.167$ при критической величине $F(0.71, 6, 3) = 2.09$) и хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.81$). График модели представлен на рис. 4.

В варианте опыта с применением фракции доломита размером 0.25–1 мм не выявлена статистически значимая динамика изученного показателя в среднем. Вариант 4 существенно отличался от вариантов 1, 2 и 3. Средняя скорость увеличения содержания железа $v_4 = 0.4$ мг/кг/опыто-год не отличалась значимо от нуля.

Применение в качестве мелиоранта фракции доломита размером 1–3 мм незначительно повлияло на подвижность железа в почве в год мелиорации. Максимальное влияние этой фракции на изученный показатель зафиксировано после 3-го опыто-года. Концентрация составила 28.3 мг/кг массы почвы. В последующие периоды наблюдений изменения концентрации железа происходили в диапазоне от 30.9 до 42.2 мг/кг почвы. Возврат к исходному содержанию железа в почве до закладки опыта зафиксирован в 2016 г. после 1-го укоса тимофеевки.

Модель (5.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте, мелиорируемом фракцией отсева размером 1–3 мм:

$$y_{5,1} = 37.2 - 0.12t, \quad (5.1)$$

t – время (сроки).

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 5: $v_5 = -0.12$ мг/кг/опыто-год.

Модель (5.1) статистически незначима (F -статистика принимает величину $F = 0.048$ при критической величине $F(0.5, 1, 8) = 0.499$). График модели представлен на рис. 5.

Модель (5.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{5,2} = -97.7 + 271.3t - 186.4t^2 + 58.9t^3 - 9.4t^4 + 0.73t^5 - 0.02t^6. \quad (5.2)$$



Рис. 5. Динамика содержания подвижного железа в варианте, известкованном фракцией доломита с размером частиц 1–3 мм.



Рис. 6. Динамика содержания подвижного железа в варианте, известкованном фракцией доломита с размером частиц 3–5 мм.

Модель (5.2) статистически значима на уровне значимости 22% (F -статистика принимает величину $F = 2.788$ при критической величине $F(0.78, 6, 3) = 2.726$) и хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.85$). График модели представлен на рис. 5.

В варианте опыта с известкованием доломитом размером 1–3 мм не выявлена статистически значимая динамика средней величины изученного показателя. Вариант 5 существенно отличался от вариантов 1, 2, 3. Средняя скорость увеличения содержания железа $v_5 = -0.12$ мг/кг/опыто-год не отличалась значимо от нуля. Имело место сходство вариантов 5 и 4.

Минимальное влияние доломита на содержание подвижного железа установлено в варианте с использованием фракции размером 3–5 мм в научно обоснованной дозе. В год известкования снижение концентрации железа составило всего 2 мг/кг почвы. Во всем промежутке времени проведения опыта изменения содержания подвижного железа происходили в диапазоне от 37.8 до 57.4 мг/кг почвы.

Модель (6.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте, мелиорируемом доломитом размером 3–5 мм:

$$y_{6.1} = 46.8 + 0.35t. \quad (6.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 6: $v_6 = 0.35$ мг/кг/опыто-год.

Модель (6.1) статистически незначима. График модели представлен на рис. 6.

Модель (6.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{6.2} = -150.9 + 371.4t - 246.1t^2 + 76.4t^3 - 12.04t^4 + 0.93t^5 - 0.028t^6. \quad (6.2)$$

Модель (6.2) статистически значима на уровне значимости 14% (F -статистика принимает величину $F = 4.098$ при критической величине $F(0.86, 6, 3) = 4.03$) и очень хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.89$). График модели представлен на рис. 6.

В варианте опыта, мелиорируемом доломитом размером 3–5 мм, не выявлена статистически значимая динамика средней величины изученного показателя. Средняя скорость $v_6 = 0.35$ мг/кг/опыто-год не отличалась значимо от нуля. Выявлено сходство вариантов 6, 5 и 4.

В целом влияние доломитовой крошки, внесенной в научно обоснованной дозе, на содержание подвижного железа в почве зависело от размера частиц и определялось скоростью растворения их в почве. Чем меньше был размер частиц и выше скорость взаимодействия их с почвой, тем влияние на рассматриваемый показатель было больше.

Использование смеси мелиорантов в дозе $3H_T$ (вариант 7) привело к резкому (в 2.2 раза) снижению концентрации железа по сравнению с его со-



Рис. 7. Динамика содержания подвижного железа в варианте, произвесткованном смесью фракций доломита в дозе $3H_r$.

держанием до закладки опыта уже в год известкования. В дальнейшем во всем промежутке времени опыта изменение концентрации этого элемента происходило в диапазоне от 10 до 25 мг/кг почвы. Возврата к исходному содержанию железа в почве до закладки опыта не произошло.

Модель (7.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте, мелиорируемом смесью фракций в дозе $3H_r$:

$$y_{7.1} = 19.2 - 0.86t. \quad (7.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 7: $v_7 = -0.86$ мг/кг/опыто-год. Модель (7.1) статистически значима на уровне значимости 8% (F -статистика принимает величину $F = 4.31$ при критической величине $F(0.92, 1, 8) = 4.02$). График модели представлен на рис. 7.

Модель (7.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{7.2} = -57.6 + 148.1t - 95.5t^2 + 28.24t^3 - 4.26t^4 + 0.32t^5 - 0.009t^6. \quad (7.2)$$

Модель (7.2) статистически значима на уровне значимости 15% (F -статистика принимает величину $F = 3.93$ при критической величине $F(0.85, 6, 3) = 3.806$) и очень хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.88$). График модели представлен на рис. 7.

Вариант 7 существенно отличался от вариантов 1–6. В варианте 7 отмечена значимая отрицательная динамика изученного показателя (тен-

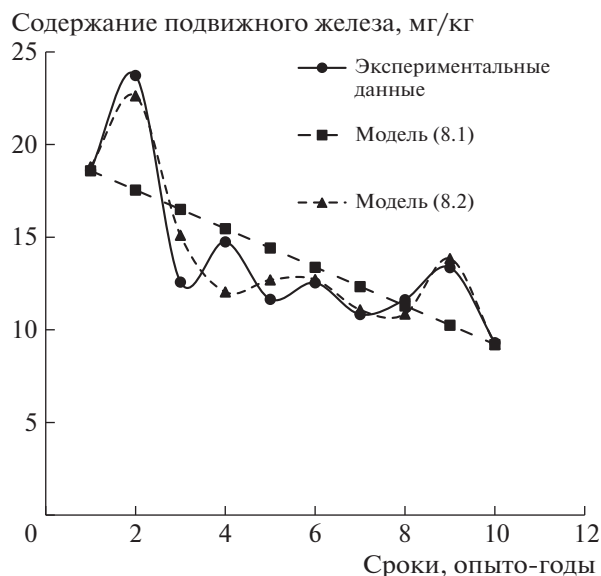


Рис. 8. Динамика содержания подвижного железа в варианте, произвесткованном смесью фракций в дозе $4H_r$.

денция к уменьшению среднего содержания железа в годы эксперимента). Средняя скорость: $v_7 = -0.86$ мг/кг почвы.

Увеличение дозы применения смеси различных по размеру фракций доломита до 4-х и 6-ти полных доз, рассчитанных по гидролитической кислотности, также привело к осаждению подвижного железа в год известкования. Существенных различий содержания этого элемента между вариантами, произвесткованными дозами, соответствующими 3, 4 и 6 H_r , во всем промежутке времени опыта не выявлено.

Модель (8.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в почве, мелиорируемой смесью фракций в дозе $4H_r$:

$$y_{8.1} = 19.63 - 1.04t. \quad (8.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 8: $v_8 = -1.04$ мг/кг/опыто-год.

Модель (8.1) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (F -статистика принимает величину $F = 9.6$ при критической величине $F(0.95, 1, 8) = 5.318$). График модели представлен на рис. 8.

Модель (8.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{8.2} = -47.88 + 129.03t - 83.8t^2 + 24.98t^3 - 3.8t^4 + 0.286t^5 - 0.008t^6. \quad (8.2)$$

Модель (8.2) статистически значима на уровне значимости 13% (F -статистика принимает величину $F = 4.334$ при критической величине $F(0.87, 6, 3) = 4.283$) и очень хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.896$). График модели представлен на рис. 8.

Вариант 8 существенно отличался от вариантов 1–6. В варианте 8 выявлена значимая отрицательная динамика изученного показателя (тенденция к уменьшению средней величины показателя). Средняя скорость: $v_8 = -1.04$ мг/кг/опыто-год. Отмечено сильное сходство вариантов 8 и 7.

Модель (9.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте, мелиорируемом смесью фракций в дозе $6H_r$.

$$y_{9.1} = 18.29 - 1.005t. \quad (9.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 9: $v_9 = -1.005$ мг/кг/опыто-год.

Модель (9.1) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (F -статистика принимает величину $F = 10.8$ при критической величине $F(0.95, 1, 8) = 5.318$). График модели представлен на рис. 9.

Модель (9.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{9.2} = -29.3 + 93.5t - 62.2t^2 + 18.8t^3 - 2.89t^4 + 0.219t^5 - 0.007t^6. \quad (9.2)$$

Модель (9.2) статистически значима на уровне значимости 28% (F -статистика принимает величину $F = 2.178$ при критической величине $F(0.72, 6, 3) = 2.171$) и хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детерминации $R^2 = 0.81$). График модели представлен на рис. 9.

Вариант 9 существенно отличался от вариантов 1–6. В варианте 9 выявлена значимая отрицательная динамика изученного показателя (тенденция к уменьшению средней величины показателя). Средняя скорость: $v_9 = -1.005$ мг/кг/опыто-год. Отмечено сильное сходство вариантов 9, 8 и 7.

Использование в качестве мелиоранта фракции доломита размер 3–5 мм в количестве пяти полных доз H_r привело к снижению содержания подвижного железа в год известкования по сравнению с исходной почвой на 7 мг/кг почвы. К концу 2012 г. его концентрация уменьшилась в 1.9 раза и составила 21.7 мг/кг почвы. Далее изменения в содержании элемента происходили в диапазоне от 27.2 до 21.2 мг/кг. После 2-го укоса тимофеевки в 2016 г. зафиксировано минимальное



Рис. 9. Динамика содержания подвижного железа в варианте, произвесткованном смесью фракций в дозе $6H_r$.

содержание подвижного железа в почве, которое составило 14.2 мг/кг. В данном варианте можно было ожидать дальнейшего влияния известкования на этот показатель в длительном последствии.

Модель (10.1) представляет собой линейный тренд динамики содержания железа в варианте, мелиорируемом фракцией доломита размером 3–5 мм в дозе $5H_r$.

$$y_{10.1} = 34.99 - 1.909t. \quad (10.1)$$

Средняя скорость изменения концентрации железа в варианте 10: $v_{10} = -1.909$ мг/кг/опыто-год.

Модель (10.1) статистически значима на стандартном уровне значимости 5% (F -статистика принимает величину $F = 21.7$ при критической величине $F(0.95, 1, 8) = 5.318$). График модели представлен на рис. 10.

Модель (10.2) представляет собой многочлен 6-й степени:

$$y_{10.2} = -19.79 + 115.1t - 81.65t^2 + 25.76t^3 - 4.08t^4 + 0.32t^5 - 0.0096t^6. \quad (10.2)$$

Модель (10.2) статистически значима на уровне значимости 14% (F -статистика принимает величину $F = 4.22$ при критической величине $F(0.86, 6, 3) = 4.03$) и очень хорошо аппроксимирует данные наблюдений (коэффициент детер-

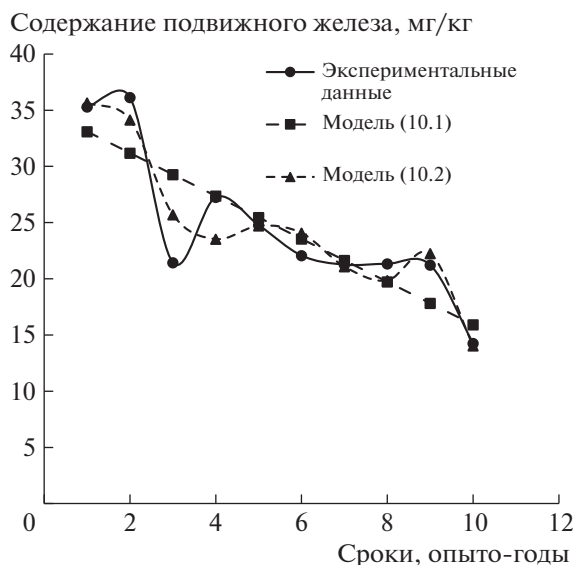


Рис. 10. Динамика содержания подвижного железа в варианте, произвесткованном фракцией доломита с размером частиц 3–5 мм в дозе $5H_T$.

минации $R^2 = 0.89$). График модели представлен на рис. 10.

Вариант 10 существенно отличался от вариантов 1–6. В варианте 10 отмечена значимая отрицательная динамика изученного показателя (тенденция к уменьшению средней величины показателя). Средняя скорость: $v_{10} = -1.909$ мг/кг/опыто-год. Выявлено сильное сходство вариантов 7–10.

По влиянию известкования на динамику содержания подвижного железа в почве все изученные варианты известкования отсевом доломитовой крошки с разным размером частиц можно разделить на 3 группы.

1-я группа включала вариант без известкования и варианты с использованием ДМ и ИМ в научно обоснованных дозах со статистически значимой положительной динамикой изученного показателя (тенденция к возрастанию содержания подвижного железа в среднем во всем промежутке времени исследования).

2-я группа включала варианты с фракциями отсева размером 0.25–1, 1–3 и 3–5 мм со статистически незначимыми изменениями показателя в среднем. Средние скорости изменения содержания подвижного железа не отличались от нуля.

3-я группа включала варианты с использованием смеси мелиорантов в заведомо завышенных дозах и фракции размером 3–5 мм в дозе, соответствующей $5H_T$, со статистически значимой отрицательной динамикой изученного показателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известкование кислой дерново-подзолистой почвы отсевом доломитовой крошки приводило к осаждению подвижных форм железа. Чем мельче был размер частиц и выше доза применения, тем влияние мелиорации на этот показатель было больше. Влияние известкования доломитовыми частицами в научно обоснованной дозе прослежено на протяжении не менее 9–10 опыто-лет. При применении смеси фракций в заведомо завышенных дозах можно ожидать длительного последствия известкования на содержание подвижного железа в мелиорируемой почве, значительно превосходящего срок эксперимента.

Изученные фракции доломита по их влиянию на изменение содержания подвижного железа в почве были разбиты на 3 категории. Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие динамику изученного показателя во всем промежутке времени проведения опыта во всех вариантах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп, 2003. 1027 с.
2. Пестряков В.К. Окультуривание почв Северо-Запада. Л.: Колос, 1977. 344 с.
3. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Теоретические основы известкования почв. СПб., 2005. 252 с.
4. Зонн С.В. Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 207 с.
5. Водяницкий Ю.Н. Химия и минералогия почвенного железа. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 238 с.
6. Савич В.И., Кауричев И.С., Шишов Л.М. Окислительно-восстановительные процессы в почвах, агрономическая оценка и регулирование. Кустанай, 1999. 402 с.
7. Никитин Д.Н., Савич В.И., Балбеков Р.С., Селиванова А.П. Состояние соединений железа и марганца в дерново-подзолистых оглеенных почвах, как фактор, определяющий развитие плодовых культур // Плодородие. 2013. № 4. С. 31–33.
8. Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю. Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // Агрехимия. 2015. № 5. С. 61–68.
9. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Ковлева А.О. Мелиоративные свойства, удобрительная ценность и скорость растворения в почвах различных по размеру фракций отсева доломита, используемого для дорожного строительства // Агрехимия. 2016. № 2. С. 31–41.
10. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Салаев И.В. Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // Агрехимия. 2016. № 12. С. 42–50.
11. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Влияние различных по размеру фракций доломита на показатели почвенной

- кислотности легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2017. № 10. С. 69–79.
12. *Салаев И.В.* Количественные параметры миграции щелочноземельных металлов из мелиорируемой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // *Почва – зеркало ландшафта. Мат-лы Международ. научн. конф. XIX Докучаевские молодежн. чтения, посвящ. 170-летию со дня рожд. В.В. Докучаева. М., 2017. С. 188–189.*
 13. *Буре В.М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: РАСХН, АФИ, СПбГУ, 2007. 141 с.
 14. *Якушев В.П., Буре В.М.* Подходы к обнаружению статистических зависимостей. СПб., 2003. 64 с.
 15. *Литвинович А.В., Небольсина З.П.* Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // *Агрохимия*. 2012. № 10. С. 79–94.

Studying the Dynamics of Mobile Iron Content in Sod-Podzolic Light Loam Soil Ameliorated by Dolomite

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

^a *Agrophysical Research Institute
Grazhdansky Prospect, 14, St. Petersburg 195220, Russia*

^b *Saint Petersburg State Agrarian University
Petersburgskoye shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia*

^c *Saint Petersburg State University
Universitetskaya Embankment, 7–9, St. Petersburg 199034, Russia*

[#] *E-mail: avlavr@rambler.ru*

In a 10-treatment microfield experiment, carried out on a strongly acidic sod-podzolic soil, which was calcified by dolomite with different particle size, the dynamics of mobile (plant-accessible) iron content was traced. It was revealed that liming led to a decrease in the mobility of soil iron. The ameliorant with larger particle size was less effective on the investigated parameter. The studied fractions of dolomite were divided into 3 groups according to their effect on the change in the content of mobile soil iron. In the treatments ameliorated by dolomite fractions of 0.25–1, 1–3, and 3–5 mm in a scientifically substantiated dose, the average rates of change in the content of this element throughout the study period did not significantly differ from zero. In the treatment without liming and the treatments reclaimed by limestone flour (M1) and dolomite flour (DM), a significant positive dynamics of this indicator was observed (tendency to an increase in the average concentration of iron over 10 years of experiment). In the treatments calcified by dolomite in obviously high rates significant negative dynamics of the soil iron content was revealed. Restoring to the initial (prior to the establishment of the trial) content of the studied element in the soil was observed only in the treatments reclaimed by dolomite crumb of 1–3 and 3–5 mm size. The empirical models adequately describing the dynamics of the studied indicator in the soil for all treatments of the experiment were developed.

Key words: mobile iron, sod-podzol light loam soil, land reclamation, dolomite.