

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОКРЕМНИСТЫХ ПОРОД

А. В. Козлов, А. Х. Куликова, Н. Н. Копосова

*Нижегородский государственный педагогический университет им. Козьмы Минина, Россия
Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, Россия*

Поступила в редакцию 20 апреля 2017 г.

Аннотация: Рассмотрено влияние различных кремнийсодержащих природных материалов на микробиологическую и геоэкологическую устойчивость дерново-подзолистой почвы Нижегородской области. Показано повышение стабильности процессов трансформации азотсодержащего органического вещества и оптимизации олигокарбофильной части микробного пула почвы под действием диатомита и бентонитовой глины в дозах 3 и 6 т/га. Выявлено повышение геоэкологической устойчивости почвы в виде значительного снижения содержания в ней подвижных соединений тяжелых металлов и коэффициента их концентраций, обусловленных действием кремнийсодержащих пород.

Ключевые слова: диатомит, цеолит, бентонитовая глина, дерново-подзолистая почва, микробиологическая устойчивость почвы, геоэкологическая устойчивость почвы.

Abstract: The article presents the influence of different silicon-containing naturally occurring materials on microbiological and geoeological stability of sod-podzolic soil in the Nizhny Novgorod Region. Rise of stability of nitrogen-containing organic substance transformation processes and optimization of oligocarbofile part of the soil microbic pool under the influence of white peats and bentonite clay at a dose of 3 and 6 t/ha is shown in the article. Rise of the soil geoeological stability in the form of substantial reduction of heavy metals flexible compounds content and its concentration index, stipulated by the effect of silicon-containing stone, is revealed in the article.

Key words: diatomite, zeolite, bentonite clay, sod-podzolic soil, microbiological soil stability, geoeological soil stability.

Под стабильным функционированием почвенного покрова сельскохозяйственных ландшафтов современная агроэкология определяет оптимизированную сопряженность физико-химических и микробиологических процессов почвенного тела, которая во многом устанавливает свойства эффективного плодородия пахотного горизонта и оптимально высокую продуктивность агрофитоценозов [7].

К сожалению, современная отечественная практика агрономии характеризуется снижением насыщенности полеводства минеральными и органическими удобрениями, применение которых традиционно является главным механизмом окультуривания агроландшафтов [8]. В связи с этим в настоящее время продолжается поиск и изучение

альтернативных материалов, например, природных высококремнистых пород. Их использование в качестве удобрений, мелиорантов и кондиционеров почвы позволяет значительно повышать продуктивность агрофитоценозов и их устойчивость к факторам экотопа, снижать пестицидную и минеральную нагрузку, оптимизировать состояние плодородного слоя почвы и усиливать его питательную составляющую. В частности, ряд авторов [15, 18, 25] описывает существенное положительное влияние кремниевых материалов на продуктивность и качество продукции культурных растений.

Другие исследователи [1, 3, 17] объясняют оптимизацию почвенно-поглощающего (ППК) и почвенно-биотического (ПБК) комплексов почвы посредством сложных ионно-обменных и биохимических взаимодействий с веществом опок, трепелов и различных глин.

Химический состав высококремнистых пород

Порода	Ионообменная емкость, мг-экв./100 г	Содержание элемента в оксидной форме (% на абс.-сух. вещество)					
		SiO ₂ (общ.)	SiO ₂ (аморф.)	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Диатомит	80	83,1	42,1	0,05	1,25	0,52	0,48
Цеолит	48	56,6	26,7	0,23	1,25	13,3	1,90
Бентонит	150	52,3	33,4	0,12	0,92	5,49	3,03

Однако в настоящее время недостаточно исследований, которые характеризовали бы влияние высоких доз диатомовой, цеолитовой и бентонитовой пород на бактериальное состояние почвы и ее биологическую активность и, вследствие чего, на продуктивную стабильность агрофитоценозов в условиях дерново-подзолистых почв Нечерноземной зоны России. Поскольку оптимизация ППК и ПБК является ключевым фактором формирования свойств устойчивости почв агроландшафтов, полученные данные позволяют не только понимать степень влияния кремнийсодержащих материалов на состояние эффективного плодородия почвы как на следствие, но также и на сопряженность процессов почвенно-поглощающего и микробиотического комплексов в ней как на ключевые причины.

Исследования проводили на базе картофелеводческого предприятия ООО «Элитхоз» Борского района Нижегородской области, где в 2014 году был заложен микрополевой опыт с сельскохозяйственными культурами. В первые два года исследований выращивалась озимая пшеница сорта *Московская 39* (2015 г.) и ячмень сорта *Велес* (2016 г.), на которых испытывалось влияние высоких доз различных кремнийсодержащих пород – диатомита Инзенского месторождения (Ульяновская область), цеолита Хотынецкого месторождения (Орловская область) и бентонитовой глины Зырянского месторождения (Курганская область), обобщенный химический состав которых представлен в таблице 1.

Схема опыта предусматривала вариант без пород, учитываемый в качестве контроля, а также по три варианта с внесением в почву трех доз диатомита (Д₁, Д₂, Д₃), цеолита (Ц₁, Ц₂, Ц₃) и бентонитовой глины (Б₁, Б₂, Б₃). Породы вносили однократно в летний период 2014 года в гумусо-аккумулятивный слой почвы при разбивке участка и закладке опытов в высоких (мелиоративных) дозах из расчета по 3, 6 и 12 т/га каждого вида. Агротехника выращивания культур – общепринятая для

микрополевых экспериментов, все работы проводились вручную. Учетная площадь делянки – 1 м², расположение делянок рендомизированное, биологическая повторность в опытах – четырехкратная.

Микрополевой опыт был заложен на одном участке, сложенным дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой, которая характеризуется низким содержанием гумуса (1,2%), среднекислой реакцией среды (4,8 ед. рН_{KCl}), а также средней обеспеченностью подвижными формами фосфора (86 мг/кг), калия (110 мг/кг) и кремния (16 и 213 мг/кг).

Погодные условия местности в 2015 году характеризовались несущественным количеством осадков, а сам год в целом был более жарким по сравнению со средними климатическими нормами региона. Метеоусловия 2016 года, наоборот, не отличались дефицитом осадков, а температура воздуха колебалась в пределах нормы с небольшим ее превышением в августе.

Лабораторным испытаниям подвергалась почва гумусо-аккумулятивного слоя (А₁), отобранная с делянок после уборки культур. Образцы почв высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с диаметром ячеек в 1 мм и анализировали на определение обменной кислотности почвы по ГОСТ 26483-85 [6] и на определение содержания подвижных соединений кадмия, свинца, цинка и меди в ацетатно-аммонийной вытяжке (рН = 4,8) методом инверсионной вольтамперометрии на вольтамперометре-полярографе «ТА-Lab» по ПНД Ф 16.1:2.2:3.48-06 [21]. Определение содержания органического азота в почве проводили методом мокрого озоления с отгонкой азота по Къельдалю, определение содержания органического углерода – методом Тюрина в модификации Никитина со спектрофотометрическим окончанием по Орлову-Гриндель.

Численность микроорганизмов почвы определяли дважды – в инактивированной и мобилизированной почве по методике В. Д. Мухи и Л. И. Ва-

Влияние кремнийсодержащих пород на численность аммонифицирующих и амилолитических микроорганизмов в дерново-подзолистой почве

Вариант	Микроорганизмы на МПА, $\times 10^7$ КОЕ/1 г почвы						Микроорганизмы на КАА, $\times 10^7$ КОЕ/1 г почвы					
	Инакт. почва			Мобил. почва			Инакт. почва			Мобил. почва		
	2015	2016	сред	2015	2016	сред	2015	2016	сред	2015	2016	сред
Контроль	1,24	2,18	1,71	4,83	7,64	6,24	1,38	2,33	1,86	4,92	7,86	6,39
Д ₁	1,56	2,94	2,25	5,12	7,89	6,51	1,01	2,08	1,55	4,11	7,14	5,63
Д ₂	1,63	3,18	2,41	5,24	8,38	6,81	0,82	1,51	1,17	3,86	6,69	5,28
Д ₃	1,59	3,07	2,33	5,19	8,32	6,76	0,87	1,67	1,27	4,02	6,84	5,43
Ц ₁	1,34	2,44	1,89	4,96	7,92	6,44	1,04	2,26	1,65	4,30	7,50	5,90
Ц ₂	1,39	2,60	2,00	5,03	8,00	6,52	1,01	2,18	1,59	4,20	7,32	5,76
Ц ₃	1,42	2,47	1,95	5,13	8,14	6,64	0,93	2,01	1,47	4,18	7,22	5,70
Б ₁	1,49	3,46	2,48	5,08	7,81	6,45	0,89	1,73	1,31	4,01	7,03	5,52
Б ₂	1,66	3,80	2,73	5,20	8,26	6,73	0,80	1,64	1,22	3,62	6,48	5,05
Б ₃	1,64	3,62	2,63	5,17	8,20	6,69	0,74	1,57	1,16	3,55	6,37	4,96
НСР ₀₅	0,19	0,40	–	0,34	0,65	–	0,19	0,18	–	0,38	0,58	–

сильевой [20], с помощью традиционного чашечного метода Коха. Для учета аммонификаторов использовали мясептонный агар (МПА), для учета амилолитиков – крахмало-аммиачный агар (КАА), агар Гетчинсона-Клейтона (АГК) применяли для определения численности целлюлозолитических бактерий, а голодный агар (ГА) – для учета общего количества олигокарбофилов [22].

Все анализы проведены на базе Лабораторного комплекса «Эколого-аналитическая лаборатория мониторинга и защиты окружающей среды» Мининского университета в период 2015–2017 годов, аналитическая повторность – трехкратная. Математическая обработка полученных данных проведена методом дисперсионного анализа и вариационной статистики по Б. А. Доспехову.

Известно, что жизнедеятельность сапротрофных почвообитающих микроорганизмов является одним из ключевых процессов, участвующих в генезисе почвенного профиля и, как следствие, определяющих его свойства плодородия и геоэкологической устойчивости [2, 5, 11]. Общая биогенность почвенного тела как результат направленности и интенсивности биохимических процессов ПБК, формирует не только величину эффективно плодородия пахотного горизонта, но и динамическую сопряженность процессов коллоидной системы и микробного пула, что, в свою очередь, является причиной формируемой естественной стабильности почвенного покрова [10, 13, 19].

В формировании плодородия и устойчивости почвы активное участие принимают микробные

ассоциации L- и K-стратегий жизнеобеспечения (гидролитическая и олиготрофная микробные ниши), которые последовательно сменяют друг друга в условиях трансформации органического вещества, гидролизировав его и подготавливая к процессам гумификации. Как правило, при окультуривании почв происходит снижение интенсивности процессов «быстрой» минерализации первичных органических матриц, почвенный раствор насыщается веществами для развития олиготрофной микробной консорции и стабилизируется общая биологическая активность профиля [24].

Учитывая определяющее значение деятельности микроорганизмов в процессах трансформации органических компонентов почвы и необходимость установления стабильных показателей микробиотической активности гумусо-аккумулятивного горизонта, актуальным является изучение вариативности численности сапротрофных бактерий, участвующих в деградации азотсодержащего и безазотистого органических веществ. При этом, согласно исследованиям Мухи и Васильевой (2004), анализ состояния устойчивости и активности микробиоценоза почвы должен быть двухфазным – фаза инактивированного и фаза мобилизованного микробного пула. Численность микроорганизмов, определенная из инактивированных образцов, характеризует способность почвы к сохранению микробиоценоза, то есть ее микробиологическую устойчивость. Численность, определенная из мобилизованных образцов, характеризует потенциальную микробиологическую ак-

тивность, то есть максимально возможный микробиотический запас определенной микробной ниши [20].

Поскольку в наших исследованиях процессы трансформации вещества высококремнистых пород в дерново-подзолистой почве сопряжены исключительно с ее естественным органическим веществом, возрастает необходимость отслеживания изменений в численности некоторых сапротрофных микроорганизмов N- и C-циклов в условиях инактивации и мобилизации микробного пула, которые происходят под действием изучаемых материалов.

В таблице 2 показано изменение инактивированной и мобилизированной численности аммонифицирующих и амилолитических групп микроорганизмов, происходящее под действием высококремнистых пород за 2 года исследований.

В целом нужно сказать, что взаимодействие пород с почвой способствовало повышению инактивированной численности аммонифицирующих микроорганизмов и снижало таковое по амилолитической группе бактерий. При этом повышение числа бактерий-аммонификаторов усиливалось на второй год исследований, что очевидно было связано с повышением влагообеспеченности территории и усилением действия вещества внесенных в почву материалов [18]. Наибольшее увеличение численности аммонификаторов прослеживалось от второй дозы пород – до 60 % на варианте с бентонитовой глиной, до 41 % на варианте с диатомитом и до 17 % на варианте с цеолитом по отношению к контрольным значениям.

Предполагается, что повышение числа аммонифицирующих микроорганизмов в почве напрямую связано с действием кремнийсодержащих пород на состояние ее ППК и, в частности, на кислотно-основной режим. Положительно действуя на величину обменной кислотности почвы (рис. 3), вещество пород нейтрализует почвенный раствор и тем самым создается оптимальная среда для развития сапротрофных N-гидролитиков, которым физиологически необходима слабощелочная среда [24].

Анализ численности аммонифицирующих микроорганизмов из мобилизированной почвы показал, что общая закономерность положительного влияния высококремнистых материалов на данную группу бактерий сохранялась, однако степень такого влияния была существенно ниже по отношению к инактивированной почве. Можно сказать, что мера потенциальной устойчивости микробиологических процессов разложения азот-

содержащего органического вещества в почве, оптимизируемая за счет изучаемых веществ, высока, поскольку приближена к таковой, определенной из инактивированных образцов. Иными словами, под действием изучаемых материалов повышается сохраняемость органического почвенного вещества, необходимого для жизнеобеспечения бактерий-аммонификаторов.

Численность амилолитической группы бактерий в инактивированной почве, отвечающая за разложение сравнительно простых безазотистых органических веществ и ассимилирующая минеральные формы азота, снижалась под действием внесенных материалов в оба года исследований. Наибольшее снижение числа амилолитиков составило 21 % и 38 % от третьей дозы цеолита и бентонита соответственно, а также 37 % от второй дозы диатомовой породы по отношению к контролю. Предполагается, что данная тенденция могла быть обусловлена, в том числе и снижением содержания в почве минеральных форм азота, которые как активно усваиваются культурными растениями, так и включаются в биохимические реакции гумификации органического вещества, следствием чего, вполне возможно, является повышение содержания органически связанного азота в почве (таблица 4).

Мобилизация почвы оптимизировала условия жизнеобеспечения для амилолитических микроорганизмов, что отразилось на их численности в виде снижения ингибирующего действия дозы каждой из пород. В частности, уменьшение численности амилолитических бактерий в почве при ее мобилизации оказалось не такое сильное: до 10 % и 22 % от третьей дозы цеолитовой и бентонитовой пород, и до 17 % от второй дозы диатомита. Таким образом, микробиотический запас амилолитической микробной ниши в почве оптимизируется в условиях продолжающегося взаимодействия ее коллоидной системы и вещества высококремнистых материалов.

Для того чтобы оценить общую направленность изменений в микробиологической функции трансформации азотсодержащего органического вещества дерново-подзолистой почвы, которая оптимизируется под действием кремнийсодержащих материалов, необходимо проследить за варьированием интегральных показателей, а именно степени микробиологической устойчивости почвы по численности аммонифицирующих ($СМУ_{МПА}$) и амилолитических ($СМУ_{КАА}$) бактерий и, как следствие, – за изменением показателя микробиотичес-

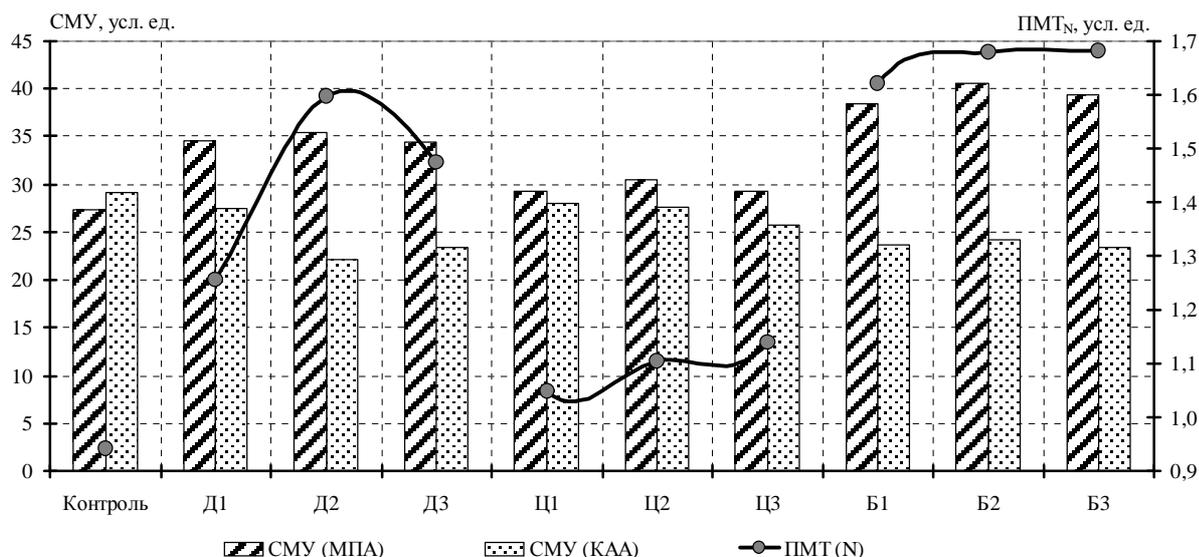


Рис. 1. Степень микробиологической устойчивости почвы и показатель трансформации ее азотсодержащего органического вещества (в среднем за 2015-2016 гг.)

кой трансформации азотсодержащего органического вещества в почве (рис. 1).

На рисунке видно, что максимальное проявление микробиологической устойчивости МПА-бактерий отмечалось на вариантах с бентонитовой глиной (38-40 усл. ед.), среднее – на вариантах с диатомитом (34-35 усл. ед.), а минимальное – на вариантах с цеолитовой породой (29-31 усл. ед.). Степень микробиологической устойчивости КАА-бактерий была снижена относительно контроля. При этом нужно сказать, что оба показателя имели наибольшие значения, как правило, при средних и минимальных дозах кремниевых материалов.

Показатель микробиотической трансформации азотсодержащего органического вещества почвы (ПМТN), характеризующий интенсивность данного процесса, оказался выше контроля и изменялся по-разному в зависимости от породы. В частности, на вариантах с диатомитом ПМТN показал средние значения и повышался к средней дозе (1,60 усл. ед.), на вариантах с цеолитом – имел минимальный уровень и увеличивался к третьей дозе (1,14 усл. ед.), а на вариантах с бентонитовой глиной – был самым наибольшим и практически не изменялся в зависимости от дозы породы (1,68 усл. ед.). Таким образом отмечается, что процессы трансформации азотсодержащего вещества почвы в максимальной степени выражены при ее взаимодействии с диатомовой породой и бентонитовой глиной.

Другой группой микробного пула дерново-подзолистой почвы является система консорциев цел-

люлолитических и олигокарбофильных бактерий, которые последовательно отвечают за гидролитическую деградацию сложных высокомолекулярных безазотистых органических веществ (целлюлозотрофы на АГК), а также за окислительно-восстановительные процессы трансформации остаточных продуктов в гумусовые звенья (олиготрофы на ГА). Изменения в численности указанных групп бактерий, происходящие под действием высококремнистых пород, показаны в таблице 3.

Нужно сказать, что влияние изучаемых материалов на численность целлюлолитических бактерий в инактивированной почве прослеживалось только на вариантах с диатомитом и бентонитовой глиной и, при этом, от наибольших доз – в среднем до 5 % и до 8 % соответственно. Мобилизация почвы не приводила к повышению степени влияния кремниевых веществ на численность бактерий-целлюлолитиков. При этом на второй год исследований мера действия пород на рассматриваемый показатель снижалась. Поскольку биохимия целлюлолитических бактерий в первую очередь направлена на выработку гидролитических ферментов (целлюлазы, целлобиазы и другие ферменты), снижение активности данной микробной консорции на второй год, очевидно, могло быть связано с тем, что исходного целлюлозосодержащего органического вещества в почве становится меньше.

Однако очевиден и тот факт, что за счет действия кремнийсодержащих пород происходит повышение устойчивости рассматриваемой микробной группы, что выражено в одинаковой степени

Влияние кремнийсодержащих пород на численность целлюлозолитических и олигокарбофильных микроорганизмов в дерново-подзолистой почве

Вариант	Микроорганизмы на АГК, $\times 10^5$ КОЕ/1 г почвы						Микроорганизмы на ГА, $\times 10^5$ КОЕ/1 г почвы					
	Инакт. почва			Мобил. почва			Инакт. почва			Мобил. почва		
	2015	2016	сред	2015	2016	сред	2015	2016	сред	2015	2016	сред
Контроль	3,06	4,18	3,62	3,69	5,20	4,45	0,26	0,41	0,34	0,33	0,68	0,51
Д ₁	3,14	4,22	3,73	3,74	5,26	4,50	0,29	0,38	0,34	0,35	0,52	0,44
Д ₂	3,28	4,30	3,79	3,80	5,31	4,56	0,29	0,34	0,32	0,35	0,46	0,41
Д ₃	3,30	4,31	3,81	3,83	5,34	4,59	0,31	0,33	0,32	0,36	0,30	0,33
Ц ₁	3,16	4,20	3,68	3,70	5,23	4,47	0,27	0,40	0,34	0,34	0,59	0,47
Ц ₂	3,19	4,24	3,72	3,75	5,26	4,51	0,28	0,39	0,34	0,35	0,55	0,45
Ц ₃	3,22	4,26	3,74	3,79	5,28	4,54	0,30	0,37	0,34	0,35	0,53	0,44
Б ₁	3,37	4,31	3,84	3,88	5,35	4,62	0,32	0,37	0,35	0,33	0,51	0,42
Б ₂	3,42	4,40	3,91	3,96	5,41	4,69	0,33	0,32	0,33	0,36	0,44	0,40
Б ₃	3,42	4,40	3,91	3,97	5,44	4,71	0,35	0,30	0,33	0,37	0,41	0,39
НСР ₀₅	0,21	0,24	–	0,20	0,22	–	0,03	0,03	–	0,04	0,06	–

усиления действия изучаемых материалов при сравнении показателей, определенных из инактивированной и мобилизированной почвы и, в особенности, на второй год изучения.

По-иному изменялась численность бактерий-олигокарбофилов в почве под действием высококремнистых пород. Так, в первый (2015) год отчетливо прослеживалось увеличение количества КОЕ олиготрофной группы бактерий, которое, при этом, зависело от дозы материала – до 21 %, 17 % и 35 % на варианте с третьей дозой диатомита, цеолита и бентонитовой глины соответственно. Мобилизация почвы не способствовала усилению действия пород на численность олиготрофов в почве, но закономерность в увеличении их количества при этом сохранилась.

В отличие от первого года на второй (2016) год прослеживалось снижение численности олигокарбофильной группы бактерий в почве, которое также усиливалось с повышением дозы пород. Так, минимальное снижение количества КОЕ в инактивированной почве отмечалось на варианте с третьей дозой цеолита (на 9 %), среднее – с третьей дозой диатомита (20 %) и наибольшее – с третьей дозой бентонитовой глины (27 %). При этом мобилизация почвы приводила к усилению действия кремниевых материалов на численность олиготрофов. Анализируя данные в среднем за 2 года нужно сказать, что олигокарбофильная микробиологическая устойчивость почвы под влиянием высококремнистых пород сохранилась на уровне конт-

рольных значений, однако потенциальная микробиотическая активность почвы существенно повысилась, что свидетельствует о положительном влиянии изучаемых материалов на состояние олиготрофной бактериальной ниши.

Общая направленность изменений в микробиологической функции трансформации безазотистого органического вещества дерново-подзолистой почвы, изменяемая под действием кремнийсодержащих материалов, показана на рисунке 2.

Устойчивость микробиотической функции трансформации целлюлозосодержащих веществ почвы сохранялась вне зависимости от вида породы и ее дозы (81-83 усл. ед.). В части функции, выполняемой бактериями-олиготрофами, нужно сказать, что их устойчивость повышалась и, в наибольшей мере, – на вариантах с диатомовой породой (77-97 усл. ед.).

Показатель микробиотической трансформации безазотистого органического вещества почвы (ПМТС), характеризующий интенсивность данного процесса, оказался ниже контроля и имел тенденцию снижения к вариантам с наибольшей дозой каждого материала. Например, на вариантах с диатомитом ПМТС снижался от 1,07 до 0,86 усл. ед., на вариантах с цеолитом – от 1,14 до 1,07 усл. ед., а на вариантах с бентонитовой глиной оставался практически неизменным (1,00-0,98 усл. ед.).

Поскольку бактерии, вырастающие на АГК и ГА, принадлежат к разным эколого-трофическим

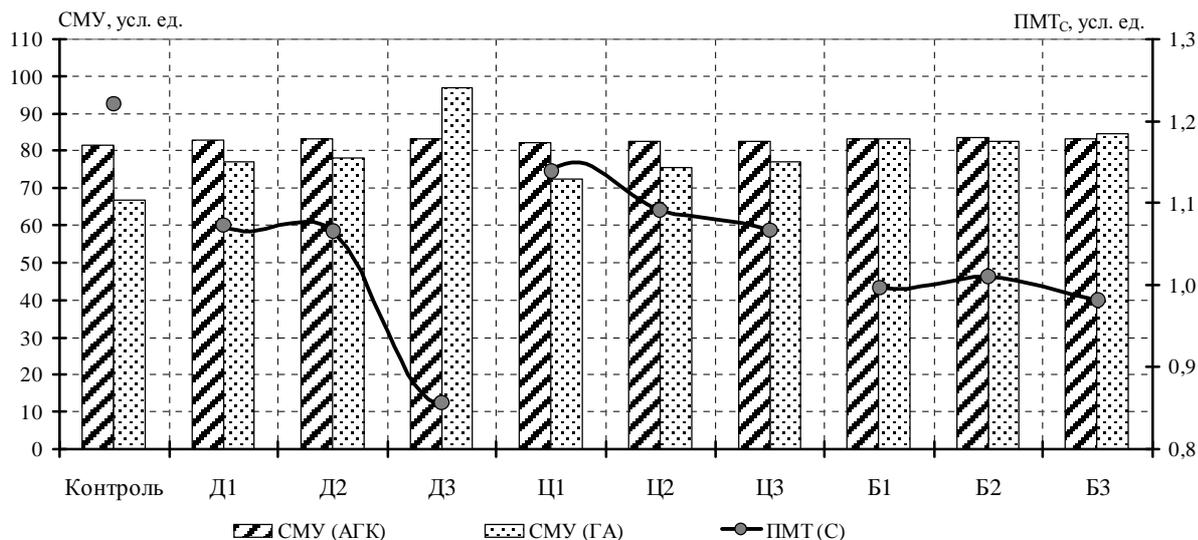


Рис. 2. Степень микробиологической устойчивости почвы и показатель трансформации ее безазотистого органического вещества (в среднем за 2015-2016 гг.)

Таблица 4

Влияние кремнийсодержащих пород на содержание органических форм углерода и азота в почве

Вариант	2015 год					2016 год				
	C _{орг.} , %		N _{орг.} , %		C / N	C _{орг.} , %		N _{орг.} , %		C / N
	M ± m	V	M ± m	V		M ± m	V	M ± m	V	
Контр	0,16±0,02	9	0,10±0,03	7	1,60	0,18±0,03	9	0,13±0,02	8	1,38
Д ₁	0,16±0,02	8	0,11±0,02	8	1,45	0,18±0,02	8	0,13±0,02	8	1,38
Д ₂	0,15±0,01	9	0,11±0,01	8	1,36	0,19±0,01	8	0,14±0,01	7	1,36
Д ₃	0,15±0,01	8	0,12±0,02	7	1,25	0,20±0,02	8	0,14±0,01	8	1,43
Ц ₁	0,16±0,02	10	0,10±0,02	9	1,60	0,17±0,01	7	0,12±0,02	8	1,42
Ц ₂	0,16±0,01	10	0,11±0,02	10	1,45	0,17±0,02	8	0,13±0,02	8	1,31
Ц ₃	0,15±0,02	11	0,11±0,01	10	1,36	0,18±0,01	6	0,13±0,03	9	1,38
Б ₁	0,15±0,01	10	0,12±0,02	12	1,25	0,18±0,02	8	0,14±0,01	7	1,29
Б ₂	0,15±0,02	9	0,13±0,01	8	1,15	0,18±0,02	9	0,14±0,02	8	1,29
Б ₃	0,14±0,01	8	0,14±0,01	9	1,00	0,19±0,01	7	0,15±0,01	7	1,27

консорциям и последовательно выполняют функцию деградации целлюлозосодержащих матриц - трансформации вещества в гумусовые компоненты, можно сказать, что процессы преобразования безазотистого вещества почвы снижаются при ее взаимодействии со всеми породами, но, в большей мере, – на вариантах с диатомитом. Следствием таких изменений может явиться сохранение органически связанного углерода и азота в почве, показанное в таблице 4.

По данным таблицы видно, что в оба года исследований имелась тенденция сужения соотношения органического углерода к азоту в почве в зависимости от вида и дозы исследуемых материалов. В первый год данная тенденция происходила

скорее за счет некоторого увеличения содержания органически связанного азота в почве, а на второй год – за счет обоих показателей.

По-видимому, в условиях применения высококремнистых материалов процессы микробиологической деградации целлюлозы замедляются и идут не до конечных продуктов. Отсюда можно предполагать, что промежуточные продукты лизиса клетчатки и ее производных активно включаются в состав бактериальных клеток и их метаболиты, что может подтверждаться повышением ПМТ по азоту и снижением ПМТ по углероду, что, как следствие, сопровождается относительно повышенным содержанием в почве органического азота.

Влияние кремнийсодержащих пород на содержание подвижных соединений тяжелых металлов в дерново-подзолистой почве

Вариант	Цинк, мг/кг			Свинец, мг/кг			Кадмий, мг/кг			Медь, мг/кг		
	2015	2016	сред	2015	2016	сред	2015	2016	сред	2015	2016	сред
Контроль	39,3	44,6	42,0	5,6	6,3	6,0	2,5	2,8	2,7	7,5	8,6	8,1
Д ₁	21,6	25,6	23,6	4,9	5,7	5,3	1,8	2,3	2,1	2,7	4,3	3,5
Д ₂	7,8	9,3	8,6	4,4	5,1	4,8	1,2	1,4	1,3	2,3	2,9	2,6
Д ₃	2,4	2,9	2,7	3,0	3,5	3,3	0,4	0,5	0,5	1,5	1,9	1,7
Ц ₁	31,2	39,4	35,3	5,1	5,9	5,5	2,2	2,6	2,4	7,4	7,9	7,7
Ц ₂	10,9	14,0	12,5	4,1	4,8	4,5	2,0	2,4	2,2	3,9	4,8	4,4
Ц ₃	5,1	6,2	5,7	3,8	4,4	4,1	1,6	1,8	1,7	2,0	2,5	2,3
Б ₁	28,4	36,1	32,3	5,2	6,1	5,7	2,1	2,5	2,3	4,4	6,2	5,3
Б ₂	18,0	22,5	20,3	4,1	4,9	4,5	1,9	2,3	2,1	2,5	3,3	2,9
Б ₃	12,6	15,8	14,2	3,7	4,4	4,1	1,5	1,9	1,7	1,2	1,5	1,4
НСР ₀₅	2,4	1,8	–	0,5	0,6	–	0,3	0,4	–	0,7	0,5	–

На современном этапе развития сельского хозяйства стабильность агрофитоценозов зависит уже не только от базовых свойств системы «климат-почва-растение», но зачастую обусловлена санитарно-экологическим состоянием почвенного покрова [4, 9, 14]. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных территорий является одним из наиболее значимых критериев в оценке состояния агроэкосистем и определения их геоэкологической устойчивости [12, 16]. В наших исследованиях проводилась оценка влияния различных доз кремнийсодержащих пород на содержание подвижных соединений цинка, свинца, кадмия и меди в дерново-подзолистой почве (таблица 5).

В целом нужно сказать, что все исследуемые материалы способствовали существенному снижению подвижных форм тяжелых металлов в почве, мера которого усиливалась с повышением дозы породы. Так, влияние диатомита оказалось наименьшим в отношении подвижных соединений свинца (снижение до 45 %), средним – в отношении меди и кадмия (до 79-81 %), а наибольшим – в отношении цинка (до 94 % по отношению к контролю).

На вариантах с цеолитом минимальное снижение содержания подвижных форм тяжелых металлов прослеживалось в отношении свинца (на 32 %) и кадмия (на 37 %), а наибольшее – по подвижным формам меди (на 72 %) и цинка (на 86 %). На вариантах с бентонитовой глиной закономерности оказались аналогичными вариантам с использованием цеолита.

Очевидно, что столь существенное снижение подвижности тяжелых металлов в почве обусловлено как высокими сорбционными свойствами, так и ионообменной силой всех изучаемых материалов [3], которые, по-видимому, усиливаются при снижении кислотности почвы (рис. 3).

На рисунке видно, что в среднем за 2 года исследований обменная кислотность почвы повышалась к варианту со второй дозой кремнийсодержащего материала, в частности, на 0,31 ед. рН на варианте с диатомитом, на 0,40 ед. рН на варианте с цеолитом и на 0,34 ед. рН на варианте с бентонитовой глиной по отношению к контролю.

Коэффициент концентрации (K_c) токсичных элементов как отношение содержания вещества в испытуемой почве исследуемого варианта к ее фоновому значению, напротив, снижался по всем исследованным тяжелым металлам стабильно к вариантам с третьей дозой каждой из пород. Поскольку известно [8, 12], что степень подвижности многих из тяжелых металлов в почве снижается при повышении ее pH_{KCl} , в экспериментах показано повышение степени геоэкологической устойчивости дерново-подзолистой почвы при условии применения высококремнистых материалов.

Итак, в результате проведенных исследований было установлено, что под действием высококремнистых материалов повышается сохраняемость почвенного органического вещества, необходимого для жизнеобеспечения бактерий аммонифицирующей микробной функции.

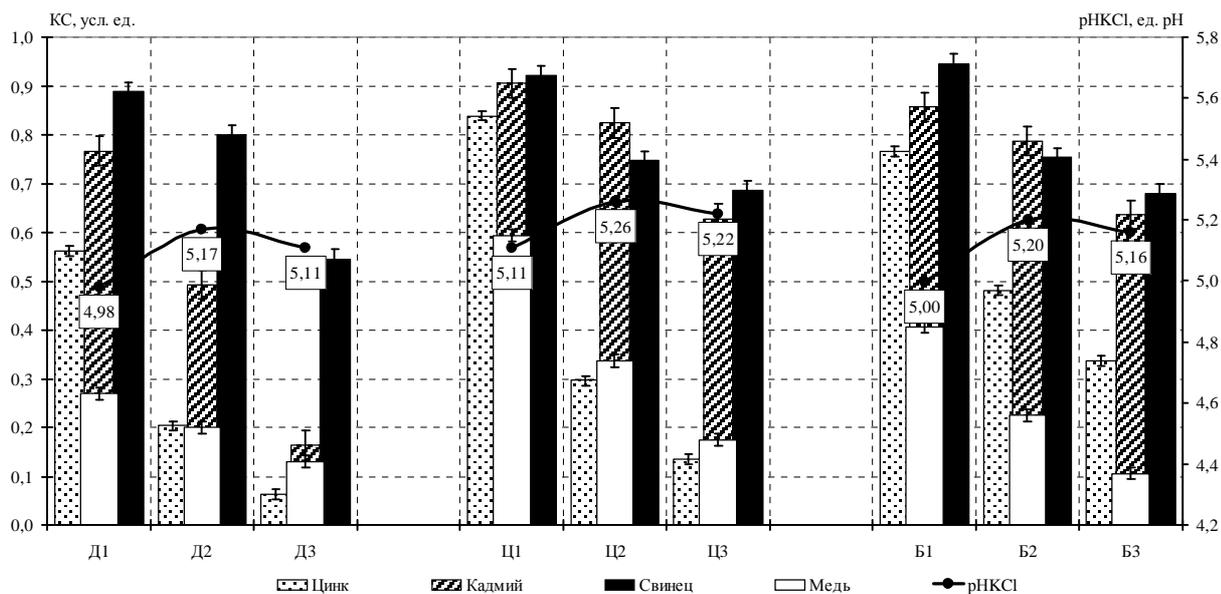


Рис. 3. Коэффициенты концентрации (K_c) подвижных соединений тяжелых металлов в почве и ее обменная кислотность (pH_{KCl}) (в среднем за 2015-2016 гг.)

Диатомит и бентонитовая глина в дозах 3 и 6 т/га в наибольшей степени способствуют микробиологической устойчивости в части трансформации азотсодержащего органического вещества дерново-подзолистой почвы.

Из всех изученных материалов использование диатомита и бентонита способно повышать потенциальную олигокарбофильную стабильность микробного пула, что отражено в снижении микробиотической трансформации безазотистых органических матриц и, как следствие, в сохранении органически связанных углерода и азота в почве.

В исследованиях показано повышение геоэкологической устойчивости агрофитоценоза в виде существенного снижения содержания подвижных соединений тяжелых металлов в почве, происходящее под действием высоких доз кремнистых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Е. В. Влияние бентонита на повышение плодородия чернозема обыкновенного / Е. В. Агафонов, М. В. Хованский // Почвоведение. – 2014. – № 5. – С. 597-601.
2. Агроэкология техногенно загрязненных ландшафтов / Ю. А. Мажайский [и др.]. – Смоленск : Маджента, 2003. – 384 с.
3. Ананьева Н. Д. Оценка устойчивости микробных комплексов почв к природным и антропогенным воздействиям / Н. Д. Ананьева, Е. В. Благодатская, Т. С. Демкина // Почвоведение. – 2002. – № 5. – С. 580-587.

4. Бочарникова Е. А. Кремниевые удобрения и мелиоранты: история изучения, теория и практика применения / Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков, И. В. Матыченков // Агрохимия. – 2011. – № 7. – С. 84-96.

5. Водяницкий Ю. Н. Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2014. – № 4. – С. 420-432.

6. Глазовская М. А. Методологические основы эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям / М. А. Глазовская. – Москва : Издательство Московского государственного университета, 1997. – 102 с.

7. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. – Москва : Издательство стандартов, 1986. – 6 с.

8. Добровольский Г. В. Экология почв / Г. В. Добровольский, Е. Д. Никитин. – Москва : Издательство Московского государственного университета, 2012. – 412 с.

9. Зайдельман Ф. Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов / Ф. Р. Зайдельман. – Москва : Книжный дом Университет, 2009. – 720 с.

10. Идентификация экологически опасных объектов и прогнозирование техногенных последствий их поражения / А. В. Иванов [и др.]. – Воронеж : Научная книга, 2017. – 177 с.

11. Изменение свойств дерново-подзолистой почвы и ее микробиоценоза при интенсивном антропогенном воздействии / В. Г. Минеев [и др.] // Почвоведение. – 1999. – № 4. – С. 455-460.

12. Козлов А. В. Значение микроорганизмов в поддержании устойчивости почв к воздействию антропогенных факторов / А. В. Козлов, О. В. Селицкая // Вестник Мининского университета. – 2015. – № 3 (11). – С. 27.

13. Копчик Г. Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) / Г. Н. Копчик // Почвоведение. – 2014. – № 7. – С. 851-868.
14. Кураков А. В. Устойчивость микробного комплекса дерново-подзолистых почв к действию минеральных удобрений / А. В. Кураков, Ю. Е. Козлова // Почвоведение. – 2002. – № 5. – С. 595-600.
15. Куролап С. А. Геоэкологические основы мониторинга и эколого-гигиеническое зонирование городской среды / С. А. Куролап, В. И. Федотов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2000. – № 1. – С. 120-123.
16. Лобода Б. П. Влияние удобрения на основе цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения на урожайность и качество картофеля / Б. П. Лобода, В. Р. Багдасаров, Д. Д. Фицура // Агрохимия. – 2014. – № 3. – С. 28-35.
17. Матыченков В. В. Влияние кремниевых удобрений на растения и почву / В. В. Матыченков, Е. А. Бочарникова, Я. М. Аммосова // Агрохимия. – 2002. – № 2. – С. 86-93.
18. Матыченков В. В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и в системе почва-растение : автореф. дис. ... д-ра. биол. наук / В. В. Матыченков. – Пушкино, 2008. – 34 с.
19. Микробные сообщества и их функционирование в процессах деградации и самовосстановления почв / Д. Г. Звягинцев [и др.] // Деградация и охрана почв. – Москва : Издательство Московского государственного университета, 2002. – С. 401-454.
20. Муха В. Д. Естественно-антропогенная эволюция почв (общие закономерности и зональные особенности) / В. Д. Муха. – Москва : КолосС, 2004. – 271 с.
21. ПНД Ф 16.1:2.2:3.48-06. Методика выполнения измерений массовой концентрации цинка, кадмия, свинца, меди, марганца, мышьяка и ртути в почвах, тепличных грунтах, сапропелях, илах, донных отложениях, твердых отходах методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА. – Томск : ООО «НПП «Томьаналит», 2006. – 44 с.
22. Практикум по микробиологии / А. И. Нетрусов [и др.]. – Москва : Академия, 2005. – 608 с.
23. Соколова Т. А. Роль почвенной биоты в процессах выветривания минералов (обзор литературы) / Т. А. Соколова // Почвоведение. – 2011. – № 1. – С. 64-81.
24. Экология микроорганизмов / А. И. Нетрусов [и др.]. – Москва : Юрайт, 2015. – 268 с.
25. Pirzad A. Zeolite use Efficiency Variation under Water Deficit Stress in Grass Pea and Lentil / A. Pirzad, S. Mohammadzadeh // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биология. – 2016. – № 9 (3). – С. 291-303.
26. M. V. Khovanskiy // Pochvovedenie. – 2014. – № 5. – С. 597-601.
27. 2. Agroekologiya tekhnogenno zagryaznennykh landshaftov / Yu. A. Mazhayskiy [i dr.]. – Smolensk : Madzhenta, 2003. – 384 s.
28. 3. Anan'eva N. D. Otsenka ustoychivosti mikrobnyykh kompleksov pochv k prirodnyim i antropogennym vozdeystviyam / N. D. Anan'eva, E. V. Blagodatskaya, T. S. Demkina // Pochvovedenie. – 2002. – № 5. – С. 580-587.
29. 4. Bocharnikova E. A. Kremnievye udobreniya i melioranty: istoriya izucheniya, teoriya i praktika primeneniya / E. A. Bocharnikova, V. V. Matychenkov, I. V. Matychenkov // Agrokhimiya. – 2011. – № 7. – С. 84-96.
30. 5. Vodyanitskiy Yu. N. Prirodnye i tekhnogennyye soedineniya tyazhelykh metallov v pochvakh / Yu. N. Vodyanitskiy // Pochvovedenie. – 2014. – № 4. – С. 420-432.
31. 6. Glazovskaya M. A. Metodologicheskie osnovy ekologo-geokhimicheskoy ustoychivosti pochv k tekhnogennym vozdeystviyam / M. A. Glazovskaya. – Moskva : Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1997. – 102 s.
32. 7. GOST 26483-85. Pochvy. Prigotovlenie solevoy vytyazhki i opredelenie ee pH po metodu TsINAO. – Moskva : Izdatel'stvo standartov, 1986. – 6 s.
33. 8. Dobrovol'skiy G. V. Ekologiya pochv / G. V. Dobrovol'skiy, E. D. Nikitin. – Moskva : Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 2012. – 412 s.
34. 9. Zaydel'man F. R. Genezis i ekologicheskie osnovy melioratsii pochv i landshaftov / F. R. Zaydel'man. – Moskva : Knizhnyy dom Universitet, 2009. – 720 s.
35. 10. Identifikatsiya ekologicheskii opasnykh ob'ektov i prognozirovanie tekhnogennykh posledstviy ikh porazheniya / A. V. Ivanov [i dr.]. – Voronezh : Nauchnaya kniga. – 2017. – 177 s.
36. 11. Izmenenie svoystv dernovo-podzolistoy pochvy i ee mikrobootsenoza pri intensivnom antropogennom vozdeystvii / V. G. Mineev [i dr.] // Pochvovedenie. – 1999. – № 4. – С. 455-460.
37. 12. Kozlov A. V. Znachenie mikroorganizmov v podderzhanii ustoychivosti pochv k vozdeystviyu antropogennykh faktorov / A. V. Kozlov, O. V. Selitskaya // Vestnik Mininskogo universiteta. – 2015. – № 3 (11). – С. 27.
38. 13. Koptsik G. N. Sovremennyye podkhody k remediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (obzor literatury) / G. N. Koptsik // Pochvovedenie. – 2014. – № 7. – С. 851-868.
39. 14. Kurakov A. V. Ustoychivost' mikrobnogo kompleksa dernovo-podzolistykh pochv k deystviyu mineral'nykh udobreniy / A. V. Kurakov, Yu. E. Kozlova // Pochvovedenie. – 2002. – № 5. – С. 595-600.
40. 15. Kurolap S. A. Geoekologicheskie osnovy monitoringa i ekologo-gigienicheskoe zonirowanie gorodskoy sredy / S. A. Kurolap, V. I. Fedotov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya. – 2000. – № 1. – С. 120-123.
41. 16. Loboda B. P. Vliyanie udobreniya na osnove tselitsoderzhashchikh trepelov Khotynetskogo mestorozh-

REFERENCES

1. Agafonov E. V. Vliyanie bentonita na povyshenie plodorodiya chernozema obyknovennogo / E. V. Agafonov,

deniya na urozhaynost' i kachestvo kartofelya / B. P. Loboda, V. R. Bagdasarov, D. D. Fitsuro // *Agrokimiya*. – 2014. – № 3. – S. 28-35.

17. Matychenkov V. V. Vliyaniye kremnievykh udobreniy na rasteniya i pochvu / V. V. Matychenkov, E. A. Bocharnikova, Ya. M. Ammosova // *Agrokimiya*. – 2002. – № 2. – S. 86-93.

18. Matychenkov V. V. Rol' podvizhnykh soedineniy kremniya v rasteniyakh i v sisteme pochva-rastenie : avtoref. dis. ... d-ra. biol. nauk / V. V. Matychenkov. – Pushchino, 2008. – 34 s.

19. Mikrobnye soobshchestva i ikh funktsionirovaniye v protsessakh degradatsii i samovosstanovleniya pochv / D. G. Zvyagintsev [i dr.] // *Degradatsiya i okhrana pochv*. – Moskva : Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 2002. – S. 401-454.

20. Mukha V. D. Estestvenno-antropogennaya evolyutsiya pochv (obshchie zakonomernosti i zonal'nye osobennosti) / V. D. Mukha. – Moskva : KolosS, 2004. – 271 s.

21. PND F 16.1:2:2.2:3.48-06. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii tsinka, kadmiya, svintsa, medi, margantsa, mysh'yaka i rtuti v pochvakh, teplichnykh gruntakh, sapropelyakh, ilakh, donnykh otlozheniyakh, tverdykh otkhodakh metodom inversionnoy vol'tamperometrii na analizatorakh tipa TA. – Tomsk : OOO «NPP «Tom'analit», 2006. – 44 s.

22. Praktikum po mikrobiologii / A. I. Netrusov [i dr.]. – Moskva : Akademiya, 2005. – 608 s.

23. Sokolova T. A. Rol' pochvennoy bioty v protsessakh vyvetrivaniya mineralov (obzor literatury) / T. A. Sokolova // *Pochvovedenie*. – 2011. – № 1. – S. 64-81.

24. Ekologiya mikroorganizmov / A. I. Netrusov [i dr.]. – Moskva : Yurayt, 2015. – 268 s.

25. Pirzad A. Zeolite use Efficiency Variation under Water Deficit Stress in Grass Pea and Lentil / A. Pirzad, S. Mohammadzadeh // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser. Biologiya*. – 2016. – № 9 (3). – S. 291-303.

Козлов Андрей Владимирович

кандидат биологических наук, доцент кафедры экологического образования и рационального природопользования Нижегородского государственного педагогического университета имени Козьмы Минина, г. Нижний Новгород, т. 8(920)1111314, E-mail: a_v_kozlov@mail.ru

Куликова Алевтина Христофоровна

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения, агрохимии и агроэкологии Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина, г. Ульяновск, т. 8(927)8219072, E-mail: agroec@yandex.ru

Копосова Наталья Николаевна

кандидат географических наук, доцент кафедры экологического образования и рационального природопользования Нижегородского государственного педагогического университета имени Козьмы Минина, г. Нижний Новгород, т. 8(910)3941293, E-mail: coposowa.nataliya@yandex.ru

Kozlov Andrey Vladimirovich

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Chair of Ecological Education and Rational Nature Management, Nizhny Novgorod State Pedagogical University named after Koz'ma Minin, Nizhny Novgorod, tel. 8(920)1111314, E-mail: a_v_kozlov@mail.ru

Kulikova Alevtina Hristoforovna

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department «Soil Science, Agrochemistry and Agroecology» of the Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, tel. 8(927)8219072, E-mail: agroec@yandex.ru

Koposova Natal'ya Nikolayevna

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Chair of Ecological Education and Rational Nature Management, Nizhny Novgorod State Pedagogical University named after Koz'ma Minin, Nizhny Novgorod, tel. 8(910)3941293, E-mail: coposowa.nataliya@yandex.ru