

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ ДОЛОМИТА В КИСЛОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ОПЫТА

О. Ю. Павлова¹, А. О. Берсенева², А. В. Литвинович¹, А. В. Лаврищев², И. В. Салаев¹, В. М. Буре^{1,3}

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14;

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
196601, Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pou1953@rambler.ru

Поступила в редакцию 17 августа 2020 г., принята к печати 26 августа 2020 г.

В условиях лабораторного опыта установлена динамика изменения (убыли) массы крупных частиц доломита различной степени выветрелости. В процессе длительного компостирования крупных частиц доломита с кислой дерново-подзолистой супесчаной почвой выявлено, что убыль массы гранул доломита зависит от времени их нахождения в почве и периода складирования в отвалах. За 61 день компостирования чётких закономерностей, свидетельствующих о влиянии времени нахождения доломита в отвалах на скорость его растворения в почве, не обнаружено. Спустя 61 день после внесения доломита в почву величина убыли массы частиц колебалась от 4,1 до 8,2% от первоначальной. Спустя 114 дней после начала компостирования величина убыли массы доломитовых частиц, находящихся в отвалах длительное время, колебалась от 32,8 до 34,2% от исходной. При растворении в почве частиц доломита, складываемых в отвалах на протяжении меньшего количества времени, данная величина колебалась от 8,7 до 14,5% от исходной массы. В работе рассмотрены механизмы выветривания (разложения) доломитовой крошки в почве. Перечислены факторы, увеличивающие скорость разложения доломита. Разработаны линейные эмпирические модели скорости растворения доломита в почве. Проведена кластеризация разработанных моделей по абсолютным значениям скорости убывания массы частиц в сосудах. Сделан вывод, что при определении дозы применения крупных частиц доломита для мелиорации кислых почв и продолжительности их действия следует учитывать время нахождения доломита в отвалах.

Ключевые слова: доломит, скорость растворения, почва, эмпирические модели, химическая мелиорация.

INVESTIGATION OF LARGE DOLOMITE PARTICLES DISSOLUTION RATE IN ACIDIC SOD-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL ACCORDING TO LABORATORY EXPERIMENT

O. Yu. Pavlova¹, A. O. Berseneva², A. V. Litvinovich¹, A. V. Lavrishchev², I. V. Salaev¹, V. M. Bure^{1,3}

¹Agrophysical research Institute;

²Saint Petersburg state agrarian University⁴

³Saint Petersburg state University

E-mail: pou1953@rambler.ru

The dynamics of mass decrease of large dolomite particles of various weathering degree has been studied in a laboratory experiment. In the process of long-term composting of large dolomite particles with acidic sod-podzolic sandy loam soil it was shown that the decrease in the mass of dolomite granules depended on the composting time and the period of storage in dumps. The research results have shown that for 61 day of composting there were no clear patterns indicating the influence of the dump storage period on the speed of the material dissolution in the soil. It was found that after 61 day of dolomite composting in the soil, the loss of particle mass ranged from 4.1 to 8.2% of the original. After 114 days of composting, the mass loss of dolomite particles, that were stored in dumps for a long time, ranged from 32.8 to 34.2%. When dolomite particles were stored in dumps for a shorter period of time, the mass loss ranged from 8.7 to 14.5% of the initial mass. The paper considers the mechanisms of weathering (decomposition) of dolomite crumbs in the soil. Factors that increase the rate of decomposition of dolomite are listed. Linear empirical models of the dolomite dissolution rate in the soil have been developed. Clusterization of the developed models based on the absolute values of the particles decreasing mass rates in a laboratory experiment was carried out. It was concluded that when determining the rate of large dolomite particles for reclamation of acidic soils and the duration of their effectiveness in the soils, the time of dolomite storage in dumps should be taken into account.

Keywords: dolomite, dissolution rate, soil, empirical models, chemical melioration.

ВВЕДЕНИЕ

При производстве из карбонатных пород щебня, используемого для дорожного строительства, в отвалы отсеиваются частицы доломита размером менее 10 мм. В настоящее время на территории Ленинградской области складывается около 70 млн. тонн отсева доломита.

С 2011 г. в лаборатории мелиорации почв АФИ проводится изучение мелиоративных свойств и удобрительной ценности доломитовой крошки, складываемой в отвалах (Литвинович и др., 2016, 2017, 2018а, 2018б, 2019; Салаев и др., 2018). Выявлена высокая эффективность частиц доломита различных размеров при их использовании для известкования кислых почв. Так, в длительном полевом опыте установлено, что эффект от применения частиц доломита размером 3–5 мм в количестве, соответствующем 5-ти полным дозам, рассчитанным по гидролитической кислотности, не уступал эффекту от использования доломитовой муки, внесённой в научно обоснованной дозе (Литвинович и др., 2016).

При попадании карбонатных пород в почву они постепенно растворяются в результате контактного обмена поверхности частиц с почвой. При лабораторном моделировании процессов разложения известняков и доломитов в почве установлено, что на первом этапе происходит разрушение структурных связей за счёт растворения в первую очередь кристолитического карбонатного вещества, находящегося между кристаллами карбонатов (Макеичева, 1991; Anter, 1984; Гагарина, 1968). Процесс растворения не затрагивает внутренних слоёв гранул. В результате выветривания увеличивается пористость крупных частиц карбонатов, уменьшается их размер и плотность, возрастает шероховатость поверхности. Это увеличивает доступ агрессивных растворов к карбонатам внутренних слоёв и ускоряет их растворение. В конечном счёте выветривание доломита приводит к образованию доломитовой муки, представляющей собой рыхлые скопления кристаллов доломита, появившиеся на месте растворения карбонатного цемента (Ярг, 1974).

Основными агентами абиотического разрушения карбонатных пород являются вода, тепловая энергия солнца и углекислота. Важными биотическими факторами процесса растворения карбонатов являются корневые выделения растений

(Литвинович и др., 2015), бактериальная микрофлора (Аристовская, 1980; Звягинцев с соавт., 2005; Maurice, 2000, 2001а, 2001б), продукты метаболизма микрофлоры (Ehrlich, 2002; Paris et al., 1996; Wallander et al., 1999; Wang et al., 2016), а также органические кислоты, образующиеся при разложении органических остатков (Пономарёва, 1964; Соколова и др., 1973; Kodama et al., 1983; Schnitzer et al., 1976).

Несмотря на то, что в условиях Северо-Запада карбонатные породы являются самыми неустойчивыми компонентами в профиле почв, вопрос о скорости растворения крупных частиц доломита остаётся до конца невыясненным. Так, в упомянутом выше исследовании (Литвинович и др., 2016) спустя 6 опыто-лет визуально установлено наличие в почве неразложившихся частиц доломита. Это позволяет предположить, что используемый для мелиорации доломит обладает длительным последствием.

В процессе нахождения в отвалах частицы отсева доломита также подвергаются выветриванию. Интенсивность выветривания будет зависеть от времени и места нахождения частиц в отвалах, их размера, скорости фильтрации просачивающейся влаги, степени её агрессивности, температурного режима. Очевидно, что при попадании в почву доломитовых частиц разной степени выветрелости (разрушения) скорость их растворения будет различной.

Задачи исследования:

– в условиях лабораторного опыта установить динамику изменения (убыли) массы крупных частиц доломита разной степени выветрелости;

– разработать эмпирические модели скорости растворения доломитовых частиц в процессе их взаимодействия с почвой;

– провести кластеризацию разработанных моделей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований являлись кислая дерново-подзолистая супесчаная почва и крупные частицы доломита, находившиеся в отвалах на протяжении разного количества лет.

Физико-химическая характеристика почвы: pH_{KCl} – 3,7; Hg – 11,75 ммоль(экв) 100 г^{-1} почвы; гумус – 3,02%; содержание частиц менее 0,01 мм – 18,6%. Валовой химический состав почвы представлен в табл. 1.

Таблица 1. Валовой химический состав почвы, %

Потеря при прокаливании	SiO ₂	R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Σ
6,15	81,09	9,28	1,19	7,97	0,44	0,47	0,11	0,51	99,43

Частицы доломитовой крошки отбирались из отвалов, сформированных в разные годы эксплуатации карьера. Образцы № 4 и № 73 отобраны из отвала, складированного на территории не менее 10–15 лет, образцы №№ 48, 66 и 92 – непосредственно после добычи доломита и при его помещении в отвалы.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. В стеклянные стаканы насыпалось 200 г воздушно-сухой почвы, предварительно пропущенной сквозь сито с ячейками (1 мм). В каждый стакан помещалась гранула сухого доломита строго определённой массы (~3 г). Почва увлажнялась до величины, соответствующей 60% от полной полевой влагоёмкости. Компостирование проводилось в термостате при температуре 24°C. Сосуды ежедневно взвешивались, при этом проводилось добавление воды для компенсации испарившейся влаги. Одновременно почва тщательно перемешивалась.

Величина убыли массы частиц доломита определялась спустя 22, 61, 81 и 114 суток после закладки опыта. Для этого доломит извлекался из почвы, после чего кисточкой удалялась налипшая на поверхность частицы почва. Перед взвешиванием гранулы доломита высушивались. Затем доломит вновь помещался в почву, и проводилось дальнейшее компостирование.

Полученные результаты использовались для построения моделей (Буре, 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что процесс растворения доломита протекал во всех сосудах. За 61 день компостирования чётких закономерностей, свидетельствующих о влиянии времени нахождения доломита в отвалах на скорость его растворения в почве, не было установлено. Спустя 61 день после внесения доломита в почву величина убыли массы колебалась от 4,1 до 8,2% от первоначальной.

По мере проведения эксперимента процесс разложения доломита в почве продолжился. Чем более продолжительным было время взаимодействия мелиоранта с почвой, тем более заметной являлась убыль массы частиц. Влияние степени выветрелости доломита (времени его нахождения в отвалах до помещения в почву) на данный показатель наиболее отчётливо проявилось на 114-й день компостирования. Величина убыли массы частиц доломита, находящегося в отвалах более длительное время (сосуды № 4 и № 73), колебалась от 32,8 до 34,2% от исходной массы. В остальных сосудах данная величина не превышала 15%.

Эмпирические модели убыли массы частиц доломита и скорости его растворения в почве на всём промежутке изучения представлены в табл. 3. Эмпирические модели статистически значимы на очень высоком уровне значимости. Коэффициент детерминации (R^2) колеблется от 0,88 до 0,99 ед.

Таблица 2. Убыль массы частиц доломитовой крошки (г) в процессе компостирования с почвой

№ сосуда	Срок компостирования, сутки				
	0	22	61	81	114
4	3,13	3,13 (0)	3,00 (4,2)	2,78 (11,2)	2,06 (34,2)
48	3,11	3,08 (1,0)	2,98 (4,1)	2,90 (6,8)	2,84 (8,7)
66	3,06	3,06 (0)	2,88 (5,9)	2,77 (9,5)	2,70 (11,8)
73	2,95	2,95 (0)	2,72 (7,8)	2,52 (14,6)	1,98 (32,8)
92	3,05	3,02 (1,0)	2,80 (8,2)	2,71 (11,2)	2,61 (14,5)

Примечание: В скобках указана относительная величина убыли массы частиц в % от первоначальной массы

Таблица 3. Эмпирические модели убыли массы частиц доломита при компостировании

№ сосуда	Модель	Коэффициент детерминации	Скорость растворения
4	$y_4 = 3,3 - 0,0087 t$	$R^2 = 0,88$	$v = - 0,0087$
48	$y_{48} = 3,1 - 0,0025 t$	$R^2 = 0,99$	$v = - 0,0025$
66	$y_{66} = 3,09 - 0,0035 t$	$R^2 = 0,97$	$v = - 0,0035$
73	$y_{73} = 3,08 - 0,0083 t$	$R^2 = 0,93$	$v = - 0,0083$
92	$y_{92} = 3,07 - 0,0042 t$	$R^2 = 0,99$	$v = - 0,0042$

Примечание: t – время взаимодействия мелиоранта с почвой.

На рисунке представлены линейные тренды убывания массы частиц в отдельных вариантах опыта.

Таким образом, скорость растворения доломитовых частиц в почве будет зависеть от времени их нахождения в отвалах. Чем больше данный период, тем меньше времени потребуется для растворения и тем быстрее будет достигнут эффект от известкования.

Очевидно, что при определении дозы применения крупных фракций доломитовой крошки для известкования следует учитывать время нахождения отсева в отвалах. Продолжительность мелиоративного воздействия доломитовых частиц разной степени выветрелости на почву необходимо устанавливать в специальных опытах.

Учитывая средние величины абсолютных значений скорости убывания массы частиц доломита в вариантах опыта и вид линейных трендов (наклон трендов), можно предложить следующую кластеризацию вариантов.

В группу 1 можно объединить сосуды № 4 и № 73. Абсолютные значения скорости убывания в указанных вариантах значительно выше, чем в остальных.

В группу 2 можно объединить сосуды № 48, № 66 и № 92, поскольку абсолютные значения скорости убывания массы частиц в данных вариантах незначительно отличаются друг от друга и весьма существенно отличаются от абсолютных величин скорости убывания в вариантах из группы 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях лабораторного опыта скорость растворения крупных доломитовых частиц зависела от времени их компостирования с кислой дерново-подзолистой почвой и периода складирования в отвалах. За 114 дней эксперимента величина убыли массы частиц доломита, находящегося в отвалах непродолжительное время, колебалась от 8,7 до 14,5% от исходной массы. Величина убыли массы частиц доломита, складываемого в отвалах длительное время, колебалась от 32,8 до 34,2%.

Разработаны линейные эмпирические модели скорости растворения доломитовой крошки в почве. Проведена кластеризация моделей. Сделан вывод, что при определении дозы применения крупных частиц доломита для известкования следует учитывать время его складирования в отвалах.

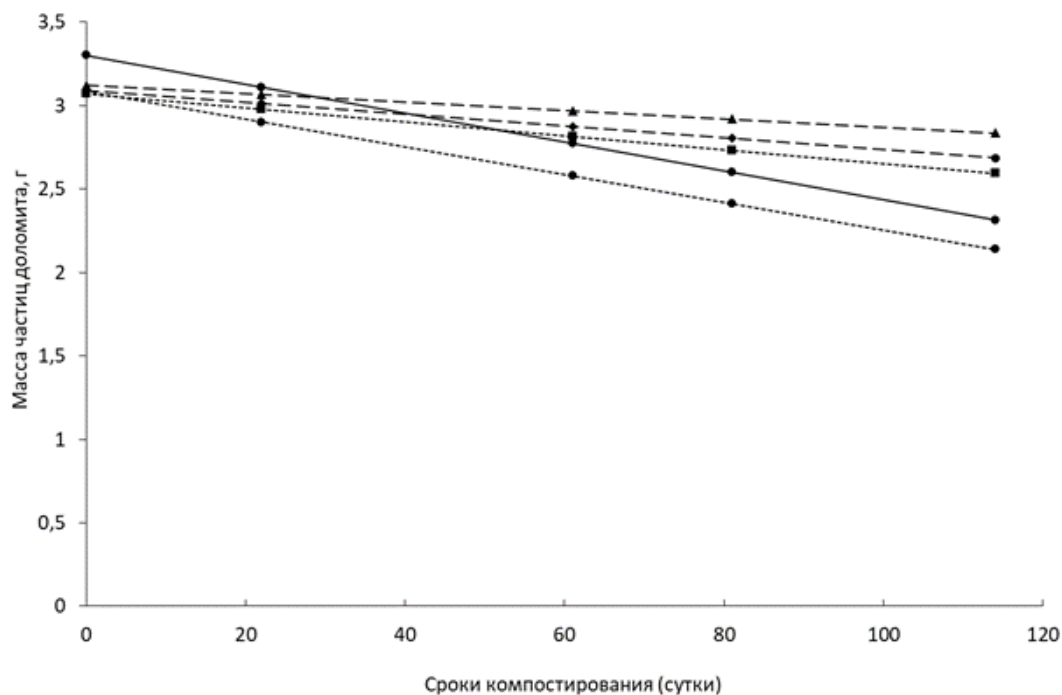


Рис. Линейные тренды убывания массы частиц в вариантах опыта

Список литературы

- Аристовская Т. В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
- Гагарина Э.И. Опыт изучения выветривания обломков карбонатных пород в почве // Почвоведение. 1968. № 9. С. 117–126.
- Звягинцев Д. Г., Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. М.: Издательство Моск. ун-та, 2005. 445 с.
- Литвинович А. В., Ковлева А. О., Павлова О. Ю. Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // Агрохимия. 2015. № 5. С. 61–68.
- Литвинович А. В., Лаврищев А. В., Буре В. М., Павлова О. Ю., Ковлева А. О., Хомяков Ю. В. Динамика содержания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита // Агрохимия. 2018. № 8. С. 52–63.
- Литвинович А. В., Лаврищев А. В., Буре В. М., Павлова О. Ю., Ковлева А. О. Динамика содержания обменных катионов кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита (эмпирические модели процесса подкисления) // Агрохимия. 2018. № 3. С. 50–61.
- Литвинович А. В., Лаврищев А. В., Буре В. М., Павлова О. Ю., Ковлева А. О. Изучение динамики изменения содержания подвижного железа в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой доломитом // Агрохимия. 2019. № 3. С. 44–53.
- 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. № 12. С. 27–37.
- 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 // Агрохимия. 2016. № 2. С. 31–41.
- Макеичева М. А. Формирование состава и свойств карбонатных пород в процессе выветривания. М., 1991. 156 с.
- Пономарева В. В. Теория подзолообразовательного процесса (биохимические аспекты). Л.: Изд-во АН СССР, Ленингр. отд., 1964. 380 с.
- Салаев И.В., Литвинович А.В. Интенсивность миграции кальция и магния из дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, мелиорируемой крупными фракциями отсева щебёночного производства // Агрофизика. 2018. № 2. С. 22–28.
- Соколова Е. И., Нужденковская Т. С. О процессах разложения минералов и выносе алюминия гумусовыми кислотами // Кора выветривания. 1973. Вып. 12. С. 233–253.
- Ярг Л. А. Инженерно-геологическое изучение процесса выветривания. М.: Недра, 1974.
- Anter T. Chemical and biological approach towards the definition of calcareous soils. 3 Movement and distribution of 59-Fe as related to the presence of CaCO_3 // Egypt. J. Soil Sci., 1984, v. 24, no. 2, pp. 625–630.
- Ehrlich H.L. Geomicrobiology. Marcel Dekker Inc. New York. Basel. 2002. 768 p.
- Kodama H., Schnitzer M., Jaakkimainen M. Chlorite and bitite weathering by fulvic acid solutions in closed and open systems // Canadian J. Soil Science., 1983, v. 63, no. 3, pp. 619–629.
- Maurice P. A., Lee Y. J., Hersman L. E. Dissolution of Al-substituted goethites by an aerobic *Pseudomonas mendocina* var. bacteria // Geochim. Cosmochim. Acta., 2000, v. 64, pp. 1363–1374.
- Maurice P. A., Viercorn M. A., Hersman L. E., Fulghum J. E. Dissolution of well and poorly ordered kaolinites by an aerobic bacterium // Chemical Geology, 2001, v. 180, pp. 81–93.
- Maurice P. A., Vierkorn M. A., Hersman L. E., Fulghum J. E., Ferryman A. Enhancement of kaolinitedissolution by an aerobic *Pseudomonas mendocina* bacteria // Geomicrobiology, 2001, no. 18, pp. 21–35.
- Paris F., Botton B., Lapeyrie F. In vitro weathering of phlogopite by ectomycorrhizal fungi II. Effect of K^+ and Mg^{2+} deficiency and N sources on accumulation of oxalate and H^+ // Plant and Soil, 1996, v. 179, pp. 141–150.
- Schnitzer M., Kodama H. The dissolution of micas by fulvic acid // Geoderma, 1976, v. 15, pp. 381–391.
- Wallander H., Wickman T. Biotite and microcline as potassium sources in ectomycorrhizal and non-mycorrhizal Pinus sylvestris seedlings // Mycorrhiza, 1999, v. 9, pp. 25–32.
- Wang W., Sun J., Dong C., Lian B. Biotite weathering by *Aspergillus niger* and its potential utilization // J. Soils Sediments, 2016, v. 16, pp. 1901–1910.

References

- Aristovskaya T. V. *Mikrobiologiya processov pochvoobrazovaniya* [Microbiology of the processes of soil formation]. Leningrad: Nauka, 1980, 187 p.
- Gagarina E. I. Opyt izucheniya vyvetrivaniya oblomkov karbonatnykh porod v pochve [Experience of studying weathering of fragments of carbonate rocks in the soil] // *Pochvovedeniye*, 1968, no. 9, pp. 117–126.
- Zvyagintsev D. G., Bab'yeva I. P., Zenova G. M. *Biologiya pochv* [Soil biology]. Moscow: Moscow University publishing house, 2005. 445 p.
- Litvinovich A. V., Kovleva A. O., Pavlova O. Yu. Vliyaniye izvestkovaniya na nakopleniye margantsa i zheleza rasteniyami yarovoy pshenitsy [Influence of liming on the accumulation of manganese and iron by spring wheat plants] // *Agrokhimiya*, 2015, no. 5, pp. 61–68.

- Litvinovich A. V., Lavrishchev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Yu., Kovleva A. O., Homyakov Yu. V. Dinamika sodержaniya podvizhnogo margantsa v dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochve, melioriruyemoy razlichnymi po razmeru fraktsiyami dolomita [Dynamics of mobile manganese content in sod-podzolic light loam soil reclaimed by dolomite of various size fractions] // *Agrokimiya*, 2018, no. 8, pp. 52–63.
- Litvinovich A. V., Lavrishchev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Yu., Kovleva A. O. Dinamika sodержaniya obmennyykh kationov kal'tsiya i magniya v dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochve, melioriruyemoy razlichnymi po razmeru fraktsiyami dolomita (empiricheskiye modeli protsessy podkislaniya) [Dynamics of the content of exchange cations of calcium and magnesium in sod-podzolic light-loam soil reclaimed by dolomite of various size fractions (empirical models of the acidification process)] // *Agrokimiya*, 2018, no. 3, pp. 50–61.
- Litvinovich A. V., Lavrishchev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Yu., Kovleva A. O. Izucheniye dinamiki izmeneniya sodержaniya podvizhnogo zheleza v dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochve, melioriruyemoy dolomitom [Studying the dynamics of changes in the content of mobile iron in sod-podzolic light loam soil reclaimed by dolomite] // *Agrokimiya*, 2019, no. 3, pp. 44–53.
- Litvinovich A. V., Lavrishchev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Yu., Kovleva A. O. Vliyaniye razlichnykh po razmeru fraktsiy dolomita na pokazateli pochvennoy kislotnosti legkosuglinistoy dernovo-podzolistoy pochvy (empiricheskiye modeli protsessy podkislaniya) [Influence of different size fractions of dolomite on the indicators of soil acidity of light-loam sod-podzolic soil (empirical models of the acidification process)] // *Agrokimiya*, 2017, no. 12, pp. 27–37.
- Litvinovich A. V., Pavlova O. Yu., Lavrishchev A. V., Bure V. M., Kovleva A. O. Meliorativnyye svoystva, udobritel'naya tsennost' i skorost' rastvoreniya v pochvakh razlichnykh po razmeru fraktsiy otseva dolomita, ispol'zuyemogo dlya dorozhnogo stroitel'stva [Meliorative properties, fertilizing value and rate of dissolution in soils of dolomite dropout of different size fractions used for road construction] // *Agrokimiya*, 2016, no. 2, pp. 31–41.
- Makeicheva M. A. *Formirovaniye sostava i svoystv karbonatnykh porod v protsesse vyvetrivaniya* [Formation of the composition and properties of carbonate rocks in the process of weathering]. Moscow, 1991.
- Ponomareva V. V. *Teoriya podzoloobrazovatel'nogo protsessy (biokhimicheskkiye aspekty)* [Theory of podzol-forming process (biochemical aspects)]. Leningrad: USSR Academy of Sciences publishing house, Leningrad branch, 1964. 380 p.
- Salayev I. V., Litvinovich A. V. Intensivnost' migratsii kal'tsiya i magniya iz dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochvy, melioriruyemoy krupnymi fraktsiyami otseva shchebyonoch'nogo proizvodstva [Intensity of migration of calcium and magnesium from sod-podzolic light-loam soil reclaimed by large fractions of crushed stone of production dropout] // *Agrofizika*, 2018, no. 2, pp. 22–28.
- Sokolova E. I., Nuzhdenovskaya T. S. O protsessakh razlozheniya mineralov i vynose alyuminiya gumusovymi kislotami [About process of minerals decomposition and removal of aluminum by humic acids] // *Kora vyvetrivaniya*, 1973, vyp. 12, pp. 233–253.
- Yarg L. A. *Inzhenerno-geologicheskoye izucheniye protsessy vyvetrivaniya* [Engineering-geological study of the weathering process]. Moscow: Nedra, 1974.
- Anter T. Chemical and biological approach towards the definition of calcareous soils. 3 Movement and distribution of 59-Fe as related to the presence of CaCO₃ // *Egypt. J. Soil Sci.*, 1984, v. 24, no. 2, pp. 625–630.
- Ehrlich H.L. *Geomicrobiology*. Marcel Dekker Inc. New York. Basel. 2002. 768 p.
- Kodama H., Schnitzer M., Jaakkimainen M. Chlorite and bitite weathering by fulvic acid solutions in closed and open systems // *Canadian J. Soil Science.*, 1983, v. 63, no. 3, pp. 619–629.
- Maurice P. A., Lee Y. J., Hersman L. E. Dissolution of Al-substituted goethites by an aerobic *Pseudomonas mendocina* var. bacteria // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 2000, v. 64, pp. 1363–1374.
- Maurice P. A., Viercorn M. A., Hersman L. E., Fulghum J. E. Dissolution of well and poorly ordered kaolinites by an aerobic bacterium // *Chemical Geology*, 2001, v. 180, pp. 81–93.
- Maurice P. A., Viercorn M. A., Hersman L. E., Fulghum J. E., Ferryman A. Enhancement of kaolinitedissolution by an aerobic *Pseudomonas mendocina* bacteria // *Geomicrobiology*, 2001, no. 18, pp. 21–35.
- Paris F., Botton B., Lapeyrie F. In vitro weathering of phlogopite by ectomycorrhizal fungi II. Effect of K⁺ and Mg²⁺ deficiency and N sources on accumulation of oxalate and H⁺ // *Plant and Soil*, 1996, v. 179, pp. 141–150.
- Schnitzer M., Kodama H. The dissolution of mica by fulvic acid // *Geoderma*, 1976, v. 15, pp. 381–391.
- Wallander H., Wickman T. Biotite and microcline potassium sources in ectomycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings // *Mycorrhiza*, 1999, v. 9, pp. 25–32.
- Wang W., Sun J., Dong C., Lian B. Biotite weathering by *Aspergillus niger* and its potential utilization // *J. Soils Sediments*, 2016, v. 16, pp. 1901–1910.