

УДК 631.415:631.821:631.6:631.445.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ОТСЕВА ДОЛОМИТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ МЕЛИОРАЦИИ КИСЛЫХ ПОЧВ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОДКИСЛЕНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ (ПО ДАННЫМ ПОЛЕВОГО ОПЫТА)

© 2024 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, А. В. Лаврищев², А. О. Ковлева^{1,2},
Ю. В. Хомяков¹, В. И. Дубовицкая¹, В. М. Буре^{1,3}

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

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

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

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

В длительном 10-вариантном микрополевым опыте, заложенном на среднекислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, проведено сравнительное изучение мелиоративных свойств отсева доломитовой крошки, складываемой в отвалах, без разделения на фракции (ЕСМ), частиц размером 5–7 и 7–10 мм и доломитовой муки (ДМ), приготовленной из отсева доломита при просеивании доломитовой крошки с диаметром отверстий 0/25 мм. Эксперимент продолжается 14 опыто-лет. Выявлено, что частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм являются ценным известковым материалом. Их применение приводит к нейтрализации почвенной кислотности уже в год известкования. Чем выше доза применения, тем мелиоративный эффект больше. Существенных различий влияния гранул размером 5–7 и 7–10 мм, внесенных в эквивалентных дозах, на величину рН не выявлено. Положительное влияние известкования мелиорантом в количестве 3 и 5 доз H_t не заканчивалось спустя 14 опыто-лет после мелиорации и позволило отодвинуть срок проведения повторного (поддерживающего) известкования. Положительный эффект от применения естественной смеси фракций мела (ЕСМ) в научно обоснованной дозе уступал доломитовой муке. Проведена кластеризация отдельных вариантов опыта по их влиянию на величину pH_{KCl} за весь период эксперимента. Разработаны линейные тренды усредненных зависимостей процесса подкисления для частиц мелиоранта различного размера на всем промежутке времени опыта. Рассмотрены механизмы взаимодействия доломитовых частиц с почвой в процессе мелиорации.

Ключевые слова: частицы отсева доломита, мелиорация кислых почв, эмпирические модели, процесса подкисления, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, полевой опыт.

DOI: 10.31857/S0002188124040057, **EDN:** dlwlzu

ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. в лаборатории мелиорации почв АФИ заложен микрополевым опыт, направленный на установление возможности использования крупных частиц отсева доломитовой крошки, складываемой в отвалах, в качестве мелиоранта пролонгированного действия.

Предметом изучения явились частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм, используемые в заведомо завышенных дозах. Теоретической предпосылкой подобного рода исследований являлся известный факт, что при использовании крупных частиц мелиоранта

в высоких дозах и увеличении суммы поверхности их частиц влияние тонины помола нивелируется [1].

В работах [2, 3] доказана возможность растворения доломита крупного размера при компостировании с кислой дерново-подзолистой почвой. Выявлена роль корневых выделений растений пшеницы и ячменя при разложении мелиоранта [4]. Получены данные о влиянии крупных фракций отсева щебеночного производства на общее содержание и водорастворимые формы гумуса [5, 6]. Настоящая статья является продолжением исследований, начатых в работе [7].

Цель работы — в длительном 10-вариантном опыте продолжительностью 14 лет провести сравнительное изучение мелиоративных свойств доломитовой крошки без разделения на фракции, частиц размером 5–7 и 7–10 мм и доломитовой муки, приготовленной из отсева доломита при просеивании смеси фракций через сито с диаметром отверстий 0.25 мм.

В задачи исследований входило: установить динамику величины pH_{KCl} при мелиорации дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы частицами доломитовой крошки; разработать эмпирические модели изменения величины pH_{KCl} в отдельных вариантах опыта; провести кластеризацию вариантов опыта, произвесткованных доломитом, по их влиянию на показатель pH_{KCl} за весь период эксперимента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом настоящего изучения служили частицы доломита размером 5–7, 7–10 мм, естественная смесь фракций и доломитовая мука (<0.25 мм), приготовленная из частиц доломита. На долю фракций размером 5–7 и 7–10 мм в составе отсева приходилось по 11%. Содержание $CaCO_3$ в отсеве — 46.1, $MgCO_3$ — 38.4%.

Для выполнения поставленной цели был заложен 10-вариантный микрополевого опыт в полиэтиленовых сосудах без дна ($S = 1 \text{ м}^2$, глубина — 25 см, масса — 300 кг почвы/сосуд). Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда) была извлечена почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру делянок размещали полиэтиленовую пленку. Внутри полученного таким образом сосуда размещали предварительно произвесткованную и удобренную дерново-подзолистую почву (*umbric albeluvisol abruptic*). На момент закладки опыта почва характеризовалась следующими показателями: pH_{KCl} 4.6, H_T — 4.9 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус — 2.16%, содержание частиц <0.01 мм — 21.4%, повторность опыта четырехкратная. В качестве вариантов сравнения использовали делянки, удобренные одними минеральными удобрениями (фон) и вариант опыта фон + доломитовая мука. Доломитовую муку готовили из отсева доломита, пропуская частицы мелиоранта через сито с отверстиями 0.25 мм.

В опыте возделывали культуры, отзывчивые на известкование и характеризующиеся высокой потребностью в кальции и магнии, как элементах питания. Чередование культур: горох—горчица. В 2015 г. выращивали горох, в 2016–2022 гг. — горчицу и горох. Уборку растений проводили в фазе цветения. Удобрения применяли ежегодно. Перед закладкой опыта вносили 60 г д.в. азофоски ($NPK = 16 : 16 : 16$). На 2–14-е сроки возделывания растений под горох применяли азофоску 30 г/сосуд, под горчицу — 18 г/сосуд. Образцы почв для определения pH_{KCl} отбирали ежегодно после

уборки каждого урожая растений. Математическую обработку данных проводили по [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Величина pH_{KCl} является универсальным почвенным показателем, отражающим разнообразие свойств почв и химические почвенные процессы. Определение pH_{KCl} относится к числу обязательных анализов при изучении агрохимических показателей и совершенно необходимо для суждения о динамике изменения кислотно—основных свойств мелиорируемых почв (табл. 1).

Почва, выбранная для исследования, характеризовалась величиной pH_{KCl} , равной 4.6. Возделывание гороха в варианте без известкования не повлияло на величину почвенной кислотности. Показатель pH_{KCl} спустя год после известкования остался без изменений.

Возрастание почвенной кислотности в варианте с использованием одних минеральных удобрений зафиксировано спустя 2 опыто-года. После уборки горчицы pH_{KCl} снизился до 4.1 ед. и на протяжении последующих 9 опыто-лет оставался в области сильно-кислых величин. На 11-й опыто-год величина pH_{KCl} уменьшилась до 3.8 ед. и в дальнейшем, до 14 опыто-года сохранялась в интервале очень сильно-кислых величин (3.68–3.80 ед. pH). Следовательно, известкованная почва не находилась в равновесии. За период проведения эксперимента она постепенно подкислялась, неуклонно деградируя.

Основными причинами подкисления являются вынос оснований урожаем горчицы и гороха и потери за счет вымывания атмосферными осадками. Согласно литературным данным, ежегодный вынос кальция горохом может достигать 60–80 кг/га, горчицей — 300–500 кг/га в пересчете на $CaCO_3$ [9]. Ежегодные потери с фильтрующейся влагой атмосферных осадков составляют в среднем 400 кг/га.

Модель (1) динамики подкисления почвы за 14 вегетационных периодов в варианте опыта без известкования приведена в табл. 2. Модель статистически значима на высоком уровне значимости.

Использование доломитовой муки в дозе 1 H_T привело к устранению почвенной кислотности уже в год известкования. После уборки гороха величина pH_{KCl} составила 5.7 ед. Далее, до уборки горчицы на 8-й год опыта изменения pH_{KCl} укладывались в интервал величин, близких к нейтральному (5.85–5.55 ед.). Следовательно, в варианте с применением доломитовой муки в научно обоснованной дозе на протяжении 8 опыто-лет мелиоранту удавалось поддерживать величину pH_{KCl} почвы на достигнутом после известкования уровне.

Таблица 1. Динамика рН_{КС} дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы за 14 опыто-лет

Вариант	Годы														Сумма $\bar{S}_i$	Среднее $\bar{S}_i$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1. Контроль NPK (фон)	4.63	4.15	4.15	4.10	4.18	3.83	4.23	4.03	4.10	4.10	3.80	3.68	3.90	3.85	56.70	4.05
2. Фон + доломитовая мука 1 H_r	5.73	5.60	5.73	5.85	5.75	5.58	5.68	5.55	5.38	5.35	4.98	5.00	4.98	4.95	76.08	5.43
3. Фон + отсев щебня 5–7 мм 1 H_r	5.03	4.30	4.53	4.45	4.43	4.30	4.60	4.50	4.60	4.45	4.38	4.25	4.35	4.30	62.45	4.46
4. Фон + отсев щебня 5–7 мм 3 H_r	5.48	4.50	4.95	4.80	4.65	4.90	5.08	5.03	5.08	5.00	4.88	4.88	5.05	4.93	69.18	4.94
5. Фон + отсев щебня 5–7 мм 5 H_r	6.03	4.90	5.50	5.30	5.18	5.48	5.65	5.58	5.75	5.65	5.35	5.50	5.75	5.68	77.28	5.52
6. Фон + отсев щебня 7–10 мм 1 H_r	5.33	4.15	4.48	4.40	4.28	4.38	4.53	4.35	4.33	4.20	4.23	4.18	4.40	4.15	61.35	4.38
7. Фон + отсев щебня 7–10 мм 3 H_r	5.53	4.30	4.70	4.58	4.65	4.78	4.98	4.78	4.80	4.73	4.60	4.68	4.78	4.68	66.53	4.75
8. Фон + отсев щебня 7–10 мм 5 H_r	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.2	5.4	5.3	5.3	5.4	5.1	5.2	5.5	5.4	73.5	5.3
9. Фон + отсев щебня смесь фракций 1 H_r	5.68	5.43	5.13	5.00	4.95	5.08	5.15	4.98	5.05	4.90	4.63	4.68	4.88	4.88	70.38	5.03
10. Фон + отсев щебня естественная смесь фракций 3 H_r	6.3	4.5	6.1	5.9	5.9	6.4	6.2	6.3	6.2	6.2	5.9	5.9	6.1	6.2	83.9	6.0

Таблица 2. Эмпирические модели динамики подкисления дерново-подзолистой почвы

Вариант, №	Эмпирическая модель	<i>p</i> -value	<i>R</i> ²	Значимость модели
1	$y_{1,1} = 4.36 - 0.04 \cdot t$	0.002	0.547	Значима
2	$y_{2,1} = 5.97 - 0.07 \cdot t$	1.12 – 05	0.811	
3	$y_{3,1} = 4.64 - 0.024 \cdot t$	0.06	0.26	
4	$y_{4,1} = 4.93 + 0.002 \cdot t$	0.892	0.0015	Не значима
5	$y_{5,1} = 5.38 + 0.018 \cdot t$	0.34	0.074	
6	$y_{6,1} = 4.66 - 0.038 \cdot t$	0.05	0.283	Значима
7	$y_{7,1} = 4.8 - 0.012 \cdot t$	0.5	0.037	Не значима
8	$y_{8,1} = 5.2 + 0.006 \cdot t$	0.75	0.0087	
9	$y_{9,1} = 5.42 - 0.05 \cdot t$	0.0006	0.637	Значима
10	$y_{10,1} = 5.73 + 0.034 \cdot t$	0.284	0.095	Не значима

На 9–10-й опыто-годы величина pH_{KCl} снизилась до 5.38–5.35 ед. В последующие годы до конца эксперимента pH_{KCl} менялся около величины, соответствующей 5.0 ед. pH . Согласно [10], почва варианта опыта с ДМ начинала нуждаться в повторном известковании.

Об этом же свидетельствовали урожайные данные. Выход зеленой массы растений гречихи спустя 14 опыто-лет эксперимента в варианте с внесением ДМ достоверно не отличался от варианта с применением одних минеральных удобрений (83 и 77 г/сосуд соответственно, неопубликованные данные).

Таким образом, по влиянию тонкоизмельченного доломита (ДМ) на почвенную кислотность можно выделить несколько периодов. Первый период, когда несмотря на начавшийся вынос оснований урожаем и просачивающейся влагой атмосферных осадков, кислотность почвы не повышалась, т.к. одновременно проходили процессы взаимодействия почвы с непрореагировавшими частицами мелиоранта, и количество оснований в почве пополнялось. В условиях проведенного опыта этот период составил 8 опыто-лет. Второй период – нарастающее подкисление почвы за счет выноса оснований растениями и вымывание их влагой за счет атмосферных осадков в нижележащие слои почвенного профиля. Основываясь на экспериментальных данных проведенного исследования, можно говорить о втором периоде нарастающего подкисления почвы, начавшегося после уборки 9-го урожая растений и не заканчивающегося спустя 14 опыто-лет эксперимента.

Эмпирическая модель (2) динамики изменения величины pH_{KCl} в варианте опыта с ДМ статистически значима на очень высоком уровне значимости (табл. 2). В дальнейшем почва варианта с доломитовой мукой без повторного (поддерживающего) известкования вернется к своему исходному состоянию до закладки опыта.

Использование в качестве мелиоранта частиц отсева щебня размером 5–7 мм в дозе, рассчитанной по 1 H_r , привело в год известкования к снижению почвенной кислотности. Величины pH_{KCl} возросли с 4.6 до 5.0 ед. После уборки 2-го урожая растений в год последствий pH_{KCl} снизился до 4.3 ед. Далее, во всем промежутке времени изменения величины pH_{KCl} укладывались в диапазон от 4.60 до 4.25 ед., т.е. были равны, или ниже, чем до закладки опыта.

Следует при этом подчеркнуть, что величина pH_{KCl} в варианте с отсевом доломита размером 5–7 мм, внесенного в дозе 1 H_r , во всем промежутке времени опыта была более высокой, чем в почве не известкованного контроля. Следовательно, фракция отсева доломита размером 5–7 мм, использованная в научно обоснованной дозе, оказывала хотя и слабое, но положительное влияние на величину почвенной кислотности.

Модель (3) динамики подкисления почвы в варианте с применением доломита размером 5–7 мм в дозе 1 H_r статистически значима (табл. 2). В среднем убывание величины pH_{KCl} происходило во всем промежутке времени эксперимента. График модели приведен на рис. 1а.

Увеличение дозы внесения частиц доломита размером 5–7 мм до 3-х полных доз, рассчитанных по величине H_r , привело к усилению мелиоративного эффекта. Спустя год после известкования и уборки урожая гороха величина pH_{KCl} составила 5.48 ед. и несколько уступала варианту с ДМ (pH_{KCl} 5.73). В год последствий показатель pH_{KCl} почвы снизился до 4.5 ед. и далее до конца эксперимента изменялся от 4.65 до 5.08 ед. pH . Возврата к исходной величине pH_{KCl} почвы до закладки опыта не произошло.

Модель (4), описывающая изменение pH_{KCl} в варианте с частицами доломита размером 5–7 мм в дозе 3 H_r в течение 14 опыто-лет, статистически не значима (табл. 2). Статистически значимых изменений pH_{KCl} во всем промежутке времени эксперимента не выявлено. График модели приведен на рис. 1а.

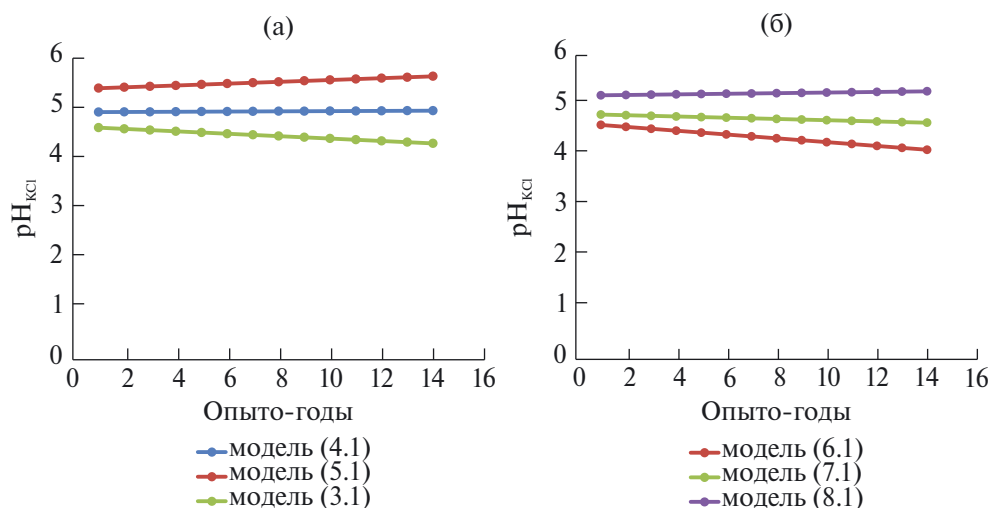


Рис. 1. Эмпирические модели динамики величины рН при использовании возрастающих доз фракций доломита размером: (а) – 5–7, (б) – 7–10 мм.

Следовательно, при применении частиц доломита в количестве, соответствующем $3 H_r$, удалось поддерживать показатель pH_{KCl} в средне-слабокислом интервале.

Максимальный мелиоративный эффект от использования частиц доломита размером 5–7 мм достигнут в варианте с внесением 5-ти полных доз, рассчитанных по H_r . В год известкования зафиксирован максимальный сдвиг pH_{KCl} – 6.03 ед. В год последствия pH_{KCl} снизился до 4.90 ед. рН. Начиная с 3-го года эксперимента и до уборки 14-го урожая растений изменения составили от 5.18 до 5.75 ед. рН. Таким образом, при внесении частиц отсева в дозе $5 H_r$, несмотря на некоторую (и неизбежную) вариабельность данных, мелиоранту удалось поддерживать величину pH_{KCl} на уровне, близком к нейтральному диапазону. Модель (5), описывающая изменение pH_{KCl} в вариантах, мелиорированных частицами доломита размером 5–7 мм в дозе $5 H_r$, статистически не значима. График модели приведен на рис. 1а.

В целом, проведенное исследование показало, что частицы отсева доломита размером 5–7 мм не являются “балластом”. Попадая в почву, они постепенно растворяются, оказывая положительное влияние на почвенную кислотность. Влияние степени измельчения мелиоранта при увеличении дозы применения крупных частиц доломита нивелируется. Чем больше доза внесения, тем мелиоративный эффект сильнее.

Графики моделей, описывающие динамику величины pH_{KCl} в вариантах с применением возрастающих доз доломита размером 5–7 мм нигде не пересекаются (рис. 1а).

Влияние частиц доломитовой крошки размером 7–10 мм на величину рН в год известкования мало отличалось от частиц размером 5–7 мм. Мелиоративный

эффект от применения этих фракций в равных дозах был одинаков. На 2–14-й опытно-годы эксперимента отмечено некоторое (незначительное) преимущество фракций 5–7 мм по сравнению с частицами 7–10 мм. Эмпирические модели (6), (7), (8) динамики изменения величины pH_{KCl} при возрастании дозы применения частиц доломита размером 7–10 мм в дозах 1, 3, $5 H_r$ приведены в табл. 2.

Модель (6), описывающая динамику изменения величины pH_{KCl} в варианте опыта с использованием частиц отсева размером 7–10 мм в дозе $1 H_r$, статистически значима. Происходило значимое изменение величины рН во всем промежутке времени эксперимента. График модели приведен на рис. 1б.

Модели (7) и (8) в вариантах опыта, известкованных повышенными дозами частиц доломита (3 и $5 H_r$), статистически не значимы (табл. 2). Графики моделей, приведенные на рис. 1б, нигде не пересекаются. Эмпирические модели, описывающие динамику величины pH_{KCl} в вариантах опыта с применением в равных дозах (3 и $5 H_r$) частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм обладают несомненным сходством и мало отличаются между собой.

В целом показано, что частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм являются ценным известковым материалом. При применении частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозе $1 H_r$ отмечено постепенное подкисление почвы на всем промежутке эксперимента. Напротив, применение этих же частиц в количестве, превышающем в 3 и 5 раз научно обоснованную дозу, является приемом, позволяющим длительное время поддерживать почвенную кислотность на постоянном уровне. Чем выше доза применения, тем больше мелиоративный эффект на всем интервале изучения.

Следует подчеркнуть, что после уборки 14-го урожая растений в почве известкованных сосудов осталось значительное количество частиц неразложившегося доломита. Следовательно, можно ожидать дальнейшего длительного последствия данных частиц. Таким образом, частицы отсева доломита, размером 5–7 и 7–10 мм, внесенные в почву в заведомо завышенных дозах, можно рассматривать как мелиоранты пролонгированного действия.

Необходимо указать, что динамика изменения величины pH_{KCl} в вариантах, мелиорированных крупными частицами доломита, существенно отличалась от динамики изменения почвенной кислотности в варианте с доломитовой мукой. Это можно объяснить следующим образом. Согласно современным представлениям, взаимодействие известковых материалов с почвой происходит при участии 2-х механизмов: 1 – за счет постепенного перехода оснований в почвенный раствор с последующей реакцией с почвенно-поглощающим комплексом. Этот механизм полностью соответствует растворению в почве ДМ; 2 – за счет контактного обмена поверхности частиц мелиоранта и почвы. В процессе обмена не участвуют внутренние слои гранул [9].

Динамика изменения величины pH_{KCl} в вариантах применения частиц 5–7 и 7–10 мм вне зависимости от дозы внесения носила сходный характер и подчинялась следующей закономерности: резкий рост величины pH спустя один опытно-год после закладки опыта, после уборки 2-го урожая растений величина pH_{KCl} почвы снижалась. Подобная динамика объясняется следующим образом. Находящийся в отвалах доломит подвергался физическому разрушению (шли процессы выветривания поверхности гранул). В процессе выветривания происходило разрушение кристаллизационных структурных связей между молекулами карбонатов. Внешний слой приобретал определенную рыхлость и при попадании в почву быстро растворялся. В год применения крупных частиц наблюдали резкое увеличение величины pH почвы. Далее растворение замедлялось, поскольку расположенные под выветрелым слоем внутренние слои имели более прочное сложение. Разложение проходило по 2-му типу. При этом растения способны поглощать катионы из локальных очагов почвы, прилегающих к поверхности мелиоранта [9].

Использование естественной смеси мелиорантов в дозе, соответствующей 1 H_r , также привело к снижению почвенной кислотности. После уборки первого урожая растений показатель pH_{KCl} не отличался от такового, установленного в варианте с ДМ. В дальнейшем, несмотря на некоторые (незначительные) изменения, величина pH_{KCl} постепенно снижалась и спустя 14 опытно-лет составила 4.88 ед., т.е. укладывалась в среднекислый диапазон и была выше, чем в почве до закладки эксперимента. Мелиоративный эффект

во всем промежутке времени опыта уступал ДМ, примененной в эквивалентной дозе.

Модель (9), описывающая динамику подкисления почвы в варианте, мелиорированном ЕСМ в дозе 1 H_r , статистически значима на высоком уровне значимости. Имеются статистически значимые показатели подкисления почвы во всем промежутке времени опыта (табл. 2).

Увеличение дозы ЕСМ до количества, соответствующего 3 H_r , усилило эффект от применения. На момент завершения эксперимента величина pH_{KCl} соответствовала величине, установленной спустя 1 год после известкования. Модель (10) динамики величины pH в варианте с ЕСМ по 3 H_r приведена в табл. 2. Во всем промежутке наблюдений нет статистически значимого изменения показателя pH .

Таким образом, применение ЕСМ в количестве, превышающем в 3 раза научно обоснованную дозу внесения в течение 14 опытно-лет, позволило поддерживать почвенную кислотность на уровне, близком к нейтральному. Тем не менее, при использовании естественной смеси частиц доломита в качестве известкового материала не следует применять дозы, превышающие количество, рассчитанное по 1 H_r . Это связано с усилением непроизводительных потерь Са и Mg в результате миграции. В работе [11] показано, что элювиальные потери оснований из варианта с применением смеси фракций в дозе 3 H_r превосходили потери оснований при внесении в почву ДМ в научно обоснованной дозе (1 H_r). Следовательно, использование отсева доломита в высоких дозах без разделения на фракции не эффективно.

Одной из задач математической обработки данных опыта являлось проведение кластеризации (группировки отдельных вариантов опыта по величине мелиоративного эффекта, полученного в результате известкования).

Показано, что эмпирические модели (1.1), (6.1), (9.1) в вариантах опыта 1, 6, 9 обладали высокой статистической значимостью. В этих вариантах опыта имелись статистически значимые изменения pH (в среднем происходило уменьшение pH). Выявлено несомненное сходство моделей (1.1), (6.1), (9.1) в вариантах опыта 1, 6, 9. Коэффициенты моделей были близки по своим характеристикам, динамика в этих вариантах опыта очень похожа (происходило статистически значимое подкисление почвы).

Эмпирические модели (2.1), (3.1) в вариантах опыта 2, 3 также обладали высокой статистической значимостью, в вариантах опыта 2, 3 в среднем происходило статистически значимые изменения pH (происходило уменьшение величины pH). Модели (2.1), (3.1) сходны между собой, но при этом отличаются от моделей (1.1), (6.1), (9.1).

Эмпирические модели (4.1), (5.1), (7.1), (8.1), (10.1) обладали несомненным сходством и статистически были незначимы. В вариантах опыта 4, 5, 7, 8, 10 в среднем не было статистически значимых изменений рН на всем промежутке времени наблюдений.

На основе сходства свойств эмпирических моделей можно выделить следующие группы опытов (кластеризация № 1): I группа содержит варианты опытов 1, 6, 9; II группа содержит варианты опытов 2 и 3; III группа содержит варианты опыта 4, 5, 7, 8, 10.

Кластеризация № 2 предусматривает рассмотрение суммы рН в каждом варианте опыта по опытовым годам (табл. 1):

$$S_1 = 56.7; S_2 = 76.075; S_3 = 62.45; S_4 = 69.175;$$

$$S_5 = 77.275; S_6 = 61.35; S_7 = 66.525; S_8 = 73.525;$$

$$S_9 = 70.375; S_{10} = 83.85$$

$$S_1 < S_6 < S_3 < S_7 < S_4 < S_9 < S_8 < S_2 < S_5 < S_{10}.$$

На основе величин сумм рН возможна следующая кластеризация № 2: I группа содержит варианты опыта 1, 3, 6; II группа содержит варианты опыта 4, 7, 9; III группа содержит варианты опыта 2, 5, 8, 10.

Кластеризация № 3 учитывает распределение вариантов опыта в кластеризации № 1 и 2: I группа содержит варианты опыта 1, 6; II группа содержит вариант опыта 3; III группа содержит вариант опыта 9; IV группа содержит варианты опыта 4, 7; V группа содержит вариант опыта 2; VI группа содержит варианты опыта 5, 8, 10.

Исходя из кластеризации № 3, можно сделать вывод о несомненном сходстве вариантов 4 и 7, а также сходстве вариантов опыта 5 и 8.

Проведенная группировка позволяет сделать важный в практическом отношении вывод: мелиоративный эффект, полученный в вариантах опыта, произвесткованных частицами доломита размером 5–7 и 7–10 мм в равных дозах (3 и 5 H_r) практически не отличались друг от друга. Таким образом, разделение этих фракций при использовании для известкования кислых почв не целесообразно.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, в условиях 10-вариантного микрополевого опыта проведены наблюдения за динамикой величины pH_{KCl} в течение 14 опытных лет. Показано, что не известкованная почва не находится в равновесии. За период проведения эксперимента она постепенно подкислялась.
2. Использование доломитовой муки (ДМ), приготовленной из отсева щебня в дозе 1 H_r , привело к устранению почвенной кислотности уже в год известкования. На протяжении 8 опытных лет мелиоранту удалось поддерживать показатель pH_{KCl} почвы на достигнутом в год известкования уровне.

В дальнейшем отмечено постепенное снижение pH_{KCl} . Спустя 10 опытных лет почва начинала нуждаться в поддерживающем известковании.

3. В течение 14 опытных лет эксперимента частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм, внесенные в дозе 1 H_r , оказывали хотя и слабое, но положительное влияние на величину pH_{KCl} . Уменьшение величины рН отмечено в среднем на всем протяжении эксперимента.
4. Рост количества частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм до 3 полных доз, рассчитанных по H_r , привел к усилению мелиоративного эффекта. На протяжении 14 опытных лет мелиорантам удалось поддерживать pH_{KCl} почвы в средне- и слабокислом диапазоне. Статистически значимых изменений величины рН во всем промежутке времени опыта не установлено.
5. При внесении в почву частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозе 5 H_r мелиоративный эффект еще более усиливался. Мелиорантам удалось поддерживать величину рН на уровне, соответствующим слабокислому и близкому к нейтральному диапазону в течение всего периода эксперимента.
6. Внесение в почву частиц отсева доломита размером 5–7 и 7–10 мм в заведомо завышенных дозах можно рассматривать как прием, позволяющий длительное время поддерживать почвенную кислотность на постоянном уровне и отодвигать срок проведения повторного (поддерживающего) известкования.
7. Использование естественной смеси фракций мела (ЕСМ) в дозе, соответствующей 1 H_r , также привело к снижению почвенной кислотности. Мелиоративный эффект во время всего эксперимента уступал ДМ, примененной в эквивалентной дозе. При использовании ЕСМ в дозах, превышающих 1 H_r , непроизводительные потери кальция и магния в результате миграции усиливались.
8. Проведена кластеризация отдельных вариантов опыта по их влиянию на величину pH_{KCl} за весь период эксперимента. Разработаны линейные тренды усредненных зависимостей процесса подкисления для частиц мелиоранта различного размера во всем промежутке времени опыта. Рассмотрены механизмы взаимодействия доломитовых частиц с почвой в процессе мелиорации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79–94.
2. Павлова О.Ю., Берсенева А.О., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Салаев И.В., Буре В.М. Исследования

- ние скорости растворения крупных частиц доломита в кислой дерново-подзолистой супесчаной почве по данным лабораторного опыта // *Агрофизика*. 2020. № 3. С. 23–28.
<https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.03.04>
3. Литвинович А.В., Берсенева А.О., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Процесс разложения крупных частиц доломита в сильнокислой дерново-подзолистой супесчаной почве. Динамика убыли массы доломита на разных стадиях растворения (по данным лабораторного опыта) // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 52–60.
 4. Litvinovich A., Lavrishchev A., Bure V., Kekilbayeva G., Salnikov E. Impact of dolomite rock waste on soil acidity and absorption of Ca and Mg by barley and wheat // *Ciencia e Agrotecnologiathis link is disabled*. 2023. V. 47. e006622.
 5. Салаев И.В., Литвинович А.В., Шевченко Е.Е. Влияние крупных фракций отсева щебеночного производства на содержание гумуса в дерново-подзолистой суглинистой почве, урожай и химический состав растений гороха // *Агрофизика*. 2016. № 3. С. 7–14.
 6. Шевченко Е.Е., Литвинович А.В., Макаренко В.В. Влияние возрастающих доз крупных фракций отсева доломита на общее содержание и водорастворимые формы гумуса мелиорируемой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // *Агрофизика*. 2017. № 4. С. 25–37.
 7. Litvinovich A., Pavlova O., Lavrishchev A., Bure V.M., Salnikov E. Dynamics of soil pH after utilization of by-products of industrial rock processing as a calcareous material in acid soils // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2021. V. 52. № 2. С. 93–101.
 8. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 141 с.
 9. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв. СПб., 2010. 254 с.
 10. Небольсин А.Н. Теоретическое обоснование известкования почв Северо-Запада Нечерноземной зоны РСФСР: Дис. ... д-ра с.-х. наук. СПбГАУ, 1983. 509 с.
 11. Litvinovich A.V., Salaev I.V., Pavlova O. Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M., Salnikov. Utilization of large-sized dolomite by-product particles and losses of cations from acidic soil // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2019. P. 869–877.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1589490>

Effectiveness and Duration of Action of Dolomite Screening Particles Used for Reclamation of Acidic Soils. Empirical Models of the Acidification Process of Sod-Podzolic Light Loamy Soil (according to Field Experience)

V. Litvinovich^{a,b,#}, A. V. Lavrishchev^b, A. O. Kovlev^{a,b}, Yu. V. Khomyakov^a,
V. I. Dubovitskaya^a, V. M. Bure^{a,c}

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

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

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

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

In a long-term 10-variant microfield experiment based on a medium-acidic sod-podzolic light loamy soil, a comparative study of the reclamation properties of the screening of dolomite crumbs stored in dumps, without separation into fractions (SIF), particles of 5–7 and 7–10 mm in size and dolomite flour (DF) prepared from the screening of dolomite when sifting dolomite crumbs with the diameter of the holes is 0/25 mm. The experiment lasts for 14 experimental years. It has been revealed that dolomite particles of 5–7 and 7–10 mm in size are valuable calcareous material. Their use leads to the neutralization of soil acidity already in the year of liming. The higher the dose of application, the greater the reclamation effect. There were no significant differences in the effect of granules of 5–7 and 7–10 mm in size, applied in equivalent doses, on the pH value. The positive effect of liming with meliorant in the amount of 3 and 5 doses of hydrolytic acidity (Ah) did not end after 14 experimental years after reclamation and allowed to postpone the period of repeated (maintenance) liming. The positive effect of using a natural mixture of chalk fractions (SIF) in a scientifically justified dose was inferior to dolomite flour. Clustering of individual variants of the experiment was carried out according to their effect on the pH_{KCl} value for the entire period of the experiment. Linear trends of the averaged dependencies of the acidification process for meliorant particles of various sizes over the entire period of the experiment have been developed. The mechanisms of interaction of dolomite particles with soil in the process of land reclamation are considered.

Keywords: dolomite sifting particles, acidic soil reclamation, empirical models, acidification process, sod-podzolic light loamy soil, field experience.