

- Osipov A. I. Nauchnye osnovy himicheskoy melioracii pochv i perspektivy ih dalnejshego izucheniya [Scientific bases of chemical melioration of soils and prospect of their further studying] // *Agrofizika*, 2012, no. 3(7), pp. 41–50.
- Panova G. G., Anikina L. M., Kanash E. V., Udalova O. R., Shibanov D. V. Kremnijsoderzhashie helatnye mikroudobreniya v povyshenii ustojchivosti rastenij k dejstviyu stressovyh faktorov [Siliceous helatny microfertilizers in increase in resistance of plants to action of stressful factors] // *Agrofizika*, 2012, no. 3(7), pp. 31–41.
- Salaev I. V., Litvinovich A. V. Intensivnost migracii kalciya i magniya iz dernovo-podzolistoj legkosuglinistoj pochvy, melioriruemoj krupnymi frakciyami otseva shebenochnogo proizvodstva [Intensity of migration of calcium and magnesium from the cespitose and podsolic sandy loam soil reclaimed by large fractions of elimination of crushed-stone production] // *Agrofizika*, 2018, no. 2, pp. 22–28.
- Sokolov V. N. Glinistye porody i ih svoystva [Clay breeds and their properties] // *Sorosovskij obrazovatelnyj zhurnal*, 2000, v. 6, no. 9, pp. 59–65.
- Sokolova T. A., Tolpeshta I. I., Trofimov S. Ya. *Pochvennaya kislotnost. Kislотно-osnovnaya bufernost pochv. Soedineniya alyuminiya v tverdoj faze pochvy i v pochvennom rastvore* [Soil acidity. Acid and main buffer action of soils. Compounds of aluminum in a firm phase of the soil and in soil solution]. Tula: Grif i K, 2012. 124 p.
- Ushakov R. N., Golovina N. A. Agrohimicheskaya model agroseroj pochvy [Agrochemical model of the agrogrey soil] // *Izvestiya TSHA*, 2018, no. 1, pp. 36–47.
- Habirov I. K., Gabbasova I. M., Haziev F. H. *Ustojchivost pochvennyh processov* [Stability of soil processes]. Ufa: Publishing house BGU, 2001. 326 p.
- Didur O., Loza I., Kulbachko Y., Pakhomov O., Kryuchkova A. Environmental impact of earthworm (Lumbricidae) excretory activity on pH-buffering capacity of remediated soil // *Вісник Львівського університету, Серія біологічна*, 2013, no. 62, С. 140–145.
- Skiba M., Szczerba M., Skiba S., Bish D. L., Grybos M. The nature of interlayering in clays from a podzol (Spodosol) from the Tatra Mountains, Poland // *Geoderma*, 2011, v. 160, no. 3–4, pp. 425–433.
- Zusset M., Schindler P. W. The proton promoted dissolution kinetics of K-montmorillonite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, v. 60, no. 6, pp. 921–931.

УДК 631.43

DOI: 10.25695/AGRPH.2019.01.03

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ (UMBRIC ALBELUVISOLS ABRUPTIC) ПРИ ИЗВЕШТКОВАНИИ КРУПНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ДОЛОМИТОВОЙ КРОШКИ

Т. Л. Лешко¹, А. В. Литвинович², П. С. Манаков², А. О. Тябин¹

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»
196601, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское ш., д. 2;

² ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

E-mail: dorados@inbox.ru

Поступила в редакцию 18 декабря 2018 г., принята к печати 26 февраля 2019 г.

В 10-вариантном микрополевом опыте продолжительностью 4 опытно-года проведено изучение влияния возрастающих доз фракций отсева щебеночного производства размером 5-7 и 7-10 мм на динамику показателей структуры дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Самое низкое содержание агрономически ценных агрегатов (АЦА) в почве отмечено спустя год после закладки опыта (весна 2016 г.). Через 2 года после проведения известкования (весна 2017 г.) количество АЦА увеличилось во всех вариантах опыта. Достоверных различий в зависимости от дозы применения и размера частиц не установлено. В результате выращивания горчицы (лето 2017 г.) содержание АЦА или не изменилось, или уменьшилось в отдельных вариантах опыта. Связь между общим содержанием С гумуса в почве отдельных вариантов опыта и количеством АЦА слабая положительная ($r=0,26$). После возделывания гороха (осень 2017 г.) в большинстве вариантов опыта выявлена тенденция к увеличению содержания АЦА. Повышение содержания водопрочных агрегатов (ВА) в большинстве вариантов опыта продолжалось до лета 2017 г. К осени 2017 года после уборки гороха количество ВА в большинстве вариантов снизилось. Связи между количеством ВА и содержанием гумуса не установлено. В большинстве вариантов опыта выявлена сезонная динамика коэффициента структурности ($K_{стр}$). Каких-либо закономерностей, связанных с влиянием дозы внесения мелиоранта на критерий водопрочности (А), на протяжении всего периода изучения проследить не удалось.

Ключевые слова: полевой опыт, дерново-подзолистая почва, структура, известкование, крупные фракции доломита.

CHANGES IN SOD-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL (UMBRIC ALBELUVISOLS ABRUPTIC) STRUCTURE UNDER INFLUENCE OF LIMING WITH LARGE CRUMBS OF DOLOMITE

T. L. Leshko¹, A. V. Litvinovich², P. S. Manakov², A. O. Tyabin¹

¹Saint-Petersburg State Agrarian University

2, Peterburgskoye high-road, Pushkin, Saint-Petersburg, 196601, Russia;

²Agrophysical Research Institute

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

E-mail: dorados@inbox.ru

In a 10-variant micro-field experiment lasting for four experimental years, the influence of increasing rates of dolomite crumbs (size of 5–7 and 7–10 mm) on the dynamics of the indicators of the sod-podzolic sandy loam soil structure has been studied. The lowest content of agronomically valuable aggregates (AVA) in the soil was found a year after establishment of the trial (spring 2016). Two years after the liming the amount of AVA increased in all treatments of the experiment. There were no significant differences depending on the rate and the particle size of the ameliorant. As a result of mustard cultivation (summer 2017), the content of AVA either did not change or decreased in some treatments of the experiment. The relationship between the humus total carbon content for the individual experiment treatments and the amount of AVA was weak ($r = 0,26$). After pea cultivation (autumn 2017), a tendency to an increase in the content of ACA was revealed in most of the treatments. The increase in the content of water-resistant aggregates (WRA) in most treatments lasted until the summer of 2017. By the onset of autumn of 2017, after the harvesting of peas, the amount of WRA in most of the treatments decreased. There was no relationship between the amount of WRA and the humus C content. The seasonal dynamics of the structural coefficient (Cstr) was revealed in the most treatments of the experiment. No influence of the ameliorant rate on the soil water resistance criterion (A) was found throughout the study period.

Keywords: field experience, sod-podzolic soil, structure, liming, large fractions of dolomite.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенное плодородие во многом зависит от физических свойств почвы, среди которых особое значение имеет структура, оказывающая существенное влияние на ее строение, плотность, водный, воздушный и тепловой режимы (Саввинов, 1931; Антипов-Каратаев, 1948; Вильямс, 1949; Семенов, 1981; Воронин, 1984; Градусов, Чижикова, 1988; Кирюшин, 1996; Суворов и др., 1998 (А, Б); Когут и др., 2012; Шеин, Милановский, 2014; Медин и др., 2016).

Помимо структурно-агрегатного состояния, физические свойства почвы во многом определяют почвенные агрегаты, а именно их водопрочность (способность сопротивляться разрушающему действию воды). При низкой водопрочности структурные отдельности легко разрушаются, а почва после увлажнения превращается в неагрегированную массу и становится бесструктурной. Незначительное содержание водопрочных агрегатов приводит к созданию неблагоприятных условий для транспорта питательных соединений, кислорода и влаги к корням растений.

В почвенных агрегатах протекают практически все почвенные микропроцессы, характерные для одного горизонта или почвы в целом. Их стабильное функционирование обеспечивается: 1) сопряженной деятельностью генетических горизонтов и формированием в почвах биогеохимического, сорбционного, кислотного-основного и окислительно-восстановительного барьеров. Состав и локализация их в профиле определяются конкретным типом почвообразования; 2) функциональными перестройками, которые направлены на поддержание

постоянства структурных характеристик агрегата: формы, размеров, энергии связи между органоминеральными агрегированными частицами (Хан и др., 2007).

Процесс формирования, размер и форма структурных отдельностей в значительной степени определяются их составом.

Многочисленные исследования, посвященные процессу структурообразования почв, свидетельствуют о важном значении глинистых минералов в формировании почвенных агрегатов. Так, еще в 1892 г. П. А. Костычев предположил, что глина наряду с органическим веществом играет роль цемента, связывающего между собой почвенные частицы в агрегаты почвы (цит. по А. К. Суворову, 1998).

Важную роль глинистых минералов в образовании агрегатов подтвердил Bayer (1968). Исследовав существенное количество почвенных образцов, он пришел к выводу, что образование агрегатов происходит благодаря глинистым минералам, которые связывают минеральные частицы при протекании физико-химических процессов.

И. Н. Антипов-Каратаев (1948) на основе проведенных исследований установил, что на размеры агрегатов влияют не только глинистые, но и другие минералы. Агрегаты почвы, в составе которых преобладает кварц, являются малопрочными. Более устойчивыми оказываются образования, скелет которых составляют преимущественно полевые шпаты, слюда и глинистые минералы монтмориллонитовой группы.

Д. В. Хан (1969) установил, что глинистые минералы участвуют в структурообразовании, но им

не принадлежит главная роль в данном процессе. Водопрочность структурных отдельностей напрямую зависит от содержания в почве гумусовых веществ, поскольку они склеивают почвенные частицы в структурные агрегаты и придают им водопрочность (Когут и др., 2012). При этом влияние гуминовых и фульвокислот на структурообразование проявляется по-разному.

Различное влияние фульвокислот (ФК) и гуминовых кислот (ГК) на характер структурообразования объясняется, очевидно, их различной растворимостью. В исследовании А. А. Плотникова (1966) установлено, что хорошо растворимые в воде ФК обволакивают (пропитывают) все первичные частицы моренного суглинка за счет адгезионных сил. Сначала первичные частицы склеиваются в мелкие агрегаты, а затем мелкие агрегаты связываются между собой, образуя крупные агрегаты. Поскольку ФК быстро минерализуются, прочность данных образований невелика. ГК, находясь в почве в коагулированном состоянии, склеивают почвенные частицы локально, то есть лишь на отдельных участках первичных частиц и агрегатов различной величины. Под воздействием ГК образуются наиболее устойчивые агрономически ценные агрегаты (Суворов, 1998). Механизм влияния органического вещества на структурно-механические свойства почвы подробно описан в работе Г. Н. Федотова с соавт. (2014).

Применение кальцийсодержащих соединений в форме известковых материалов оказывает положительное влияние на физические свойства почвы, в том числе на ее структурное состояние. В. Р. Вильямс (1938) писал: «По мере того, как между частицами почвы, соединенными в агрегаты, отлагается нерастворимый в воде перегной, он соединяет частички почвы упругим и нерастворимым в воде цементом. Но чтобы откладывающийся в почве перегной стал цементом, необходимо наличие иона кальция».

Кальций входит в коллоидный комплекс почв и обуславливает коагуляцию почвенных коллоидов. Установлено, что при насыщенииППК кальцием до 80% и более дисперсность почвы уменьшается, а фильтрация воды значительно усиливается. На этом основана роль кальция как коагулятора почвенных коллоидов. Чем больше количество кальция в растворе и в поглощенном состоянии, тем эффективнее его действие. Особенно возрастает коагулирующее действие кальция при наличии

непрореагировавшей извести (Небольсин, Небольсина, 2010).

Коагуляционные структуры образуются за счет сцепления частиц ван-дер-ваальсовыми силами через жидкие прослойки или при их вытеснении (Фридрихсберг, 1995). К. Ю. Хан с соавт. (2007) отмечают, что в зависимости от баланса ван-дер-ваальсовых сил в тонкой прослойке жидкости между сближающимися телами возникает либо положительное, либо отрицательное давление, препятствующее их соединению, либо отрицательное, приводящее к уточнению прослойки и образованию контакта между частицами.

Важную роль в придании прочности структуре почвы играют живые корни растений. Пронизывая и оплетая структурный агрегат, они скрепляют его и препятствуют распаду при увлажнении. Структурные агрегаты, скрепленные живыми корешками растений, мицелием и клейкими продуктами жизнедеятельности микроорганизмов, не являются стабильно прочными, но имеют существенное значение в улучшении водно-воздушного режима почвы в период вегетации растений (Семенов, 1981).

Известно, что дерново-подзолистые кислые почвы обладают неблагоприятными физико-химическими свойствами. Коллоидная часть кислых почв бедна кальцием и магнием – элементами, способными улучшать структуру почвы (Митрофанова, 2010). Решением данной проблемы может стать нейтрализация почвенной кислотности и пополнение запасов Са и Mg в почвах посредством известкования.

При производстве щебня из карбонатных пород, предназначенных для дорожного строительства, в отвалы отсеиваются фракции доломитовой крошки размером менее 20 мм. На сегодняшний день в Ленинградской области скопилось около 70 млн. тонн отсева. Использование его в качестве мелиоранта могло бы существенно снизить остроту проблемы известкования почв области и решить важную экологическую задачу высвобождения площадей, занятых отвалами.

В лаборатории мелиорации почв АФИ с 2011 г. проводится изучение возможности использования различных по размеру фракций доломитовой крошки в качестве мелиоративного материала (Салаев и др., 2016, 2018; Литвинович и др., 2016, 2018; Лешко, Литвинович, 2018).

Гранулометрический и химический составы отсева представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Гранулометрический состав доломита (отсева щебеночного производства)

Размер частиц, мм	>10	7–10	5–7	3–5	1–3	0,25–1	<0,25
Содержание в отсевае, %	10,0	11,0	11,0	16,5	28,6	11,5	11,4

Таблица 2. Химический состав доломита (отсева щебеночного производства)

CaCO ₂	MgCO ₂	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	As	Hg	Sr
		%					мг/кг		
46,1	38,4	1,46	8,50	9,76	<0,05	6,2	<1,0	<0,015	160

В работах Литвиновича с соавт. (2008, 2016, 2018) установлено, что процесс разложения мелиорантов карбонатной природы в почвах происходит на протяжении продолжительного времени и завершается спустя 3–7 лет после их применения. При этом чем крупнее размер частиц мелиоранта, тем меньше скорость разложения и больше продолжительность известкования.

Первый отбор почвенных образцов проведен весной 2016 г. спустя 1 год после проведения известкования и трех обработок. Тем самым обеспечивались условия для того, чтобы частицы мелиоранта более полно прореагировали с почвой. В 2017 г. образцы отбирались трижды: весной перед посевом растений, а также после уборки урожая горчицы и гороха.

Методика изучения заключалась в следующем: для анализа из слоя 0–25 см отбирались ненарушенные монолитные почвенные образцы, которые затем сбрасывались с высоты одного метра на плотную поверхность для разделения на структурные отдельности (Саввинов, 1931). Далее почва доводилась до воздушно-сухого состояния.

Для разделения фракций применялись сухой и мокрый рассев. По данным проведенного анализа были рассчитаны показатели структурного состояния пахотного слоя почвы: процентное содержание АЦА (0,25–10,0 мм), $K_{стр}$ и A . Для расчета $K_{стр}$ были определены сумма агрономически ценных агрегатов (0,25–10,0 мм) и сумма агрегатов менее 0,25 мм и более 10,0 мм по сухому расसेву, а для расчета A – суммы агрегатов размером 0,25–1,0 мм по сухому и мокрому расसेву. Математическая обработка результатов проводилась с помощью компьютерной программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по содержанию АЦА представлены в табл. 4.

Весной 2016 г., спустя год после закладки опыта, наименьшее количество АЦА установлено в почве контрольного варианта опыта без известкования. По мере проведения эксперимента количество АЦА в почве данного варианта повысилось и варьировалось на протяжении всего эксперимента от 58,52 до 60,32%.

Известкование доломитовой мукой (ДМ) привело к увеличению количества АЦА в почве по сравнению с контролем. Достоверное повышение их содержания установлено после 2-го отбора почвенных проб. Далее в 2017 г. их содержание стабилизировалось на уровне 62%.

Использование доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозе, соответствующей 1 Нг, не привело к достоверному повышению содержания АЦА весной 2016 г. по сравнению с контролем. При увеличении дозы внесения до 3 и 5 Нг появилась тенденция к повышению содержания АЦА. Количество АЦА увеличивалось в соответствии с повышением дозы.

Значимых различий по вариантам опыта в зависимости от размера частиц не установлено.

Максимальный эффект от мелиорации был отмечен спустя два года после проведения известкования. По сравнению с первым отбором количество АЦА в отдельных вариантах опыта повысилось на 2–14%. Размах колебаний содержания АЦА по вариантам с использованием доломита составил 60,74–64,82%.

Летом 2017 г. после уборки горчицы количество АЦА в большинстве вариантов уменьшилось по сравнению с весенним отбором. Исключение составляют варианты опыта с применением высоких (3 и 5 Нг) доз крупных фракций отсева размером 7–10 мм и естественной смеси доломита – в них содержание АЦА по сравнению с предыдущим отбором не изменилось. В указанных вариантах также не выявлено достоверных различий по сравнению с вариантом с использованием ДМ.

Установленная весной 2016 г. закономерность повышения количества АЦА по мере увеличения дозы применения крупных частиц доломита полностью подтвердилась после летнего отбора почвенных проб в 2017 г. При этом количество АЦА летом 2017 г. в отдельных вариантах опыта было выше, чем в тех же вариантах весной 2016 г.

Тенденция к повышению содержания АЦА в вариантах опыта с использованием крупных фракций сохранилась и после уборки гороха. При одинаковой дозе применения доломита в вариантах с использованием фракции размером 7–10 мм количество АЦА было больше, чем в аналогичных вариантах с частицами размером 5–7 мм.

Таким образом, на протяжении всего периода изучения динамика изменения содержания АЦА была следующей. Самое низкое количество АЦА в почве отмечено спустя год после закладки опыта. Согласно шкале оценки структурного состояния почв, разработанной Н. А. Качинским (1965), показатели содержания АЦА вне зависимости от варианта опыта соответствовали удовлетворительному состоянию. По мере взаимодействия доломита с почвой спустя 2 года после проведения известкования количество АЦА во всех вариантах опыта увеличилось, а структурное состояние почвы улучшилось. Вне зависимости от варианта опыта структурное состояние стало оцениваться как хорошее (Качинский, 1965). В результате возделывания горчицы количество АЦА или не изменилось, или уменьшилось в отдельных вариантах опыта. Связь между общим содержанием С гумуса в почве отдельных вариантов и количеством АЦА слабая положительная ($r = 0,26$). После возделывания гороха в большинстве вариантов опыта выявлена тенденция к повышению количества АЦА. Связь между общим содержанием С гумуса в почве отдельных вариантов и количеством АЦА $r = 0,35$.

Данные о динамике изменения водопорочных агрегатов на протяжении всего периода изучения представлены в табл. 5.

Таблица 5. Изменение содержания водопрочных агрегатов в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при использовании возрастающих доз крупных фракций отсева щебеночного производства

Варианты опыта	>0,25 мм, мокрый рассев, %			
	2016 г.		2017 г.	
	весна	весна	после уборки горчицы	после уборки гороха
Фон НРК	26,35	47,55	55,16	50,54
Фон + дол. мука (1 Нг)	33,47	51,79	55,30	53,97
Фон + отсев 5–7 мм, 1 Нг	30,66	48,32	52,40	51,26
Фон + отсев 5–7 мм, 3 Нг	36,45	40,98	50,41	52,87
Фон + отсев 5–7 мм, 5 Нг	34,61	35,96	53,26	50,86
Фон + отсев 7–10 мм, 1 Нг	32,54	38,73	57,18	51,87
Фон + отсев 7–10 мм, 3 Нг	31,44	38,65	49,79	51,22
Фон + отсев 7–10 мм, 5 Нг	30,73	37,28	52,37	53,44
Фон + ест. смесь, 1 Нг	35,67	38,52	53,80	55,06
Фон + ест. смесь, 3 Нг	35,03	37,78	53,82	52,56
НСР _{0,5}	10,24	4,98	5,95	4,32

Результаты исследований показали, что вне зависимости от варианта опыта наименьшее содержание ВА отмечено в образцах почвы, отобранных весной 2016 г. Достоверных различий между вариантами спустя год после проведения известкования не выявлено. В качестве положительной тенденции можно отметить повышение содержания ВА в вариантах с известкованием естественной смесью мелиоранта. Согласно шкале Н. А. Качинского (1965), структурное состояние почвы по содержанию ВА оценивалось как удовлетворительное вне зависимости от варианта опыта. Таким образом, как по количеству АЦА, так и по содержанию ВА мелиорируемая почва спустя год после проведения известкования характеризовалась удовлетворительным структурным состоянием вне зависимости от дозы внесения доломита и размера его частиц (Качинский, 1965).

После второго отбора (весна 2017 г.) количество ВА повысилось во всех вариантах опыта. Максимальное увеличение содержания ВА установлено в контрольном варианте и варианте с доломитовой мукой. В остальных вариантах с известкованием количество ВА было меньше. Каких-либо закономерностей, связанных с размером частиц и дозой внесения крупных фракций отсева, не установлено.

Повышение содержания ВА в большинстве вариантов опыта продолжалось до лета 2017 г. Попытка связать увеличение количества ВА с изменением общего содержания С гумуса в почве отдельных вариантов опыта, предпринятая одним из соавторов настоящей статьи (Салаев и др., 2016), не привела к выявлению жесткой положительной связи между ними.

Вероятно, не весь гумус, а только некоторая его часть принимает участие в формировании водопрочной структуры. Следовательно, общее содержание гумуса в почве не может служить надежным критерием для оценки степени их

агрегированности. Данный вывод согласуется с мнением Д. В. Хана (1969), доказавшим, что решающим фактором в структурообразовании является качественный состав гумуса. Активная роль в образовании агрономически ценных водопрочных агрегатов принадлежит ГК, а их состав определяется свободной и связанной с железом фракцией (ГК-1).

Кроме того, если ранее считалось, что образование гуминовых веществ является обязательным условием и начальным этапом агрегатообразования и формирования структуры, то, согласно современным представлениям, скорость формирования почвенных агрегатов преимущественно зависит от поступления свежего органического вещества, инициирующего активность мезо- и микрофауны, а также микроорганизмов. При этом разлагаемое органическое вещество является более эффективным агрегатообразующим агентом, чем, например, лигнинсодержащие вещества. Роль гуминовых веществ состоит в поддержании стабильности агрегатов (Abiven et al., 2009).

Следует отметить, что на протяжении всего периода изучения почва в варианте без известкования оставалась хорошо структурированной и мало отличалась по данному показателю от вариантов с мелиорацией. По всей вероятности, благодаря тому, что почва до закладки опыта характеризовалась достаточным количеством кальция, растения в годы проведения эксперимента не испытывали дефицита указанного элемента. Кроме того, экспериментально установлено, что при низком уровне агротехники в почвах образуются более агрессивные гумусовые кислоты, способные переводить Ca^{2+} минералов в доступное для растений состояние (Орлова, Бакина, Дмитричева, 2000). Можно ожидать, что при дальнейшем проведении эксперимента и возникновении дефицита щелочноземельных металлов в непроизвесткованной почве, влияние известкования на формирование почвенной структуры проявится более отчетливо.

Положительное влияние растений на почвенную структуру установлено целым рядом исследований (Саввинов, 1936; Вильямс, 1949; Плотников, 1966; Семенов, 1981 и др.). Так, в результате проведенного ранее опыта выявлена способность корней растений горчицы «оплести» частицы мелиоранта и почвы и тем самым придавать им определенную прочность (Литвинович и др., 2016). По всей видимости, именно влиянием корневой системы горчицы объясняется увеличение содержания ВА в почве после ее уборки. Известно, что от 20 до 40% образующихся в процессе фотосинтеза органических веществ выделяется через корневую систему. Корневые экссудаты представляют собой сложную смесь анионов органических кислот, фитосидерофоров типа хелатов, сахаров, витаминов, аминокислот, пуринов, нуклеозидов, ферментов и содержимого эпидермальных клеток (Dakogo, Phillips, 2002). Большинство данных соединений являются предпочтительными источниками питания и энергии для микроорганизмов и полностью утилизируются сразу после выделения из корня. Колонии микроорганизмов могут стать ядрами микроагрегатов, формирующихся из полисахаридных выделений микроорганизмов, к которым присоединяются глинистые частицы. Сцепление микроагрегатов между собой с образованием в результате макроагрегатов и комков осуществляется посредством динамичного и недолговечного клеящего вещества – продуктов жизнедеятельности микробов, мелких корней, гифов грибов, бактерий и водорослей (Oades, Waters, 1991; Six et al., 2004; Bronick, Lal, 2005; Семенов, Когут, 2015).

К осени 2017 г. после уборки гороха количество ВА в почве большинства вариантов опыта уменьшилось. Исключением являются варианты

опыта с использованием фракций доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозе 1 Нг, фракций размером 7–10 мм в дозе 5 Нг и естественной смеси фракций, где содержание ВА или осталось на том же уровне, что и при предыдущем отборе, или несколько увеличилось.

Твердая фаза почвы является очень сложной системой с различным химическим и минералогическим составом. Вся система твердых частиц в верхних горизонтах профиля густо населена живыми организмами. Корневые системы зеленых растений, распространяясь в почве по всем направлениям, механически раздвигают твердые частицы, сближают их друг с другом и переплетают всю почвенную массу корневыми волосками. Значительное количество разнообразных микроорганизмов, развивающихся на поверхности корневых волосков, твердых частиц и в порах между ними, активно воздействуют как на корневую систему, так и на твердые частицы почвы и переводят как органические, так и минеральные вещества в растворимое состояние, увеличивая их реакционную способность. Почвенная фауна энергично перемешивает и перерабатывает верхние горизонты почвы, перераспределяя в них органические остатки. В результате сложного биологического цикла превращений образуются разнообразные органические и минеральные соединения, находящиеся в высокодисперсном и активном состоянии. Они вступают во взаимодействие друг с другом и твердыми частицами почвы, склеивая их в водопрочные микроагрегаты и микроструктурные комки. Проведенные в рамках настоящей работы исследования показали, насколько по-разному складываются условия формирования водопрочных агрегатов в отдельных вариантах опыта и в разные периоды функционирования почвы.

Результаты расчета $K_{стр}$ представлены в табл. 6.

Таблица 6. **Изменение коэффициента структурности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при использовании возрастающих доз крупных фракций отсева щебеночного производства**

Варианты опыта	$K_{стр}$, ед.			
	2016 г.	2017 г.		
	весна	весна	после уборки горчицы	после уборки гороха
Фон НРК	1,11	1,74	1,41	1,97
Фон + дол. мука (1–Нг)	1,23	2,18	1,69	1,66
Фон + отсев 5–7 мм, 1 Нг	1,05	1,70	1,14	1,45
Фон + отсев 5–7 мм, 3 Нг	1,14	1,84	1,31	1,52
Фон + отсев 5–7 мм, 5 Нг	1,43	1,55	1,41	1,61
Фон + отсев 7–10 мм, 1 Нг	1,03	1,84	1,44	1,48
Фон + отсев 7–10 мм, 3 Нг	1,26	1,59	1,41	1,46
Фон + отсев 7–10 мм, 5 Нг	1,49	1,65	1,76	1,73
Фон + ест. смесь, 1 Нг	1,15	1,58	1,71	1,84
Фон + ест. смесь, 3 Нг	1,24	1,73	1,70	1,67
НСР0,5	0,45	0,30	0,3	0,33

Данные таблицы показывают, что в течение всего периода проведения эксперимента наименьшим значением $K_{стр}$ почва характеризовалась после первого отбора образцов (весна 2016 г.). Минимальное значение установлено в контрольном варианте и в вариантах с применением крупных частиц доломита в дозе 1 Нг. При увеличении дозы применения значения $K_{стр}$ повысились. Влияния на данный показатель размера частиц доломитовой крошки не выявлено. Согласно шкале оценки состояния почв Н. А. Качинского (1965), спустя год после закладки опыта почва характеризовалась хорошей структурированностью вне зависимости от дозы применения и размера частиц мелиоранта.

По мере растворения мелиоранта после второго отбора образцов (весна 2017 г.) значения $K_{стр}$ во всех без исключения вариантах опыта повысились. Максимальный показатель характерен для почвы, известкованной ДМ, минимальный – для почвы вариантов с использованием доломитовой крошки в дозе 5 Нг.

Летом 2017 г. после уборки горчицы значения $K_{стр}$ уменьшились в большинстве вариантов и вновь повысились после уборки гороха. Исключениями являлись варианты опыта с применением фракции отсева размером 7–10 мм в дозе 3 Нг и естественной смеси мелиоранта в дозе 1 Нг. Таким образом, выявлена сезонная динамика колебаний значений $K_{стр}$ в большинстве вариантов опыта в течение весенне-осеннего периода 2017 г.

Величина критерия водопрочности в вариантах с внесением доломитовой крошки размером 5–7 и 7–10 мм в дозах 1 и 3 Нг повышалась на протяжении всего периода изучения (табл. 7). В варианте №1 (контроль) и вариантах с применением ДМ, доломитовой крошки в дозе 5 Нг и естественной смеси мелиоранта максимальные значения были отмечены в летний период 2017 г. Каких-либо закономерностей, связанных с влиянием дозы мелиоранта на водопрочность агрегатов, за весь период проведения опыта не выявлено.

Таблица 7. Изменение критерия водопрочности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при использовании возрастных доз крупных фракций отсева щебеночного производства

Варианты опыта	А, %			
	2016 г.	2017 г.		
	весна	весна	после уборки горчицы	после уборки гороха
Фон НРК	119,02	158,21	131,99	177,08
Фон + дол. мука (1Нг)	156,63	180,61	190,28	181,51
Фон + отсев 5–7 мм, 1 Нг	123,59	169,01	172,55	181,63
Фон + отсев 5–7 мм, 3 Нг	154,82	139,61	176,36	192,59
Фон + отсев 5–7 мм, 5 Нг	140,94	146,54	198,56	189,64
Фон + отсев 7–10 мм, 1 Нг	119,95	137,41	177,14	186,88
Фон + отсев 7–10 мм, 3 Нг	120,37	134,83	174,93	195,74
Фон + отсев 7–10 мм, 5 Нг	128,17	136,75	189,42	181,19
Фон + ест. смесь, 1 Нг	132,28	150,67	204,30	191,97
Фон + ест. смесь, 3 Нг	137,17	145,88	203,93	196,44
НСР _{0,5}	36,6	23,14	35,43	36,15

ВЫВОДЫ

1. Использование крупных фракций отсева доломитовой крошки оказывает положительное влияние на структуру дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, усиливающееся со временем.

2. Самое низкое содержание АЦА отмечено в почве спустя год после закладки опыта. Через два года после проведения известкования количество АЦА увеличилось во всех вариантах опыта. Достоверных различий в зависимости от дозы применения и размера частиц не выявлено. В результате выращивания горчицы содержание АЦА или не изменилось, или уменьшилось в отдельных вариантах опыта. После возделывания гороха в

большинстве вариантов выявлена тенденция к повышению содержания АЦА.

3. Увеличение содержания ВА в большинстве вариантов опыта продолжалось до лета 2017 г. К осени 2017 г. после уборки гороха количество ВА в большинстве вариантов снизилось.

4. В большинстве вариантов опыта выявлена сезонная динамика изменения $K_{стр}$ в весенне-осенний период 2017 г. Каких-либо закономерностей, связанных с влиянием дозы внесения мелиоранта на критерий водопрочности (А), на протяжении всего периода изучения проследить не удалось.

5. Влияние мелиорации на показатели почвенной структуры должно усиливаться при увеличении срока взаимодействия крупных частиц доломита с почвой и, как следствие, повышении содержания Са в почвенном растворе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антипов-Каратаев И. Н. О почвенном агрегате и методах его исследования / Антипов-Каратаев И. Н., Келлерман В. В., Хан Д. В.; АН СССР, Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, Совет по изуч. производит. сил. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 84 с.
- Бондарев А. Г. О значении физических свойств почв в адаптивно-ландшафтном земледелии // Бюллетень почвенного института им. В. В. Докучаева. 2007. № 60. С. 71–74.
- Вильямс В. Р. Почвоведение. Земледелие с основами почвоведения. М.: Гос. изд. с.-х. лит., 1938. 472 с.
- Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд. МГУ, 1984. 205 с.
- Градусов Б. П., Чижикова Н. П. Роль минеральной части в формировании и воспроизводстве почвенной структуры и ее типы // Физико-химия почв и их плодородие: Сб. науч. тр. М.: 1988. С. 146–151.
- Качинский Н. А. Физика почвы. М.: Высшая школа, 1965. 324 с.
- Кирюшин В. И. Экологические основы земледелия. М.: Колос, 1996. 367 с.
- Когут Б. М., Сысуев С. А., Хохлов В. А. Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.
- Лешко Т. Л., Литвинович А. В. Влияние крупных фракций доломитовой крошки на структурное состояние дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018. № 3(52). С. 54–58.
- Литвинович А. В., Небольсина З. П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79–94.
- 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(А). № 2. С. 31–41.
- Литвинович А. В., Павлова О. Ю., Лаврищев А. В., Буре В. П., Салаев И. В. Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // Агрохимия. 2016 (Б). № 12. С. 45–50.
- 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. DOI: 10.7868/S0002188118030079
- Медин Д. К., Русакова И. В., Шабардина Н. П. Влияние птичьего помета в сочетании с соломой на агрегатный состав и водопрочность агрегатов дерново-подзолистой супесчаной почвы // Агрофизика. 2016. № 2. С. 18–23.
- Митрофанова Е. М. Содержание подвижного алюминия в дерново-подзолистой почве Предуралья в зависимости от известкования и минеральных удобрений // Материалы научной конференции, посвященной 75-летию со дня рождения А. Н. Небольсина «Современные проблемы и перспективы известкования кислых почв». Санкт-Петербург, 22 апреля 2010 г. СПб., 2010. С. 34–37.
- Небольсин А. Н., Небольсина З. П. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ГНУ ЛНИИСХ Россельхозакадемии, 2010. 254 с.
- Орлова Н. Е., Бакина Л. Г., Дмитричева Л. Е. Трансформация органического вещества дерново-подзолистой почвы в условиях снижения уровня агротехники // Гумус и почвообразование. Сб. научн. трудов СПбГАУ. СПб., 2000. С. 72–77.
- Плотников А. А. Структура дерново-подзолистых суглинистых почв в условиях их сельскохозяйственного использования // Сб. науч. трудов Ивановского с.-х. ин-та. 1966. № 22. С. 65–84.
- Саввинов Н. И. Структура почвы и ее прочность на целине, перелог и старопахотных участках. М.: Сельхозгиз, 1931. 46 с.
- Саввинов Н. И. Влияние многолетних трав и некоторых агротехнических приемов на прочность структуры почв в разных зонах // Физика почв СССР. М.: Сельхозгиз, 1936. Т. 5. С. 58–102.
- Салаев И. В., Литвинович А. В. Интенсивность миграции кальция и магния из дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, мелиорируемой крупными фракциями отсева щебеночного производства // Агрофизика. 2018. № 2. С. 22–28. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.02.04
- 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.
- Семенов А. А. Структурный состав и свойства агрегатов дерново-подзолистых почв сельскохозяйственного использования. Автореф. дисс. канд. биол. наук, Л., 1981. 23 с.
- Семенов В. М., Когут Б. М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Суворов А. К., Ковалев В. А. Моделирование процессов структурообразования в дерново-подзолистых почвах // Научное издание СПбГАУ / Гумус и почвообразование. СПб.: СПбГАУ, 1998 (А). С. 131–136.
- Суворов А. К., Рахматуллина А. Р., Ковалев В. А. Минералогический и гранулометрический состав структурных агрегатов дерново-подзолистых почв // Научное издание СПбГАУ / Гумус и почвообразование. СПб.: СПбГАУ, 1998 (Б). С. 124–131.

- Шеин Е. В., Милановский Е. Ю. Органическое вещество и структура почвы: учение В. Р. Вильямса и современность // *Известия ТСХА*. 2014. № 1. С. 42–51.
- Федотов Г. Н., Шоба С. А., Хайдапова Д. Д. Изучение механизма влияния органического вещества на структурно-механические свойства почв // *Доклады академии наук*. 2014. Т. 456. № 1. С. 121–125. DOI: 10.7868/S086956521413026X
- Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. СПб.: Химия, 1995. 400 с.
- Хан Д. В. Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 242 с.
- Хан К. Ю., Поздняков А. И., Сон Б. К. Строение и устойчивость почвенных агрегатов // *Почвоведение*. 2007. № 4. С. 450–456.
- AIVEN S., MENASSERI S., CHENU C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability // *A literature analysis / Soil Biol. Biochem*, 2009, v. 41, pp. 1–12.
- Baver L. D. The effect of organic matter on soil structure // *Pontif. acad. sci scripta varia*, 1968, v. 32, pp. 382–403.
- Bronick C. J., Lal R. Soil structure and management: a review // *Geoderma*, 2005, v. 124, pp. 3–22.
- Dakora F. D., Phillips D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments // *Plant and Soil*, 2002, v. 245, pp. 35–47.
- Oades J. M., Waters A. G. Aggregate hierarchy in soils // *Austral. J. Soil Res.*, 1991, v. 29, pp. 815–828.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil Tillage Res.*, 2004, v. 79, pp. 7–31.

REFERENCES

- Antipov-Karataev I. N. *O pochvennom agregate i metodah ego issledovanija*. [About soil aggregate and methods of its research]. Antipov-Karataev I. N., Kellerman V. V., Han D. V.; AN SSSR, Soil Institute named after V. V. Dokuchaev. Council for the study of productive forces. Moscow; Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences USSR, 1948. 84 p.
- Bondarev A. G. O znachenii fizicheskikh svojstv pochv v adaptivno-landshaftnom zemledelii. [On the importance of physical properties of soils in adaptive-landscape agriculture] // *Bulletin of the Soil Institute named after V. V. Dokuchaev*, 2007, no. 60, pp. 71–74.
- Vil'jams V. R. *Pochvovedenie. Zemledelie s osnovami pochvovedenija*. [Pedology. Agriculture with the basics of soil science]. Moscow: State publishing house of agr. lit., 1938. 472 p.
- Voronin A. D. *Strukturno-funktional'naja gidrofizika pochv*. [Structural and functional Hydrophysics of soils]. Moscow: Moscow University Publishing, 1984. 205 p.
- Gradusov B. P., Chizhikova N. P. Rol' mineral'noj chasti v formirovanii i vosproizvodstve pochvennoj struktury i ee tipy. [The role of the mineral part in the formation and reproduction of soil structure and its types]. *Physical chemistry of soils and their fertility: collection of proceedings*. Moscow, 1988, pp. 146–151.
- Kachinskij N. A. *Fizika pochvy*. [Soil physics]. Moscow: Higher Skool, 1965. 324 p.
- Kirjushin V. I. *Jekologicheskie osnovy zemledelija*. [Ecological bases of agriculture]. Moscow: Kolos, 1996. 367 p.
- Kogut B. M., Sysuev S. A., Hohlov V. A. Vodoprochnost' i labil'nye gumusovye veshhestva tipichnogo chernozema pri raznom zemlepol'zovanii. [Water resistance and labile humus substances of typical black soil under different land use] // *Pochvovedenie*, 2012, no. 5, pp. 555–561.
- Leshko T. L., Litvinovich A. V. Vlijanie krupnyh frakcij dolomitovoj kroschki na strukturnoe sostojanie dornovo-podzolistoj legkosuglinistoj pochvy. [Influence of large fractions of dolomite crumb on the structural state of sod-podzolic light-loamy soil] // *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, no. 3(52), pp. 54–58.
- Litvinovich A. V., Nebol'sina Z. P. Prodolzhitel'nost' dejstvija izvestkovyh meliorantov v pochvah i jeffektivnost' izvestkovanija. [The duration of the calcareous ameliorants in soils and the effectiveness of liming] // *Agrohimiya*, 2012, no. 10, pp. 79–94.
- Litvinovich A. V., Pavlova O. Ju., Lavrishhev A. V., Bure V. M., Kovleva A. O. Meliorativnye svojstva, udobritel'naja cennost' i skorost' rastvorenija v pochvah razlichnyh po razmeru frakcij otseva dolomita, ispol'zuemogo dlja dorozhnogo stroitel'stva. [Meliorative properties, fertilizer value and dissolution rate in soils of different size fractions of dolomite used for road construction] // *Agrohimiya*, 2016 (A), no. 2, pp. 31–41.
- Litvinovich A. V., Pavlova O. Ju., Lavrishhev A. V., Bure V. P., Salaev I. V. Skorost' rastvorenija v pochvah meliorantov karbonatnoj prirody (jempiricheskie modeli dinamiki rastvorenija). [The dissolution rate in soil ameliorants carbonate nature (empirical model of the dynamics of dissolution)] // *Agrohimiya*, 2016 (B), no. 12, pp. 45–50.
- Litvinovich A. V., Lavrishhev A. V., Bure V. M., Pavlova O. Ju., Kovleva A. O. Dinamika soderzhaniya obmennyh kationov kal'cija i magnija v dornovo-podzolistoj legkosuglinistoj pochve, melioriruemoj razlichnymi po razmeru frakcijami dolomita (jempiricheskie modeli processa podkisljenja). [Dynamics of calcium and magnesium exchange cations content in sod-podzolic light-loamy soil reclaimed by dolomite fractions of different size (empirical models of acidification process)] // *Agrohimiya*, 2018, no. 3, pp. 50–61. DOI: 10.7868/S0002188118030079
- Medin D. K., Rusakova I. V., Shabardina N. P. Vlijanie ptich'ego pometa v sochetanii s solomoi na agregatnyj sostav i vodoprochnost' agregatov dornovo-podzolistoj supeschanoj pochvy. [Effect of bird droppings in combination with straw on aggregate composition and water-resistance of sod-podzolic sandy loam soil aggregates] // *Agrofizika*, 2016, no. 2, pp. 18–23.

- Mitrofanova E. M. Soderzhanie podvizhnogo aljuminija v dernovo-podzolistoj pochve Predural'ja v zavisimosti ot izvestkovanija i mineral'nyh udobrenij. [The content of mobile aluminum in the sod-podzolic soil of the Urals depending on liming and mineral fertilizers]. *Materials of the scientific conference dedicated to the 75th anniversary of the birth A.N. Nebol'sin «Modern problems and prospects of acid soils liming»*. St. Petersburg, 22 april, 2010. Saint-Petersburg, 2010, pp. 34–37.
- Nebol'sin A. N., Nebol'sina Z. P. *Izvestkovanje pochv (rezul'taty 50-letnih polevyh opytov)*. [Liming of soils (results of a 50-year-old field experiments)]. Saint-Petersburg: GNU LNIISH Russian agricultural academy, 2010. 254 p.
- Orlova N. E., Bakina L. G., Dmitricheva L. E. Transformacija organicheskogo veshhestva dernovo-podzolistoj pochvy v uslovijah snizhenija urovnja agrotehniki. [Transformation of organic matter of sod-podzolic soil in the conditions of reducing the level of agricultural technology]. *Humus and soil formation. Scientific publication of St. Petersburg state agrarian University*, Saint-Petersburg, 2000, pp. 72–77.
- Plotnikov A. A. Struktura dernovo-podzolistyh suglinistyh pochv v uslovijah ih sel'skohozjajstvennogo ispol'zovanija. [Structure of sod-podzolic loamy soils under conditions of their agricultural use]. *Collection of proceedings of Ivanovo agricultural Institute*, 1966, no. 22, pp. 65-84.
- Savvinov N. I. *Struktura pochvy i ee prochnost' na celine, pereloge i staropahotnyh uchastkah*. [Soil structure and its strength on virgin land, the fallow and long-arable areas]. Moscow: Sel'hozgiz, 1931. 46 p.
- Savvinov N. I. Vlijanie mnogoletnih trav i nekotoryh agrotehnicheskikh priemov na prochnost' struktury pochv v raznyh zonah. [Influence of perennial grasses and some agrotechnical methods on the strength of soil structure in different zones]. *Physics of soils of the USSR*, t. 5, Moscow: Sel'hozgiz, 1936, pp. 58–102.
- Salaev I. V., Litvinovich A. V. Intensivnost' migracii kal'cija i magnija iz dernovo-podzolistoj legkosuglinistoj pochvy, melioriruemoj krupnymi frakcijami otseva shhebjonochного proizvodstva. [The intensity of migration of calcium and magnesium from sod-podzolic light-loamy soil, reclaimed by large fractions of gravel production] // *Agrofizika*, 2018, no. 2, pp. 22–28. DOI: 10.25695/AGRP.2018.02.04
- Salaev I. V., Litvinovich A. V., Shevchenko E. E. Vlijanie krupnyh frakcij otseva shhebenochного proizvodstva na soderzhanie gumusa v dernovo-podzolistoj suglinistoj pochve, urozhaj i himicheskij sostav rastenij goroha. [The influence of large fractions of gravel production on humus content in sod-podzolic loamy soil, yield and chemical composition of pea plants] // *Agrofizika*, 2016, no. 3, pp. 7–14.
- Semenov A. A. *Strukturnyj sostav i svojstva agregatov dernovo-podzolistyh pochv sel'skohozjajstvennogo ispol'zovanija*. Avtoref. diss. kand. biol. nauk [Structural composition and properties of sod-podzolic soil aggregates for agricultural use. Abstr. diss cand. agr. sci.]. Leningrad, 1981. 23 p.
- Semenov V. M., Kogut B. M. *Pochvennoe organicheskoe veshhestvo*. [Soil organic matter]. Moscow: GEOS, 2015. 233 p.
- Suvorov A. K., Kovalev V. A. Modelirovanie processov strukturoobrazovanija v dernovo-podzolistyh pochvah. [Modeling of structure formation processes in sod-podzolic soils]. *Humus and soil formation. Scientific publication of St. Petersburg state agrarian University*, Saint-Petersburg: SPbGAU, 1998 (A), pp. 131–136.
- Suvorov A. K., Rahmatullina A. R., Kovalev V. A. Mineralogicheskij i granulometricheskij sostav strukturnyh agregatov dernovo-podzolistyh pochv. [Mineralogical and granulometric composition of structural aggregates of sod-podzolic soils]. *Humus and soil formation. Scientific publication of St. Petersburg state agrarian University*. Saint – Petersburg: SPbGAU, 1998 (B), pp. 24–131.
- Shein E. V., Milanovskij E. Ju. Organicheskoe veshhestvo i struktura pochvy: uchenie V. R. Vil'jamsa i sovremennost'. [Organic matter and soil structure: the teachings of V. R. Williams and modernity] // *Izvestija TSHA*, 2014, no. 1. pp. 42–51.
- Fedotov G. N., Shoba S. A., Hajdapova D. D. Izuchenie mehanizma vlijanija organicheskogo veshhestva na strukturno-mehaničeskie svojstva pochv. [Study of the mechanism of influence of organic matter on the structural and mechanical properties of soils] // *Doklady akademii nauk*, 2014, v. 456, no. 1, pp. 121–125. DOI: 10.7868/S086956521413026X
- Fridrihsberg D. A. *Kurs kolloidnoj himii*. [Course of colloid chemistry]. Saint - Petersburg: Himija, 1995. 400 p.
- Han D. V. *Organo-mineral'nye soedinenija i struktura pochvy*. [Organo-mineral compounds and soil structure]. Moscow: Nauka, 1969. 242 p.
- Han K.Ju., Pozdnjakov A. I., Son B. K. Stroenie i ustojčivost' pochvennyh agregatov. [Construction and stability of soil aggregates] // *Pochvovedenie*, 2007, no. 4, pp. 450–456.
- Abiven S., Menasseri S., Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability // *A literature analysis / Soil Biol. Biochem*, 2009, v. 41, pp. 1–12.
- Baver L. D. The effect of organic matter on soil structure // *Pontif. acad. sci scripta varia*, 1968, v. 32, pp. 382–403.
- Bronick C. J., Lal R. Soil structure and management: a review // *Geoderma*, 2005, v. 124, pp. 3–22.
- Dakora F. D., Phillips D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments // *Plant and Soil*, 2002, v. 245, pp. 35–47.
- Oades J. M., Waters A. G. Aggregate hierarchy in soils // *Austral. J. Soil Res.*, 1991, v. 29, pp. 815–828.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil Tillage Res.*, 2004, v. 79, pp. 7–31.