

Исследования
антропогенно-измененных
экосистем и урбоэкология

Исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-58-78

А.В. Козлов*, **А.Х. Куликова****,
О.В. Селицкая***, **И.П. Уромова***, ****

* Нижегородский государственный педагогический университет
имени Козьмы Минина,
603950 г. Нижний Новгород, Российская Федерация

** Ульяновский государственный аграрный университет
имени П.А. Столыпина,
432017 г. Ульяновск, Российская Федерация

*** Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева,
127750 г. Москва, Российская Федерация

**** ООО «Элитхоз»,
606476 г. Бор, Нижегородская обл., Российская Федерация

Изменение активности гидролазно-оксидоредуктазного ферментного комплекса и показателей плодородия дерново-подзолистой почвы под действием бентонитовой глины

В аспекте современного направления оценки потенциального воздействия альтернативных удобрительных материалов на свойства почв определена изменчивость активности основных гидролазных и оксидоредуктазных ферментов в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (по WRB – Retisols) и показателей ее эффективного плодородия под влиянием мелиоративных доз бентонитовой глины. Микрополевое исследование проводили в течение

2015–2017 гг. в условиях Нижегородской области. Породу вносили однократно (2014 г.) в пахотный слой почвы в дозах из расчета 3, 6 и 12 т/га. В годы проведения исследования выращивали озимую пшеницу (*Московская 39*), ячмень (*Велес*) и горох посевной (*Чишминский 95*). При определении ферментативной активности почвы и содержания в ней элементов питания растений использовали классические биохимические и агрохимические методы, используемые в почвоведении. Под влиянием высоких доз бентонитовой глины в почве наблюдали значительную активизацию ферментативной активности (протеазной (до 90%), целлюлазной (почти в 2 раза), фосфатазной (до 140%), полифенолоксидазной (до 30%) и каталазной (до 70%)). Как следствие, выявлено улучшение ее агрохимических показателей, в том числе установлено повышение содержания подвижных соединений фосфора (на 21–31 мг/кг), обменных форм калия (на 32–41 мг/кг), доступных силикатов (в 2–8 раз по α -форме и в 1,5–3,0 раза по β -форме), усиление нитрифицирующей способности (на 2,6–4,1 мг/кг), а также относительная сохраняемость содержания гумусовых веществ на уровне контроля. Полученные результаты могут являться основой для внедрения бентонита в производственные полевые эксперименты и в последующем для разработки технологии применения бентонитовых глин в земледелии Нечерноземной зоны в качестве мелиоративного средства, оптимизирующего ферментативную активность почв.

Ключевые слова: дерново-подзолистая легкосуглинистая почва (*Retisols*), бентонитовая глина, активность гидролаз и оксидоредуктаз в почве, показатели плодородия почвы.

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Козлов А.В., Куликова А.Х., Селицкая О.В., Уромова И.П. Изменение активности гидролазно-оксидоредуктазного ферментного комплекса и показателей плодородия дерново-подзолистой почвы под действием бентонитовой глины // Социально-экологические технологии. 2019. Т. 9. № 1. С. 58–78. DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-58-78.

DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-58-78

A.V. Kozlov^{*}, A.H. Kulikova^{},
O.V. Selitskaya^{***}, I.P. Uromova^{*,****}**

^{*} Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University,
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

^{**} Stolypin Ulyanovsk State Agricultural University,
Ulyanovsk, 432017, Russian Federation

^{***} Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, 127750, Russian Federation

^{****} Elitkhoz Ltd,
Bor, Nizhny Novgorod Region, 606476, Russian Federation

Change of hydrolase and oxide reductase fermental complex activity and indicators of fertility to sod-podsolic soil under action of bentonite clay

In aspect of modern direction of potential impact assessment of alternative fertilizer materials on properties of soils variability of activity of the main hydrolase and oxide reductase enzymes in sod-podsolic sandy loamy soil (by WRB Retisols) and indicators of its effective fertility under influence of meliorative doses of bentonite clay is determined. Microfield research was conducted during 2015–2017 in conditions of the Nizhny Novgorod Region. Breed was brought once (2014) in an arable layer of earth in doses at rate of 3, 6 and 12 t/hectare. In years of carrying out research grew up winter wheat (*Moskovskaya 39*), barley (*Veles*) and peas of sowing campaign (*Chishminsky 95*). When determining enzymatic activity of soil and maintenance of batteries of plants in it used classical biochemical and agrochemical methods used in soil science. Under influence of bentonite clay high doses in soil observed considerable activation of enzymatic activity (protease (to 90%), cellulase (almost twice), phosphatase (up to 140%), phenol oxidase (up to 30%) and catalase (up to 70%)). As result, improvement of its agrochemical indicators is revealed, including increase in content of mobile compounds

of phosphorus (on 21–31 mg/kg), exchange forms of potassium (on 32–41 mg/kg), available silicates (by 2–8 times in α -form and at 1,5–3,0 time in β -form), strengthening of nitrifying ability (on 2,6–4,1 mg/kg) and also relative persistence of maintenance of humic substances at level of control is established. Received results can be basis for introduction of bentonite in production field experiments and in subsequent for development of technology of bentonite clays use in agriculture of the Non-chernozem zone as meliorative substance, optimizing enzymatic activity of soils.

Key words: sod-podsolic sandy loamy soil (Retisols), bentonite clay, activity of hydrolase and oxide reductase enzymes to soil, indicators of soil fertility.

CITATION: Kozlov A.V., Kulikova A.H., Selitskaya O.V., Uromova I.P. Change of hydrolase and oxide reductase fermental complex activity and indicators of fertility to sod-podsolic soil under action of bentonite clay. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2019. Vol. 9. № 1. Pp. 58–78. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2019-9-1-58-78.

Введение

Выращивание сельскохозяйственных культур неизбежно сопровождается отчуждением значительного количества элементов питания на формирование урожая, вследствие чего требуется постоянное пополнение их запасов в доступной форме за счет внесения минеральных и органических удобрений. Однако их применение в необходимом количестве сдерживается дороговизной первых и большими расходами на транспортировку и внесение вторых. В связи с этим возрастает интерес к альтернативным, агрономически эффективным, экологически безопасным и экономически приемлемым источникам питательных веществ и средств мелиорации, способствующим стабилизации почвенного плодородия [Бочарникова, Матыченков, Матыченков, 2011; Pirzad, Mohammadzadeh, 2016].

В настоящее время весьма перспективными в данном отношении считаются высококремнистые породы: диатомиты, цеолиты, трепелы и бентонитовые глины. Все они способны оказывать положительное влияние на физико-химические и агрохимические свойства почв, оптимизируя их структурное состояние и кислотно-основной режим, а также фосфорное и кремниевое питание растений [Шеуджен, Шхапацев, Бочко, 2002; Агафонов, Хованский, 2014; Васильева, 2017], вследствие чего повышается урожайность культур и качество получаемой продукции [Куликова, 2010; Лобода, Багдасаров, Фицура, 2014; Гаплаев, 2015; Эффективность природного высококремнистого цеолита..., 2016]. Однако в настоящее время недостаточно сведений, позволяющих раскрыть механизм

их воздействия на систему «почва – растение» и, прежде всего, на биологическую активность почвы и ее ферменты, в конечном итоге определяющих трансформацию всех веществ, поступающих в почву, и ее эффективное плодородие.

Ферменты играют важнейшую роль в биохимических процессах, происходящих в почве, а также определяют стабильность ее некоторых экологических функций [Добровольский, Никитин, 2012]. В почве присутствуют и функционируют системы ферментов, последовательно осуществляющих биохимические реакции, которые являются основой большинства процессов синтеза и превращения веществ [Заварзин, 2014]. На биогеохимическом уровне активность ферментов определяет судьбу поступающего в почву органического вещества. На экологотрофическом уровне за счет ферментативной активности почвы устанавливается стабильность сукцессионного перехода пищевого субстрата от одних консорциев почвенных микроорганизмов к другим [Bowles et al., 2014; Экология..., 2015]. За счет данных процессов в почвах формируется запас стабильных гуминовых продуктов и подвижных минеральных компонентов, определяющих питание и устойчивость растений, а также динамическую стабильность окислительно-восстановительных процессов между коллоидами почвы и ее жидкой фазой [Микробное сообщество..., 2001; Kalembasa, Symanowicz, 2012; Козлов, Селицкая, 2015; Жербак, Ерема, Бахар, 2016]. При этом в круговороте углерода в почве ведущую роль играют ферменты из классов оксидоредуктаз и гидролаз, которые характеризуют окислительно-восстановительные условия в почве и определяют интенсивность процессов минерализации органических веществ [Использование биологических параметров..., 2010; Применение показателей ферментативной активности..., 2013; Влияние севооборотов..., 2013].

Вышесказанное определило цель наших исследований – изучить влияние высоких доз бентонитовой глины на активность гидролазных и оксидоредуктазных ферментов и плодородие дерново-подзолистой почвы.

Материал и методы исследования

Объектами исследований являлись:

1. Дерново-подзолистая среднедерновая неглубокоподзоленная неоглеенная легкосуглинистая почва, образованная на покровном суглинке (по [Наумов, 2016] – тип дерново-элювозем типичный AY-EL-D(C)). Основные агрохимические характеристики почвы следующие: обменная кислотность (pH_{KCl}) 4,8; гидролитическая кислотность (H_T) 2,83 мг-экв./100 г; содержание $C_{орг}$ (по Тюрину [см. Мамонтов, Гладков,

2015]) 0,7%, нитратной формы азота (по Кравкову [см. Минеев, 2001]) 4,9 мг/кг; подвижных соединений фосфора и калия (по Кирсанову [Там же]) 86 и 110 мг/кг соответственно; актуальных и потенциальных соединений кремния (по Матыченкову [Подвижные кремниевые соединения..., 2016]) 16 и 213 мг/кг; обменных соединений кальция и магния 5,10 и 1,17 мг-экв./100 г. Степень насыщенности почвы основаниями (Vs) составляла 69%.

2. Бентонитовая глина (Зырянское месторождение Курганской области). В составе породы доминируют кальциево-магниевый монтмориллонит (более 65%) и карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов (более 10%) [Мосталыгина, Елизарова, Костин, 2010]. Валовой состав бентонита (от производителя – ООО «Бентонит Кургана») представлен следующими компонентами (%): SiO_2 – 52,3, CaO – 5,50, MgO – 3,20, P_2O_5 – 0,12, K_2O – 0,92, Na_2O – 0,78, SO_3 – 0,10, Al_2O_3 – 19,4, $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ – 6,91, TiO_2 – 0,15, ППП (потеря при прокаливании) – 9,4; комплекс подвижных соединений включает (мг/кг): SiO_2 – 10500, Mg^{2+} – 14, Ca^{2+} – 46, Na^+ – 6, P_2O_5 – 165, K^+ – 87; емкость катионного обмена – 80–150, коэффициент щелочности – 0,11.

Схема микрополевого опыта включала 4 варианта:

- 1) контроль (без внесения бентонитовой глины);
- 2) внесение в почву бентонитовой глины из расчета 3 т/га (B_1);
- 3) бентонитовая глина 6 т/га (B_2);
- 4) бентонитовая глина 12 т/га (B_3).

Породу вносили в пахотный горизонт однократно в 2014 г.

Опыт проведен со строгим соблюдением методических требований по микрополевым исследованиям [Доспехов, 2011]. Учетная площадь делянки 1 м², расположение их рендомизированное, повторность в опыте четырехкратная. Опытный участок располагался в Борском районе Нижегородской области на территории предприятия по разведению элитных сортов картофеля ООО «Элитхоз». В период проведения эксперимента выращивали сельскохозяйственные культуры: озимую пшеницу (*Triticum aestivum* L.) сорта *Московская 39* (2015 г.), ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта *Велес* (2016 г.) и горох посевной (*Pisum sativum* L.) сорта *Чушминский 95* (2017 г.). Данные сорта районированы по Волго-Вятскому региону.

Агрохимические показатели почвы опытного участка определяли из высушенных образцов по общепринятым, в том числе стандартизированным методам [Минеев, 2001; Мамонтов, Гладков, 2015], отобранных в период закладки опыта, а также при отборе проб на биохимические анализы. Активность ферментов рассчитывали на абсолютно сухую почву.

Для определения ферментативной активности почвенные образцы отбирали непосредственно после уборки культур из гумусо-аккумулятивного (пахотного) горизонта равномерно с глубины 15 см и в свежем виде анализировали в течение 2–3 дней. Образцы отбирали методом конверта из пяти точек с делянки, соединяя их в один объединенный образец общей массой 1 кг. Погодные условия отбора проб почвы соответствовали среднеклиматическим нормам региона.

В отобранных образцах определяли активность основных ферментов из класса гидролаз и оксидоредуктаз [Хазиев, 2005]: протеазы (пептидилпептидгидролазы, код фермента по классификации Международного союза биохимии и молекулярной биологии – КФ 3.4.4) – спектрофотометрическим нингидриновым методом Галстяна и Арутюнян, инвертазы (β -D-фруктофуранозид-фруктогидролаза, КФ 3.2.1.26) – гравиметрическим методом Купревича и Щербаковой с реактивом Феллинга, целлюлазы (β -1,4-глюкан-глюкогидролаза, КФ 3.2.1.4) – спектрофотометрическим антроновым методом Багнюка и Щетинской, общей фосфатазы (фосфогидролазы моноэфиров ортофосфорной кислоты, КФ 3.1.3.1 и КФ 3.1.3.2) – спектрофотометрическим методом Галстяна с *n*-нитрофенилфосфатом Na, полифенолоксидазы (о-дифенол: кислород-оксидоредуктаза, КФ 1.10.3.1) и пероксидазы (донор: H_2O_2 -оксидоредуктаза, КФ 1.11.1.7) – титриметрическими пирокатехиновыми методами Козлова, катазалы (H_2O_2 : H_2O_2 -оксидоредуктаза, КФ 1.11.1.6) – газометрическим методом Галстяна.

Аналитическая часть исследований выполнена на базе лабораторного комплекса «Эколого-аналитическая лаборатория мониторинга и защиты окружающей среды» и научно-образовательного центра «Биотехнология» Мининского университета в период 2014–2017 гг. Полученные данные обрабатывали методом вариационного анализа с применением программного пакета Excel 2007.

Результаты исследования и их обсуждение

Данные таблицы 1 отражают изменения в ферментативной активности дерново-подзолистой почвы, происходившие под действием различных доз бентонитовой глины.

Применение бентонита не способствовало увеличению активности инвертаз почвы, отвечающих за разложение простых углеводистых веществ. Однако в отношении процесса биохимической деструкции клетчатки целлюлозолитическая ферментативная активность в почве под действием бентонитовой глины увеличивалась в наибольшей степени.

Таблица 1

**Активность ферментов в дерново-подзолистой почве
в зависимости от дозы бентонитовой глины**
[Enzyme activity in sod-podzolic soil
depending on the dose of bentonite clay]

Вариант [Variant]	Динамика ферментативной активности по годам исследования [Dynamics of enzyme activity by year of research]						В среднем за 3 года [Average for 3 years]
	2015 г.		2016 г.		2017 г.		
	M ± m	V	M ± m	V	M ± m	V	
Протеазная активность, мг глицина / 1 г почвы / 24 ч. [Protease activity, mg glycine / 1 g soil / 24 h.]							
Контроль [Control]	2,12 ± 0,02	2	3,21 ± 0,04	2	3,96 ± 0,05	3	3,10
Б ₁ , 3 т/га	3,39 ± 0,05	3	4,19 ± 0,03	1	5,06 ± 0,05	2	4,21
Б ₂ , 6 т/га	4,81 ± 0,06	2	5,93 ± 0,05	2	7,20 ± 0,08	2	5,98
Б ₃ , 12 т/га	3,50 ± 0,05	3	5,77 ± 0,06	2	7,44 ± 0,10	3	5,57
F _f	482,10		1150,67		731,48		–
Инвертазная активность, мг глюкозы / 1 г почвы / 24 ч. [Invertase activity, mg glucose / 1 g soil / 24 h.]							
Контроль [Control]	8,66 ± 0,07	2	9,73 ± 0,06	1	9,89 ± 0,10	2	9,43
Б ₁ , 3 т/га	8,72 ± 0,20	5	9,84 ± 0,10	2	9,99 ± 0,20	4	9,52
Б ₂ , 6 т/га	8,81 ± 0,15	3	9,97 ± 0,11	2	10,15 ± 0,05	1	9,64
Б ₃ , 12 т/га	8,84 ± 0,21	5	10,01 ± 0,25	5	10,24 ± 0,05	1	9,70
F _f	0,26		0,96		1,66		–
Целлюлазная активность, мкг глюкозы / 10 г почвы / 48 ч. [Cellulase activity, µg glucose / 10 g soil / 48 h.]							
Контроль [Control]	16,4 ± 0,4	5	10,1 ± 0,4	7	9,6 ± 0,4	7	12,0
Б ₁ , 3 т/га	36,6 ± 0,5	3	28,3 ± 0,5	4	15,7 ± 0,9	11	26,9
Б ₂ , 6 т/га	39,0 ± 0,9	5	37,8 ± 0,5	3	23,0 ± 0,5	4	33,3
Б ₃ , 12 т/га	40,2 ± 0,8	4	39,0 ± 0,6	3	26,5 ± 1,0	8	35,2
F _f	426,43		780,48		147,93		–

Продолжение табл. 1

Вариант [Variant]	Динамика ферментативной активности по годам исследования [Dynamics of enzyme activity by year of research]						В среднем за 3 года [Average for 3 years]
	2015 г.		2016 г.		2017 г.		
	M ± m	V	M ± m	V	M ± m	V	
Фосфатазная активность, мг P₂O₅ / 1 г почвы / 30 мин [Phosphatase activity, mg P ₂ O ₅ / 1 g soil / 30 min]							
Контроль [Control]	3,26 ± 0,12	7	5,07 ± 0,16	6	5,78 ± 0,12	4	4,70
Б ₁ , 3 т/га	4,14 ± 0,09	4	7,22 ± 0,10	3	8,60 ± 0,15	3	6,65
Б ₂ , 6 т/га	5,36 ± 0,10	4	9,90 ± 0,06	1	11,46 ± 0,09	2	8,91
Б ₃ , 12 т/га	6,98 ± 0,12	3	12,53 ± 0,14	2	13,78 ± 0,23	3	11,10
F _f	195,80		853,15		417,37		–
Полифенолоксидазная активность, мл 0,01 Н раствора I₂ / 1 г почвы / 2 мин [Polyphenol oxidase activity, ml of 0.01 N solution of I ₂ / 1 g soil / 2 min]							
Контроль [Control]	4,14 ± 0,04	2	5,23 ± 0,04	1	5,01 ± 0,07	3	4,79
Б ₁ , 3 т/га	4,40 ± 0,04	2	5,99 ± 0,06	2	6,29 ± 0,06	2	5,56
Б ₂ , 6 т/га	4,56 ± 0,05	2	6,36 ± 0,15	5	6,81 ± 0,10	3	5,91
Б ₃ , 12 т/га	4,61 ± 0,08	3	6,48 ± 0,09	3	7,17 ± 0,06	2	6,09
F _f	14,64		34,33		125,68		–
Пероксидазная активность, мл 0,01 Н раствора I₂ / 1 г почвы / 2 мин [Peroxidase activity, ml of 0.01 N solution I ₂ / 1 g soil / 2 min]							
Контроль [Control]	5,71 ± 0,10	4	6,12 ± 0,06	2	6,04 ± 0,06	2	5,96
Б ₁ , 3 т/га	5,74 ± 0,13	4	6,14 ± 0,05	2	6,01 ± 0,07	2	5,96
Б ₂ , 6 т/га	5,63 ± 0,14	5	5,91 ± 0,07	2	5,80 ± 0,07	3	5,78
Б ₃ , 12 т/га	5,60 ± 0,13	5	5,80 ± 0,07	2	5,72 ± 0,08	3	5,71
F _f	0,30		8,99		5,66		–

Окончание табл. 1

Вариант [Variant]	Динамика ферментативной активности по годам исследования [Dynamics of enzyme activity by year of research]						В среднем за 3 года [Average for 3 years]
	2015 г.		2016 г.		2017 г.		
	M ± m	V	M ± m	V	M ± m	V	
Каталазная активность, мл O₂ / 1 г почвы / 1 мин [Catalase activity, ml O ₂ / 1 g soil / 1 min]							
Контроль [Control]	3,2 ± 0,1	5	2,6 ± 0,1	5	1,5 ± 0,1	9	2,4
Б ₁ , 3 т/га	3,6 ± 0,1	4	3,0 ± 0,1	4	1,7 ± 0,1	6	2,8
Б ₂ , 6 т/га	4,9 ± 0,2	8	3,4 ± 0,1	4	2,5 ± 0,1	6	3,6
Б ₃ , 12 т/га	5,1 ± 0,1	3	4,0 ± 0,1	7	3,3 ± 0,1	4	4,1
F _f	66,23		43,48		212,33		–

Примечание. Здесь и далее: M ± m – среднее арифметическое ± ошибка среднего значения; V – коэффициент вариации (%); F_f – расчетный критерий Фишера в сравнении вариантов при статистическом уровне значимости p < 0,05; F_t = 3,86 – теоретический критерий Фишера при η₁ = 3 и p < 0,05.

Note. Here and below: M ± m – arithmetic average ± mean error; V is the coefficient of variation (%); F_f is the calculated Fisher criterion in the comparison of variants with a statistical significance level of p < 0.05; Ft = 3.86 is the theoretical Fisher criterion with η₁ = 3 and p < 0.05.

Высокое развитие целлюлазной активности в почве приходилось на 2-й год исследования, где при минимальной дозе материала показатель повышался в 2,8 раз, а при средней и максимальной дозах – в 3,7 и 3,9 раза соответственно. В целом за годы исследования целлюлазная активность под действием глины повышалась от слабого до среднего уровня.

По-видимому, столь существенное увеличение активности целлюлаза в почве было обусловлено привнесением в почвенный раствор с породой значительного количества мобильных минеральных веществ, в первую очередь – соединений кремния, калия и кальция, являющихся сопутствующим питательным субстратом микроорганизмов-гетеротрофов [Самсонова, 2005; Matichenkov, Vocharnikova, 2012].

Кроме того, велика вероятность оптимизации агрофизических свойств почвы под действием высоких доз глины [Агафонов, Хованский, 2014], что, как известно, способствует оптимизации условий обитания

микроорганизмов, адсорбированных на поверхности внутри почвенных агрегатов [Гарбуз, Ярославцева, Холодов, 2016].

Протеазная активность почвы также усиливалась под действием бентонита – в наибольшей степени в 1-й год исследования в варианте B_2 . Пролонгированность действия материала сохранялась в течение всех трех лет, однако эффект в активизации протеолитического комплекса почвы со временем несколько снижался во всех вариантах за исключением варианта B_3 . В среднем за три года активность протеаз в почве возрастала под действием породы от среднего до высокого уровня или на 36, 93 и 80% соответственно.

Действие бентонитовой глины на общую активность фосфатаз в почве повышалось в течение первых двух лет, поскольку в одном и том же варианте эффект показателя от дозы породы увеличивался ко 2-му году. В частности, если в 2015 г. в вариантах B_1 , B_2 и B_3 активность ферментов увеличивалась соответственно на 27, 64 и 114%, то в 2016 г. положительное действие оказалось еще сильнее: соответственно на 42, 95 и 147% по отношению к контролю.

Вполне вероятно, что для биохимической деградации вещества породы микроорганизмам-фосфатредуцентам необходимо активное выделение в среду фосфатазных ферментов [Kalembasa, Symanowicz, 2012; Заварзин, 2014].

Активность полифенолоксидаз и пероксидаз почвы в вариантах исследования изменялась взаимно обратно. Так, если полифенолоксидазная активность увеличивалась как от дозы бентонита, так и во времени его действия в каждом из вариантов (в среднем за 3 года соответственно на 16, 23 и 27%), то показатель пероксидазной активности в почве снижался до 2% в 1-й год и до 5% на 2-й и 3-й годы исследования.

Значительная вариабельность как уровня каталазной активности почвы по годам опыта, так и эффекта действия на нее вещества породы, очевидно, были обусловлены в том числе физиологическими особенностями корневой системы конкретного агрофитоценоза. В целом по опыту была отмечена активизация каталазы в почве под действием глины от слабого до среднего уровня, которая в среднем по 3-м годам увеличивалась на 50–71% соответственно от применения 6 и 12 т/га материала.

Описанная выше существенность действия бентонита на ферментативную активность дерново-подзолистой почвы, вероятно, была опосредованно обусловлена как значительным запасом питательных веществ во вносимом материале, наличием в его составе ионообменных соединений Ca^{2+} и Mg^{2+} , оптимизирующих реакцию почвенной среды и агрегированность почвенных частиц, так и его минералогическим составом.

Поскольку глинистые минералы обладают каталитическими свойствами по отношению к процессам трансформации различных веществ [Рычагов, Соколов, Чернов, 2010], в условиях внесения породы в больших дозах ее действие в почве расценивается уже не столько с позиции удобрения, повышающего мобильный фонд питательных веществ, сколько с позиции мелиоранта, стабилизирующего минеральную часть почвы, а также динамику процессов в ее почвенно-поглощающем и почвенно-биотическом комплексах. В данном случае под стабилизацией твердой фазы дерново-подзолистой почвы понимается ее частичное восполнение минералами группы смектитов, обладающих высокой ионообменной емкостью, но эволюционно элювируемых из дневных горизонтов профиля за счет процессов подзолообразования и лессиважа [Чижикова, Прокашев, 2016]. Кроме того, взаимодействие бентонитовой глины с почвой сопровождается постепенным растворением карбонатов Ca, Mg и Na [Соколова, Толпешта, Топунова, 2013], в значительном количестве присутствующих в бентоните, что, в свою очередь, обуславливает нейтрализацию избыточной кислотности почвы и насыщение почвенного поглощающего комплекса (ППК) обменными основными катионами.

Как было ранее указано, биохимическая активность гидролазных и оксидоредуктазных ферментов вносит большой вклад в кинетику и интенсивность многих деструкционных и окислительно-восстановительных процессов в почвах. Вследствие чего внесение в почву различных удобрений, потенциально податливых к биохимическому разложению, способствует определенному сдвигу активности работы ферментов, что, в свою очередь, может изменять мобильный фонд элементов, необходимых для питания агрофитоценозов.

Применение бентонита способствовало оптимизации питательных свойств почвы в виде положительного действия на содержание подвижных соединений фосфора и калия, а также на ее нитрифицирующую способность и содержание в ней специфического органического вещества (табл. 2).

В опыте прослежено пролонгированное действие глинистого материала на содержание обменных форм калия в почве. В течение исследования эффект от влияния бентонитовой породы на показатель увеличивался во всех вариантах: B₁ – с 4 до 28%, B₂ – с 16 до 46%, B₃ – с 19 до 42%.

В отношении содержания подвижных соединений фосфора в почве такая закономерность фиксировалась только в варианте с внесением в почву 3 т/га глины (с 14 до 22%). В среднем за три года влияние

бентонита на содержание мобильного калия и фосфатов в почве способствовало ее переходу из средней в повышенную группу по обеспеченности данными элементами питания, что является существенным положительным признаком, характеризующим удобрительную ценность бентонитовой глины.

Таблица 2

**Показатели плодородия дерново-подзолистой почвы
в зависимости от дозы бентонитовой глины**

**[Fertility indicators of sod-podzolic soil depending
on the dose of bentonite clay]**

Вариант [Variant]	Динамика показателя по годам исследования [Dynamics of the indicator by year of research]						В среднем за 3 года [Average for 3 years]
	2015 г.		2016 г.		2017 г.		
	M ± m	V	M ± m	V	M ± m	V	
Содержание подвижных соединений фосфора, мг P₂O₅ / кг почвы [Content of mobile phosphorus compounds, mg P₂O₅ / kg of soil]							
Контроль [Control]	90 ± 2	5	86 ± 1	3	81 ± 2	6	86
Б ₁ , 3 т/га	103 ± 5	10	101 ± 2	4	99 ± 1	2	101
Б ₂ , 6 т/га	121 ± 4	7	114 ± 2	4	102 ± 2	4	112
Б ₃ , 12 т/ га	119 ± 2	3	106 ± 2	5	100 ± 4	8	108
F _f	12,74		30,82		12,73		–
Содержание обменных соединений калия, мг K₂O / кг почвы [Content of exchangeable potassium compounds, mg K₂O / kg of soil]							
Контроль [Control]	107 ± 4	7	92 ± 2	3	89 ± 3	6	96
Б ₁ , 3 т/га	111 ± 5	8	110 ± 3	6	114 ± 4	7	112
Б ₂ , 6 т/га	124 ± 6	9	121 ± 2	3	130 ± 3	5	125
Б ₃ , 12 т/ га	127 ± 6	10	124 ± 2	3	126 ± 3	5	126
F _f	2,64		32,94		58,54		–

Окончание табл. 2

Вариант [Variant]	Динамика показателя по годам исследования [Dynamics of the indicator by year of research]						В среднем за 3 года [Average for 3 years]
	2015 г.		2016 г.		2017 г.		
	M ± m	V	M ± m	V	M ± m	V	
Нитрифицирующая активность, мг NO₃ / кг почвы / 14 суток [Nitrifying activity, mg NO ₃ / kg of soil / 14 days]							
Контроль [Control]	5,2 ± 0,2	6	4,5 ± 0,2	9	5,6 ± 0,2	8	5,1
Б ₁ , 3 т/га	6,9 ± 0,1	4	7,9 ± 0,2	5	8,4 ± 0,2	6	7,7
Б ₂ , 6 т/га	7,8 ± 0,3	8	8,6 ± 0,2	6	9,5 ± 0,2	4	8,6
Б ₃ , 12 т/га	6,5 ± 0,2	5	8,3 ± 0,1	3	9,9 ± 0,3	6	8,2
F _f	23,39		80,80		55,47		–
Содержание C_{орг}, % [Content of organic carbon, %]							
Контроль [Control]	0,70 ± 0,01	2	0,72 ± 0,01	2	0,71 ± 0,02	2	0,71
Б ₁ , 3 т/га	0,71 ± 0,02	3	0,74 ± 0,02	2	0,73 ± 0,01	2	0,73
Б ₂ , 6 т/га	0,73 ± 0,01	1	0,75 ± 0,01	1	0,74 ± 0,02	3	0,74
Б ₃ , 12 т/га	0,74 ± 0,02	2	0,75 ± 0,01	2	0,74 ± 0,01	1	0,74
F _f	6,66		4,18		6,37		–

Нитрифицирующая способность почвы под влиянием бентонитового материала также переходила из низкой в среднюю степень активности, его максимальное действие на показатель установлено на 2-й год (на 75, 91 и 84% соответственно по вариантам). В целом за три года наилучший эффект выявлен в варианте с внесением в почву 6 т/га породы, где увеличение показателя составило 69% по отношению к контролю.

Важно указать на стабилизирующее действие бентонита в отношении содержания углерода гумусовых веществ в почве: в опыте установлено слабое положительное действие материала на данный показатель. С учетом того, что опыт закладывался без внесения органических

удобрений, а испытуемая глина не является носителем органических компонентов, но содержит кальций в ионообменной растворимой форме, вполне вероятно, что при взаимодействии почвы с бентонитом происходит закрепление органического вещества в форме гуматов кальция, что, в свою очередь, сдерживает минерализацию гумусовых компонентов в почве [Perry, Keeling-Rucker, 2000].

Поскольку бентонитовая глина содержит в своем составе значительное количество кремния, в опыте прослежено изменение содержания в почве его подвижных соединений, происходящее под действием породы (рис. 1).

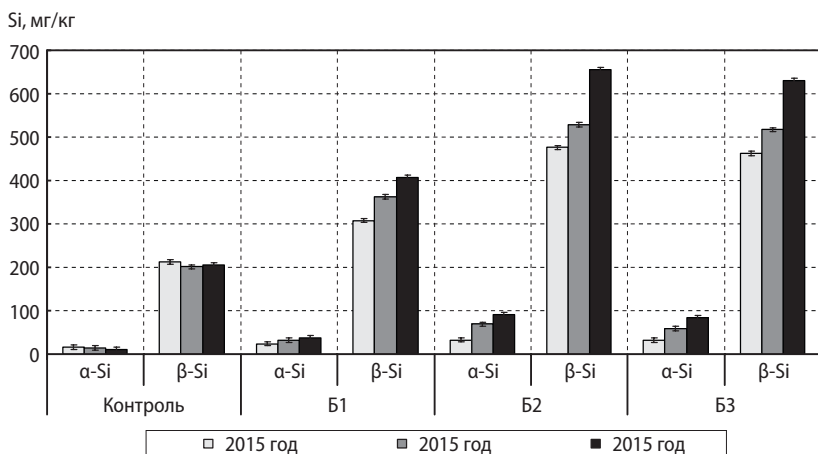


Рис. 1. Содержание актуальных (α -Si) и потенциальных (β -Si) соединений кремния в почве в зависимости от дозы бентонитовой глины, 2015–2017 гг.

F_{α} α -форма/ β -форма: 1-й год – 29,24/116,10; 2-й год – 158,11/1161,22; 3-й год – 326,49/775,34; F_{α} = 3,86 – теоретический критерий Фишера при $n_1 = 3$ и $p < 0,05$

Fig. 1. Content of actual (α -Si) and potential (β -Si) silicon compounds in the soil, depending on the dose of bentonite clay, 2015–2017

F_{β} α -form / β -form: 1st year – 29.24 / 116.10; 2nd year – 158.11 / 1161.22; 3rd year – 326.49 / 775.34; F_{β} = 3.86 is the theoretical Fisher criterion with $n_1 = 3$ and $p < 0.05$

Установлено положительное пролонгированное влияние материала на содержание в почве обеих форм подвижного кремния. В частности, содержание актуальных соединений кремния (в виде монокремниевой кислоты), переходящих в водную вытяжку, в варианте B_1 увеличилось от 50% в 2015 г. до 3,5 раз в 2017 г. по отношению к контрольным

значениям. Наибольшее действие на данный показатель бентонитовая глина оказала в варианте Б₂, где увеличение содержания α -Si относительно контроля по годам исследования составило 2,1, 4,9 и 8,3 раза соответственно.

Накопление в почве потенциальных форм кремния, переходящих в солянокислую вытяжку, имело аналогичный, но несколько сдержанный вид. В среднем за три года содержание β -Si в почве увеличивалось до 2,6–2,7 раз в вариантах Б₂ и Б₃ соответственно. Очевидно, что такой уровень увеличения обоих показателей был обусловлен привнесением в почву значительного количества аморфных силикатов, активно переходящих в почвенный раствор в виде монокремниевой кислоты и различных силикат-анионов, чему явно способствовала исходная избыточная кислотность почвы, а также биохимическая активность ее ферментов.

В целом за три года по обеспеченности доступными соединениями кремния под действием породы почва перешла из среднедефицитного уровня баланса в бездефицитный по α -форме и из среднедефицитного уровня баланса в низкодефицитный по β -форме [Подвижные кремниевые соединения..., 2016].

Выводы

1. Дерново-подзолистые малогумусированные почвы имеют относительно неблагоприятный питательный режим и низкий уровень ферментативной активности. Для оптимизации показателей эффективного плодородия дерново-подзолистых почв и активизации их ферментов необходимо применение материалов, обладающих комплексным удобрительным и мелиорирующим эффектом. Внесение высоких доз (от 3 до 12 т/га) бентонитовой глины в рассматриваемые почвы может способствовать увеличению ее биологической активности и улучшению питательных свойств пашни.

2. Применение бентонитовой глины на дерново-подзолистой почве способствовало увеличению ее протеазной (почти в 2 раза), целлюлазной и фосфатазной (более чем в 2 раза), а также полифенолоксидазной (на 27%) и каталазной (на 71%) ферментативной активности.

3. Внесение 6 т/га глинистого материала на 69% повышало нитрифицирующую активность почвы, а также увеличивало содержание в ней подвижных соединений фосфора и калия в равной степени на 30%. Содержание доступных форм кремния в почве от действия глины повышалось более чем в 4 раза по водорастворимой форме (монокремниевая кислота) и более чем в 2 раза – по кислоторастворимой форме.

Пролонгированное в течение 3-х лет взаимодействие породы с почвой способствовало сдерживанию минерализации органического вещества в ее пахотном слое.

4. Изучение рассматриваемого материала целесообразно продолжить, включая оценку баланса химических элементов в агроэкосистемах, а также контроль за изменением агрофизических, агрохимических и биологических свойств почв.

Библиографический список / References

Агафонов Е.В., Хованский М.В. Влияние бентонита на повышение плодородия чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2014. № 5. С. 597–601. DOI: 10.7868/S0032180X14050025 [Agafonov E.V., Khovansky M.V. Influence of bentonite on increase in fertility of chernozem ordinary. *Soil Science*. 2014. № 5. Pp. 597–601. DOI: 10.7868/S0032180X14050025]

Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Матыченков И.В. Кремниевые удобрения и мелиоранты: история изучения, теория и практика применения // Агрохимия. 2011. № 7. С. 84–96. [Bocharnikova E.A., Matychenkov V.V., Matychenkov I.V. Silicon fertilizers and ameliorants: Studying history, theory and practice of application. *Agrochemistry*. 2011. № 7. Pp. 84–96.]

Васильева Н.Г. Оценка эффективности трепела как почвенного мелиоранта // Проблемы агрохимии и экологии. 2017. № 3. С. 24–30. [Vasilyeva N.G. Assessment of efficiency of bergmeal as soil ameliorant. *Problem of agrochemistry and ecology*. 2017. № 3. Pp. 24–30.]

Влияние севооборотов, промежуточных посевов и органических удобрений на ферментативную активность почвы и содержание гумуса в органическом земледелии / Марцинкявичене А., Богужас В., Балните С. и др. // Почвоведение. 2013. № 2. С. 219–225. DOI: 10.7868/S0032180X1302010X [Martsinkyavichene A., Boguzhas V., Balnite S., Pupalene R., Velichka R. Influence of crop rotations, intermediate crops and organic fertilizers on soil enzymatic activity and maintenance of humus in organic agriculture. *Soil Science*. 2013. № 2. Pp. 219–225. DOI: 10.7868/S0032180X1302010X]

Гаплаев М.Ш. Эффективность органических удобрений и цеолитов при выращивании свеклы столовой (*Beta vulgaris* L.) // Проблемы агрохимии и экологии. 2015. № 1. С. 37–41. [Gaplayev M.Sh. Efficiency of organic fertilizers and zeolites at cultivation of table beet (*Beta vulgaris* L.). *Problems of agrochemistry and ecology*. 2015. № 1. Pp. 37–41.]

Гарбуз С.А., Ярославцева Н.В., Холодов В.А. Ферментативная активность внутри и снаружи водоустойчивых агрегатов в почвах разного вида использования // Почвоведение. 2016. № 3. С. 398–407. DOI: 10.7868/S0032180X16030035 [Garbuz S.A., Yaroslavtseva N.V., Holodov V.A. Enzymatic activity in and outside of waterproof units in soils of different type use. *Soil Science*. 2016. № 3. Pp. 398–407. DOI: 10.7868/S0032180X16030035]

Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М., 2012. [Dobrovolskii G.V., Nikitin E.D. *Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv* [Ecology of soils. Doctrine about ecological functions of soils]. Moscow, 2012.]

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М., 2011. [Dospikhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Technique of field experiment (with bases of statistical processing of researches results)]. Moscow, 2011.]

Жербак И.С., Ерема И.А., Бахар Ю.А. Влияние фунгицидов, фосфорной муки, кислотности почвы на интенсивность микоризации клематиса Тангутского // Социально-экологические технологии. 2016. № 3. С. 20–30. [Zherbak I.S., Erema I.A., Bahar Yu.A. Influence of fungicides, phosphoric flour, acidity of soil on intensity of mikorization of clematis Tangut. *Social and ecological technologies*. 2016. № 3. Pp. 20–30.]

Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М., 2014. [Zavarzin G.A. Lektzii po prirodovedcheskoi mikrobiologii [Lectures on naturalists' microbiology]. Moscow, 2014.]

Использование биологических параметров для оценки окультуренности серых лесных почв / Полякова Н.В., Платонычева Ю.Н., Володина Е.Н., Нарчев М.А. // Плодородие. 2010. № 4. С. 40–41. [Polyakova N.V., Platonychева Yu.N., Volodina E.N., Narchev M.A. Use of biological parameters for assessment of level culture of gray forest soils. *Fertility*. 2010. № 4. Pp. 40–41.]

Козлов А.В., Селицкая О.В. Значение микроорганизмов в поддержании устойчивости почв к воздействию антропогенных факторов // Вестник Мининского университета. 2015. № 3 (11). С. 27. [Kozlov A.V., Selitskaya O.V. Value of microorganisms in maintenance of soils resistance to influence of anthropogenic factors. *Vestnik of Minin University*. 2015. № 3 (11). P. 27.]

Куликова А.Х. Влияние высококремнистых пород как удобрений сельскохозяйственных культур на урожайность и качество продукции // Агрохимия. 2010. № 7. С. 18–25. [Kulikova A.H. Influence of high-siliceous breeds as fertilizers of crops on productivity and quality of products. *Agrochemistry*. 2010. № 7. Pp. 18–25.]

Лобода Б.П., Багдасаров В.Р., Фицура Д.Д. Влияние удобрения на основе цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения на урожайность и качество картофеля // Агрохимия. 2014. № 3. С. 28–35. [Loboda B.P., Bagdasarov V.R., Fitsuro D.D. Influence of fertilizer on basis of zeolite bergmeals of the Hotynetsky field on productivity and quality of potatoes. *Agrochemistry*. 2014. № 3. Pp. 28–35.]

Мамонтов В.Г., Гладков А.А. Практикум по химии почв. М., 2015. [Mamontov V.G., Gladkov A.A. Praktikum po khimii pochv [Workshop of soils chemistry]. Moscow, 2015.]

Микробное сообщество и анализ почвенно-микробиологических процессов в дерново-подзолистой почве / Кутузова Р.С., Сирота Л.Б., Орлова О.В., Воробьев Н.И. // Почвоведение. 2001. № 3. С. 320–332. [Kutuzova R.S., Sirota L.B., Orlova O.V., Vorobyov N.I. Microbic community and analysis of soil and microbiological processes in cespitose-podsolic soil. *Soil Science*. 2001. № 3. Pp. 320–332.]

Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. М., 2001. [Mineev V.G. Praktikum po agrokhimii [Workshop on agrochemistry]. Moscow, 2001.]

Мостальгина Л.В., Елизарова С.Н., Костин А.В. Bentonитовые глины Зауралья: экология и здоровье человека. Курган, 2010. [Mostalygina L.V., Elizarova S.N., Kostin A.V. Bentonitovye gliny Zaural'ya: ekologiya i zdorov'e cheloveka [Bentonite clays of the Trans-Ural region: Ecology and human health]. Kurgan, 2010.]

Наумов В.Д. География почв. Почвы России. М., 2016. [Naumov V.D. Geografiya pochv. Pochvy Rossii [Geography of soils. Soils of Russia]. Moscow, 2016.]

Подвижные кремниевые соединения в системе почва–растение и методы их определения / Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П. и др. // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2016. № 3. С. 37–46. [Matychenkov I.V., Homyakov D.M., Pakhnenko E.P., Vocharnikova E.A., Matychenkov V.V. Mobile silicon connections in system soil–plant and methods of their definition. *Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2016. № 3. Pp. 37–46.]

Применение показателей ферментативной активности при оценке состояния почв под сельскохозяйственными угодьями / Даденко Е.В., Прудникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3 (4). С. 1274–1277. [Dadenko E.V., Prudnikova M.A., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Application of enzymatic activity indicators at assessment of soils condition under agricultural grounds. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013. Vol. 15. № 3 (4). Pp. 1274–1277.]

Рычагов С.Н., Соколов В.Н., Чернов М.С. Гидротермальные глины как высокодинамичная коллоидно-дисперсная минералого-геохимическая система // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435. № 6. С. 806–809. [Rychagov S.N., Sokolov V.N., Chernov M.S. Hydrothermal clays as high-dynamic colloid-dispersion mineral-geochemical system. *Reports of Sciences Academy*. 2010. Vol. 435. № 6. Pp. 806–809.]

Самсонова Н.Е. Роль кремния в формировании фосфатного режима дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2005. № 8. С. 11–18. [Samsonova N.E. Silicon role in formation of phosphatic mode of cespitose-podsolic soils. *Agrochemistry*. 2005. № 8. Pp. 11–18.]

Соколова Т.А., Толпешта И.И., Топунова И.В. Изменение бентонита в торфянисто-подзолисто-глеевой почве в условиях модельного полевого опыта // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. 2013. № 3. С. 8–18. [Sokolova T.A., Tolpeshta I.I., Topunova I.V. Change of bentonite in peaty-podsolic-gley soil in conditions of model field experiment. *Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2013. № 3. Pp. 8–18.]

Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М., 2005. [Khaziev F.Kh. *Metody pochvennoi enzimologii* [Methods of soil enzymology]. Moscow, 2005.]

Чижикова Н.П., Прокашев А.М. Минералогический состав тонкодисперсных фракций (<1, 1–5, 5–10 мкм) агродерново-подзолистых почв со сложным органомпрофилем в Вятском Прикамье // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 10–28. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-84-10-28 [Chizhikova N.P., Prokashev A.M. Mineralogical structure of fine fractions (<1, 1–5, 5–10 microns) agrocospitose-podsolic soils with difficult organic profile in the Vyatka Prikamye. *Bulletin of Dokuchayev Soil Institute*. 2016. Issue 84. Pp. 10–28. DOI: 10.19047/0136-1694-2016-84-10-28]

Шеуджен А.Х., Шхапацев А.К., Бочко Т.Ф. Влияние цеолитов на агрохимические показатели плодородия лугово-черноземной почвы и урожайность риса // Агрохимия. 2002. № 8. С. 14–20. [Sheudzhen A.H., Shkhatpatsev A.K., Bochko T.F. Influence of zeolites on agrochemical indicators of meadow-chernozem fertility soil and productivity of rice. *Agrochemistry*. 2002. № 8. Pp. 14–20.]

Экология микроорганизмов / Под ред. А.И. Нетрусова. М., 2015. [Ekologiya mikroorganizmov [Ecology of microorganisms]. A.I. Netrusova (ed.). Moscow, 2015.]

Эффективность природного высококремнистого цеолита при выращивании кукурузы в условиях западной части Центрального Нечерноземья / Самсонова Н.Е.,

Козлов Ю.В., Капустина М.В. и др. // *Агрохимия*. 2016. № 3. С. 23–31. [Samsonova N.E., Kozlov Yu.V., Kapustina M.V., Denisova I.I., Antonova N.A., Shupinskaya I.A. Efficiency of natural high-siliceous zeolite at cultivation of corn in conditions of western part of Central Non-Black Earth Region. *Agrochemistry*. 2016. № 3. Pp. 23–31.]

Bowles T.M., Acosta-Martinez V., Calderon F., Jackson L.E. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 68. № 1. Pp. 252–262. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.10.004.

Kalembasa S., Symanowicz B. Enzymatic activity of soil after applying various waste organic matter, ash and mineral fertilizers. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2012. Vol. 21 (6). Pp. 1635–1641.

Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. Influence of plant association on the silicon cycle in the soil-plant system. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2012. Vol. 10 (4). Pp. 547–560.

Perry C.C., Keeling-Rucker T. Biosilicification: The role of the organic matrix in structure control. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*. 2000. Vol. 5. Pp. 537–550. DOI: 10.1007/s007750000130.

Pirzad A., Mohammadzadeh S. Zeolite use efficiency variation under water deficit stress in grass pea and lentil. *Journal of Siberian Federal University. Series: Biology*. 2016. № 9 (3). Pp. 291–303. DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-291-303.

Статья поступила в редакцию 14.12.2018, принята к публикации 17.01.2019
The article was received on 14.12.2018, accepted for publication 17.01.2019

Сведения об авторах / About the authors

Козлов Андрей Владимирович – кандидат биологических наук; доцент кафедры экологического образования и рационального природопользования, руководитель лабораторного комплекса «Эколого-аналитическая лаборатория мониторинга и защиты окружающей среды» факультета естественных, математических и компьютерных наук, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

Kozlov Andrey V. – PhD in Biology; associate professor at the Department of Ecological Education and Rational Environmental Management; head at the Laboratory Complex «Ecology-Analytical Laboratory of Monitoring and Environment Protection» of the Faculty of Natural, Mathematical and Computer Sciences, Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3034-6566>

E-mail: a_v_kozlov@mail.ru

Куликова Алевтина Христофоровна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой почвоведения, агрохимии и агроэкологии факультета агротехнологий, земельных ресурсов и пищевых производств, Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина

Kulikova Alevtina H. – Dr. Agric. Hab.; head at the Department of Soil Science, Agrochemistry and Agroecology of the Faculty of Agrotechnologies, Land Resources and Food Productions, Stolypin Ulyanovsk State Agricultural University

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7327-3742>

E-mail: agroec@yandex.ru

Селицкая Ольга Валентиновна – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой микробиологии и иммунологии факультета почвоведения, агрохимии и экологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

Selitskaya Olga V. – PhD in Biology; head at the Department of Microbiology and Immunology of the Faculty of Soil Science, Agrochemistry and Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy

E-mail: selitskayaolga@gmail.com

Уромова Ирина Павловна – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; профессор кафедры биологии, химии и биолого-химического образования, руководитель научно-образовательного центра «Биотехнология» факультета естественных, математических и компьютерных наук, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина; заведующий лабораторией биотехнологии, ООО «Элитхоз», г. Бор Нижегородской обл.

Uromova Irina P. – Dr. Agric. Hab.; professor at the Department of Biology, Chemistry and Biological and Chemical Education, head at the Scientific and Educational Center «Biotechnology» of the Faculty of Natural, Mathematical and Computer Sciences, Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University; head at the Biotechnology Laboratory, Elitkhos Ltd, Nizhny Novgorod Region

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1000-3603>

E-mail: uromova2012@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

А.В. Козлов – общее руководство направлением исследования, планирование исследования, организация и участие в проведении полевых и лабораторных экспериментов, анализ первичных данных, участие в подготовке текста статьи

А.Х. Куликова – анализ текущего состояния исследования, анализ первичных данных, участие в подготовке текста статьи

О.В. Селицкая – консультации в области почвенной микробиологии и биохимии, анализ первичных данных, участие в подготовке текста статьи

И.П. Уромова – организация и проведение полевых экспериментов, участие в подготовке текста статьи

Contribution of the authors

A.V. Kozlov – general direction of research, planning of research, organization and participation in carrying out field and laboratory experiments, analysis of primary data, participation in the preparation of the text of the article

A.H. Kulikova – analysis of the current state of research, analysis of primary data, participation in the preparation of the text of the article

O.V. Selitskaya – consultations in the field of soil microbiology and biochemistry, analysis of primary data, participation in preparation of the text of the article

I.P. Uromova – organization and carrying out field experiments, participation in the preparation of the text of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript