

УДК 631.811.93:631.416:631.445.24:631.559

ВЛИЯНИЕ ДИАТОМИТА, ЦЕОЛИТА И БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

© 2023 г. А. В. Козлов^{1,*}, А. Х. Куликова², И. П. Уромова³

¹Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

²Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина
432017 Ульяновск, бул. Новый Венец, 1, Россия

³Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 1, Россия

*E-mail: a.kozlov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

В трехлетних микрополевых опытах на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изучено влияние мелиоративных доз (3, 6 и 12 т/га) кремнистых пород (диатомита, цеолита и бентонитовой глины) на основные агрохимические свойства почвы и продуктивность культур в зерновом звене севооборота пшеница озимая—ячмень яровой—горох посевной. Среди прочих положительных эффектов установлено существенное действие диатомита в снижении концентрации обменных форм алюминия в почве (на 0.11 мг-экв/100 г), повышении содержания обменных форм магния (на 0.33 мг-экв/100 г) и фосфатов почвенного раствора (на 225%). На фоне влияния диатомовой породы ячмень давал наибольшую прибавку урожайности зерна (на 38%) и соломы (на 29%). Наиболее существенное влияние цеолита выявлено в снижении актуальной, обменной и гидролитической кислотности почвы (снижение на 1.11, 0.48 ед. рН и на 0.33 мг-экв/100 г), а также концентрации обменных соединений кальция (увеличение на 17.7 мг-экв/100 г), магния (на 12.0 мг-экв/100 г) и калия (на 46%). Внесение цеолитовой породы способствовало наибольшей прибавке урожайности зерна (на 32%) и соломы (на 23%) ячменя. Максимально значимое влияние бентонитовой глины установлено на показатели актуальной кислотности почвы (их снижение на 0.65 ед. рН), содержания обменного алюминия (уменьшение на 0.19 мг-экв/100 г) и фосфатов почвенного раствора (увеличение на 175%). Внесение глины способствовало формированию наибольшей прибавки урожайности зерна (на 33%) и соломы (на 19%) гороха посевного.

Ключевые слова: диатомит, цеолит, бентонитовая глина, дерново-подзолистая почва, показатели кислотно-основного состояния почвы, агрохимические свойства, озимая пшеница, ячмень яровой, горох посевной, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188123120086, **EDN:** AYKEUK

ВВЕДЕНИЕ

Содержание в почвах подвижных соединений азота, фосфора, калия и микроэлементов, а также состояние кислотности и кислотно-основной буферности относятся к характеристикам, являющимся одними из приоритетных в определении не только уровня эффективного плодородия и окультуренности почв, но и в целом агроэкологической устойчивости почвенного покрова сельскохозяйственных территорий [1–6]. Понимание значимости химической роли другого элемента — кремния для естественных и агрофитоценозов только сравнительно недавно привело к его опре-

делению в качестве макроэлемента питания растительного организма, а его комплексов с внутриклеточными органическими соединениями — в качестве компонентов, обеспечивающих защитную функцию растений от неблагоприятных факторов агроэкотопа [7–13].

Считается признанным, что уже длительное время дерново-подзолистые почвы Нечерноземной полосы России, как одни из наиболее вовлеченных в сельскохозяйственное производство растениеводческой продукции, характеризуются активной химической деградацией [14–17]. Избыточный вынос элементов питания и явный не-

достаток в обеспеченности полей органическими, минеральными удобрениями и средствами химической мелиорации отражаются на общем состоянии плодородия почв, их водном режиме, уровне гумусированности и оструктуренности [18–23]. При этом известно [24–27], что при таких условиях в первую очередь повышается кислотность почвы пахотного горизонта, что еще активнее усугубляет состояние почвообитающих микробиоценозов и произрастающих агрофитоценозов [28–32].

Различного генезиса породы, отличающиеся повышенным содержанием неокристаллизованного (аморфного) кремнезема, уверенно вошли в практику региональной химической мелиорации пахотных почв [33–37]. Исследования в разных почвенно-климатических зонах России и сопредельных стран показывают [38–50], что их применение как в сыромолом виде, так и в форме различных модификаций (в том числе с минеральными удобрениями, стимуляторами роста и органическими веществами) активно способствуют улучшению не только пищевого режима почв, но и оптимизации кислотно-основного баланса. Причиной тому является химический состав пород, который характеризуется повышенным содержанием доступных для растений и внутрипочвенного превращения подвижных соединений кремния, а также высокими концентрациями обменных форм кальция, магния, а в некоторых случаях еще и натрия. Кроме того, высокая ионообменная сила и сорбционная активность минералов, входящих в состав данных пород, может обеспечивать относительное приращение обменной емкости и буферной способности мелиорируемых почв [38, 51–54].

В целом на настоящий момент определено, что высококремнистые материалы, в том числе опoki, трепелы, диатомиты, глины, цеолиты и другие, могут оказывать многостороннее воздействие на почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Однако за счет отсутствия систематических и длительных исследований их агрохимической эффективности в различных агроэкосистемах единых рекомендаций по применению кремнистых пород в качестве мелиорантов комплексного действия до сих пор не разработано. Для этого необходимы научные изыскания, проводимые в почвенно-климатических зонах с различным типом агропедогенеза почвенного покрова на сельскохозяйственных территориях. В частности, изучения агрономической эффективности применения высоких доз кремнистых пород в условиях подзолистых и дерново-подзолистых почв явно недостаточно. В связи с этим цель

работы — оценка изменения агрохимических показателей дерново-подзолистых почв под влиянием мелиоративных доз таких кремнистых пород, как диатомит, цеолит и бентонитовая глина, с последующей оценкой урожайности культурных растений, повышающейся при действии кремниевых мелиорантов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Серию полевых экспериментов выполняли на базе ООО “Элитхоз” (Борский р-н, Нижегородская обл.) в звене зернового севооборота озимая пшеница—ячмень яровой—горох посевной в период 2014–2017 гг. Сорты культур районированы в Волго-Вятском регионе [55] и обладают устойчивостью к ряду вредителей и возбудителей болезней, типичных для этого региона: пшеница (*Triticum aestivum* L.) — Московская 39, ячмень (*Hordeum vulgare* L.) — Велес, горох (*Pisum sativum* L.) — Чишминский 95.

Были заложены микрополевые опыты, учетная площадь делянки — 1 м², расположение — рендомизированное, повторность четырехкратная. Все агротехнические работы проводили вручную в соответствии с общепринятыми в подобном рода практике требованиями [56].

С каждой породой закладывали 1 опыт по единой 4-вариантной схеме: 1 — контроль (без породы и иных удобрений), 2 — порода в дозе 3 т/га, 3 — порода в дозе 6 т/га, 4 — порода в дозе 12 т/га. Материалы в каждом опыте вносили в почву осенью 2014 г. перед посевом озимой пшеницы и перекапывали, почву выравнивали.

Почвенный покров экспериментального участка однородный, почва — дерново-подзолистая среднедерновая неглубокоподзолистая, гранулометрический состав — легкий суглинок, материнская порода — покровный суглинок, по Классификации и диагностике почв России — подтип дерново-подзолистой типичной почвы (Пд) из отдела текстурно-дифференцированных почв [57, 58].

На время закладки полевых экспериментов почва характеризовалась среднекислой реакцией (рН_{H₂O} 5.9 ед., рН_{KCl} 4.8 ед., $H_t = 2.83$ мг-экв/100 г) и средней насыщенностью основными катионами ($V_s = 69\%$), а также средней степенью обеспеченности подвижными формами фосфора и калия (по Кирсанову): P₂O₅ — 86, K₂O — 110 мг/кг. Содержание гумуса (по Тюрину) — 1.2%.

Согласно характеристике производителей и ряда авторов [34, 38, 39, 59, 60], вещество диатомита (Инзенское месторождение), цеолита

Таблица 1. Изменение показателей кислотно-основного состояния почвы под влиянием кремнистых пород (среднее за 3 года)

Вариант	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	H _Г	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca : Mg
	ед. pH		мг-экв/100 г почвы				
Контроль	5.92	4.86	2.80	0.39	5.18	1.22	4.2
Д ₁ 3 т/га	6.19	5.02	2.75	0.36	5.47	1.36	4.0
Д ₂ 6 т/га	6.33	5.19	2.68	0.32	5.51	1.43	3.9
Д ₃ 12 т/га	6.34	5.14	2.65	0.28	5.57	1.55	3.6
НСП ₀₅	0.30	0.21	0.11	0.02	0.19	0.10	—
Ц ₁ 3 т/га	6.64	5.16	2.68	0.38	8.03	3.62	2.3
Ц ₂ 6 т/га	7.03	5.34	2.55	0.35	13.3	6.91	1.9
Ц ₃ 12 т/га	6.99	5.27	2.47	0.34	22.8	13.2	1.7
НСП ₀₅	0.27	0.24	0.08	0.03	0.32	0.18	—
Б ₁ 3 т/га	6.37	5.03	2.72	0.31	5.61	1.35	4.2
Б ₂ 6 т/га	6.57	5.17	2.64	0.24	5.74	1.41	4.1
Б ₃ 12 т/га	6.55	5.14	2.60	0.20	5.88	1.46	4.0
НСП ₀₅	0.36	0.19	0.12	0.02	0.31	0.07	—

Примечание. Д — диатомит, Ц — цеолит, Б — бентонитовая глина. То же в табл. 2, 3.

(Хотынецкое месторождение) и бентонитовой глины (Зырянское месторождение) в своем составе содержит соответственно: обменного кальция — 10, 4800 и 28, обменного магния — 39, 1600 и 30 мг-экв/100 г, а также подвижного фосфора — 37, 260 и 65, обменного калия — 350, 250 и 0.87 мг/кг.

Образцы почвы отбирали в дни уборки урожая с глубины 0.15 м, точечные образцы (конверт) — 5 ед./делянку, объединенный образец — 1 ед./делянку. Урожайность культур оценивали сплошным весовым методом с учетной площади каждой делянки. Полученные почвенные образцы доставляли в лабораторные комплексы НПКУ им. К. Минина, подготавливали к анализам (высушивание, измельчение, просеивание (Ø 1 мм), квартование) и анализировали ряд показателей, в том числе: pH из водной и солевой вытяжек — потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность — по Каппену в модификации ЦИНАО, содержание обменных соединений Ca²⁺ и Mg²⁺ — по Гедройцу, содержание обменных форм Al³⁺ — по Соколову, содержание подвижных соединений фосфора и калия (0.1 н. HCl) — по Кирсанову, содержание фосфатов почвенного раствора (0.03 н. K₂SO₄) — по Карпинскому—Замятиной [61, 62]. Статистическую обработку полученных данных проводили в пакете MS MICROSOFT OFFICE EXCEL методом дисперсионного анализа при уровне $p < 0.05$ [63].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Было выявлено положительное влияние изученных кремнистых пород на параметры агрохимического состояния дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (табл. 1). Прежде всего нужно отметить, что достоверный эффект большинства рассмотренных показателей проявлялся либо при внесении в почву 2-й дозы каждого из материалов (6 т/га), либо уже при внесении минимальной дозы (3 т/га).

Показатель pH почвы, определяемый из ее водной и солевой вытяжек и соответственно характеризующий относительное состояние кислотности почвенного раствора и частичную способность к ионному обмену кислотными катионами, повышался на фоне применения пород. При этом величина снижения уровня кислотности почвы оказалась неодинаковой. В частности, в вариантах с цеолитом pH почвы из обеих вытяжек увеличивался наиболее значительно по сравнению с опытами с другими породами — соответственно на 18–19 и на 8–10%.

В вариантах с применением бентонитовой глины снижение актуальной кислотности почвы составляло 11, обменной — 6% по отношению к контролю. В вариантах с диатомовой породой эффект ее влияния на рассматриваемые показатели был примерно одинаков — 6–7%.

Вполне вероятно, что за 3-летний период процессы снижения активности кислотных катионов

в почвенном растворе и внешних слоях коллоидных мицелл ППК почвы были обусловлены сорбционными и ионообменными свойствами самих пород, использованных в высоких (мелиоративных) дозах [64–66]. Косвенным подтверждением этого явилось уменьшение концентрации обменных соединений алюминия в почве и, как следствие, снижение показателя ее гидролитической кислотности, в различной мере произошедшие во всех рассматриваемых опытах. В частности, если в вариантах с применением цеолита в дозах 6–12 т/га содержание обменного алюминия в почве снижалось на 10–13%, а показатель H_r уменьшался на 9–12%, то в условиях внесения диатомита и бентонита гидролитическая кислотность почвы соответственно снижалась только на 5 и 7%, концентрация ионов Al^{3+} — более чем на 20 и 40%. По-видимому, ионообменные и сорбционные эффекты при действии вещества глины и диатомита, с одной стороны, в большей мере распространялись на обменные формы алюминия в почве, чем на весь комплекс кислотообразующих катионов, формировавший ее гидролитическую кислотность.

С другой стороны, показатель H_r почвы мог снижаться и за счет изменения содержания обменных соединений кальция и магния, концентрации которых в почве весьма существенно увеличивались и в особенности в вариантах с применением цеолитовой породы. В частности, в варианте с минимальной дозой материала (3 т/га) содержание обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве повышалось соответственно в 1.6 и 2.9 раза, а в вариантах со средней (6 т/га) и наибольшей (12 т/га) дозами — соответственно в 2.6–4.4 и в 5.7–10.8 раза. Очевидно, что подобные изменения показателей были обусловлены очень высоким содержанием подвижных форм данных щелочноземельных металлов в исходной породе [67–69].

В отношении влияния диатомита и бентонита на концентрацию подвижных соединений кальция и магния в почве нужно отметить в целом положительный эффект, который был много меньше в сравнении с ранее рассмотренными вариантами воздействия Хотынецкого цеолита. Например, за 3-летний период наибольшее увеличение показателей было установлено при внесении дозы обоих материалов 12 т/га, которое составило соответственно 8 и 14% концентрации ионов Ca^{2+} и 27 и 20% — ионов Mg^{2+} относительно контроля. При этом соотношение элементов в почве в наибольшей степени (до 55–60%) сужалось в вариантах с цеолитом, в средней (до 7–14%) — в вариантах с диатомовой породой, в минимальной (до 2–5%) — с бентонитовой глиной.

Таким образом, применение диатомита, цеолита и бентонита способно оказывать положи-

тельное влияние на рассмотренные показатели кислотно-основного состояния дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. В сравнении с данными других авторов [13, 34, 38, 44, 48, 52] описанные в работе эффекты были сопоставимы и проявляли себя схожим образом.

Помимо ацидонейтрализующего эффекта высокие дозы данных пород способны оказывать положительное воздействие на содержание подвижных соединений фосфора и калия в почве (табл. 2). В частности, содержание соединений фосфора, переходящих в 0.1 н. HCl (подвижный фосфор), на фоне применения диатомита увеличивалось на 37–55, на фоне цеолита — на 22–43, а на фоне глины — на 17–30%. Содержание почвенных фосфатов, переходящих в 0.03 н. K_2SO_4 (интенсивный фосфор), в условиях внесения диатомовой породы повышалось в 2.9–3.3 раза, цеолита — на 25–92%, бентонита — в 2.0–2.8 раза. В среднем за 3 года исследования массовая доля интенсивных фосфатов в почве увеличивалась в соответствии с действием пород по следующему ранжированию влияния: диатомит $\approx$ бентонит — цеолит, что составило соответственно 80–93, 73–93 и 13–27% увеличения показателя относительно контрольного уровня.

Известно [13, 70–73], что при определенных условиях соединения кремния способны замещать в почве фосфаты из ППК и переводить их в подвижное состояние, т.е. в состав почвенного раствора. В связи с чем данный механизм предполагается как основной, определяющий столь существенное повышение концентрации интенсивных фосфатов в почве.

Трехлетнее взаимодействие дерново-подзолистой почвы с высокими дозами изученных материалов способствовало повышению содержания в ней обменных соединений калия — на фоне влияния диатомита и цеолита в максимальной мере при внесении в почву 6 т/га каждого из материалов (соответственно на 32 и 46%), на фоне воздействия глины — на 35% при ее внесении в почву в дозе 12 т/га.

Оптимизация кислотно-основного состояния почвы и ее питательного режима вследствие применения мелиоративных доз кремнистых пород закономерно способствовала увеличению продуктивности культур севооборота (табл. 3). Показано изменение урожайности основной (зерно) и побочной (солома) продукции культурных растений на фоне применения диатомовой, цеолитовой пород и бентонитовой глины.

Было установлено, что агрономическая эффективность, полученная при применении испы-

Таблица 2. Изменение содержания подвижных соединений фосфора и калия в почве под влиянием кремнистых пород (среднее за 3 года)

Вариант	Содержание соединений фосфора, мг P_2O_5 /кг			Содержание обменного калия, мг K_2O /кг
	0.1 н. HCl-растворимая форма (фактор емкости)	0.03 н. K_2SO_4 -растворимая форма (фактор интенсивности)	доля интенсивных фосфатов в почве, %	
Контроль	86	12	15	96
Д ₁ 3 т/га	118	17	14	117
Д ₂ 6 т/га	130	35	27	127
Д ₃ 12 т/га	133	39	29	119
HCP ₀₅	17	10	—	14
Ц ₁ 3 т/га	105	15	14	122
Ц ₂ 6 т/га	123	23	19	140
Ц ₃ 12 т/га	119	20	17	135
HCP ₀₅	7	9	—	10
Б ₁ 3 т/га	101	24	23	110
Б ₂ 6 т/га	112	33	29	126
Б ₃ 12 т/га	108	28	26	130
HCP ₀₅	10	10	—	11

Таблица 3. Влияние кремнистых пород на продуктивность сельскохозяйственных культур (2015–2017 гг.), т/га

Вариант	Контроль	Д ₁ 3 т/га	Д ₂ 6 т/га	Д ₃ 12 т/га	HCP ₀₅	Ц ₁ 3 т/га	Ц ₂ 6 т/га	Ц ₃ 12 т/га	HCP ₀₅	Б ₁ 3 т/га	Б ₂ 6 т/га	Б ₃ 12 т/га	HCP ₀₅
Основная часть урожая, т/га													
Озимая пшеница	2.51	2.80	3.10	2.97	0.17	2.60	2.64	2.70	0.26	2.70	2.93	2.85	0.24
Ячмень яровой	3.03	3.72	4.08	4.19	0.19	3.54	3.86	4.01	0.33	3.89	4.16	3.95	0.33
Горох посевной	1.62	1.85	2.02	1.93	0.13	1.72	1.80	1.86	0.09	1.98	2.06	2.15	0.08
Побочная часть урожая, т/га													
Озимая пшеница	3.11	3.40	3.42	3.43	0.28	3.56	3.81	3.78	0.17	3.38	3.47	3.51	0.23
Ячмень яровой	4.39	5.21	5.63	5.66	0.49	5.06	5.40	5.29	0.42	5.45	5.53	5.17	0.32
Горох посевной	2.84	3.03	3.19	3.11	0.16	2.96	2.99	3.07	0.17	3.14	3.39	3.26	0.60
Соотношение основной и побочной частей урожая													
Озимая пшеница	0.81	0.82	0.91	0.87	—	0.73	0.69	0.71	—	0.80	0.84	0.81	—
Ячмень яровой	0.69	0.71	0.72	0.74	—	0.70	0.72	0.76	—	0.71	0.75	0.76	—
Горох посевной	0.57	0.61	0.63	0.62	—	0.58	0.60	0.61	—	0.63	0.61	0.66	—

таных материалов в полевых опытах, зависела не только от возделываемой культуры, но и от самой породы. В частности, применение диатомита в наибольшей степени способствовало повыше-

нию урожайности зерна ячменя на фоне доз 6–12 т/га, где прибавка составила соответственно 35–38%, а также урожая озимой пшеницы и гороха на фоне применения породы 6 т/га, где прибав-

ка составила соответственно 24 и 25% относительно контроля.

Влияние цеолита оказалось максимально выраженным также в отношении зерна ячменя и в меньшей мере — гороха посевного, прибавка урожайности которых составила соответственно 27–32 и 11–15% при внесении в почву цеолита 6 и 12 т/га.

Влияние бентонитовой глины также было достаточно эффективным и достоверным на урожайность культур: при внесении дозы 6 т/га урожайность зерна пшеницы, ячменя и гороха увеличивалась соответственно на 17, 37 и 27%, дозы 12 т/га — на 14, 30 и 33% относительно контроля.

В отношении побочной части урожая (соломы зерновых) в целом нужно отметить, что применение пород также способствовало увеличению ее продуктивности и в особенности — ячменя. Под воздействием диатомовой породы урожайность его соломы повышалась на 28–29, под воздействием цеолита — на 22–23, бентонитовой глины — на 18–26%. Наиболее эффективными дозами пород оказались дозы 6 и 12 т/га. Максимальная продуктивность соломы озимой пшеницы была установлена на фоне применения цеолита (увеличение показателя на 22–23%), гороха посевного — на фоне применения бентонита (на 15–19%).

Соотношение зерно : солома в урожае сельскохозяйственных растений заметно увеличивалось: пшеницы — на 12, гороха — на 11% при применении диатомита, ячменя при применении цеолитовой породы — на 10%, ячменя — на 10 и гороха — на 16% при применении бентонитовой глины. У озимой пшеницы на фоне внесения цеолитовой породы было выявлено сужение этого соотношения на 12–15% в зависимости от дозы ее внесения.

ВЫВОДЫ

1. В микрополевых опытах, проведенных на дерново-подзолистой почве Нижегородской обл., было установлено положительное действие мелиоративных доз кремнистых пород (диатомита, цеолита и бентонитовой глины) на показатели агрохимического состояния почвы и продуктивность сельскохозяйственных растений зернового звена севооборота пшеница озимая—ячмень яровой—горох посевной. В зависимости от вида высококремнистого материала и его дозы эффекты их влияния на агрохимические показатели почвы и урожайность культур различались, но в целом наиболее эффективными были дозы 6 и 12 т/га.

2. При влиянии диатомита актуальная кислотность почвы снижалась на 0.42 ед., обменная — на 0.33 ед. рН, гидролитическая — на 0.15 мг-экв/100 г.

Содержание обменных форм алюминия в почве снижалось на 0.11 мг-экв/100 г, обменных форм кальция и магния — увеличивалось соответственно на 0.39 и 0.33 мг-экв/100 г. При применении диатомовой породы фактор емкости почвенных фосфатов повышался на 55, фактор интенсивности — на 225%, в результате чего доля интенсивных соединений фосфора в почве увеличивалась почти в 2 раза. Концентрация обменных соединений калия в почве повышалась при применении диатомита на 32%. В условиях микрополевого опыта урожайность зерна и соломы озимой пшеницы увеличивалась соответственно на 0.29–0.59 и 0.29–0.32 т/га, ярового ячменя — соответственно на 0.69–1.16 и 0.82–1.27 т/га, гороха посевного — соответственно на 0.23–0.40 и 0.19–0.35 т/га.

3. При влиянии цеолита актуальная кислотность почвы снижалась на 1.11, обменная — на 0.48 ед. рН, гидролитическая — на 0.33 мг-экв/100 г. Содержание обменных форм алюминия в почве снижалось на 0.05 мг-экв/100 г, обменных форм кальция и магния — увеличивалось соответственно на 17.7 и 12.0 мг-экв/100 г. На фоне применения цеолитовой породы фактор емкости почвенных фосфатов повышался на 43, фактор интенсивности — на 92%, в результате чего доля интенсивных соединений фосфора в почве увеличивалась на 27%. Концентрация обменных соединений калия в почве повышалась при применении цеолита на 46%. В условиях микрополевого опыта с породой урожайность зерна и соломы озимой пшеницы увеличивалась соответственно на 0.09–0.19 и 0.45–0.70 т/га, ярового ячменя — на 0.51–0.98 и 0.67–1.01 т/га, гороха посевного — на 0.10–0.24 и 0.12–0.23 т/га.

4. В условиях влияния бентонитовой глины актуальная кислотность почвы снижалась на 0.65 ед., обменная — на 0.31 ед. рН, гидролитическая — на 0.20 мг-экв/100 г. Содержание обменных форм алюминия в почве снижалось на 0.19 мг-экв/100 г, обменных форм кальция и магния — увеличивалось соответственно на 0.70 и 0.24 мг-экв/100 г. При применении бентонитовой породы фактор емкости почвенных фосфатов повышался на 30, фактор интенсивности — на 175%, в результате чего доля интенсивных соединений фосфора в почве увеличивалась почти в 2 раза. Концентрация обменных соединений калия в почве повышалась при применении глины на 35%. В условиях микрополевого опыта с породой урожайность зерна и соломы озимой пшеницы увеличивалась соответственно на 0.19–0.42 и 0.27–0.40 т/га, ярового ячменя — на 0.86–1.13 и на 0.78–1.14 т/га, гороха посевного — на 0.36–0.53 и 0.30–0.55 т/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 3–15.
2. Окорков В.В. К теории химической мелиорации кислых почв // *Агрохимия*. 2019. № 9. С. 3–17.
3. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3–13.
4. Ушаков Р.Н., Левин В.И., Ручкина А.В., Головина Н.А. Некоторые параметры устойчивости агросерой почвы // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 11–22.
5. Яковлев А.С., Макаров О.А., Евдокимова М.В., Огородников С.С. Деградация земель и проблемы устойчивого развития // *Почвоведение*. 2018. № 9. С. 1167–1174.
6. Arshad M.A., Martin S. Identifying critical limits for soil indicators in agroecosystems // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2002. V. 88 (2). P. 153–160.
7. Безручко Е.В., Федотова Л.С. Доступный для растений кремний — фактор устойчивого производство картофеля // *Агрохимия*. 2021. № 8. С. 70–81.
8. Колесников М.П. Формы кремния в растениях // *Усп. биол. химии*. 2001. Т. 41. С. 301–322.
9. Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: БХВ—Петербург, 2015. 512 с.
10. Панова Г.Г., Аникина Л.М., Канаши Е.В., Удалова О.Р., Шибанов Д.В. Кремнийсодержащие хелатные микроудобрения в повышении устойчивости растений к действию стрессовых факторов // *Агрофизика*. 2012. № 3 (7). С. 31–40.
11. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // *Агрохимия*. 2019. № 1. С. 86–96.
12. Сластя И.В., Ложникова В.Н., Кондратьева В.В., Ниловская Н.Т. Действие водного стресса и соединений кремния на содержание эндогенных фитогормонов и рост ярового ячменя // *Агрохимия*. 2013. № 8. С. 38–48.
13. Ande B., Ande P., Bocharnikova E.A., Calvert D.V., Matichenkov V.V. Effect of Si-rich slag and lime on P leaching in sandy soil // *J. Amer. Soc. Sugar Cane Technol.* 2002. V. 22. P. 9–15.
14. Бойцова Л.В. Изменение физико-химических свойств в профиле дерново-подзолистой почвы различного сельскохозяйственного использования // *Агрофизика*. 2015. № 2. С. 9–15.
15. Иванов А.Л., Воробьев В.А., Иванова Ж.А. Современные деградиационные процессы в хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах // *Пробл. агрохим. и экол.* 2015. № 3. С. 15–19.
16. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Зенова Г.М., Скворцова И.Н. Влияние длительного применения средств химизации на агрохимические и микробиологические свойства дерново-подзолистой почвы // *Агрохимия*. 1998. № 5. С. 5–12.
17. Яшин М.А., Авдеева Т.Н., Козут Б.М., Маркина Л.Г., Семенов В.М., Тарасов С.И., Фрид А.С. Агрогенная трансформация лабильных гумусовых веществ и структуры дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Агрохимия*. 2015. № 9. С. 3–13.
18. Артемьева З.С., Кириллова Н.П. Роль продуктов органо-минерального взаимодействия в структурообразовании и гумусообразовании основных типов почв центра Русской равнины // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2017. Вып. 90. С. 73–95.
19. Гомонова Н.Ф. Эколого-агрохимические функции удобрений при их длительном применении (50 лет) в агроценозе на дерново-подзолистой почве: Дис. ...д-ра биол. наук. М., 2010. 278 с.
20. Матаруева И.А. Микробиологические закономерности формирования гумусных запасов дерново-подзолистых почв. Кострома: КГСХА, 2005. 190 с.
21. Русакова И.В. Микробиологические и экофизиологические параметры дерново-подзолистой почвы при длительном применении соломы и минеральных удобрений, их связь с урожайностью // *Сел.-хоз. биол.* 2020. Т. 55. № 1. С. 153–162.
22. Черников В.А., Кончиц В.А., Пупонин А.И. Влияние различных способов и приемов обработки суглинистой дерново-подзолистой почвы на структуру гуминовых кислот и эмиссию парниковых газов // *Изв. ТСХА*. 2016. № 1. С. 24–39.
23. Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // *Org. Geochem.* 2000. V. 31 (7–8). P. 697–710.
24. Иванов А.И. Некоторые закономерности изменения кислотно-основного состояния дерново-подзолистых легкосуглинистых почв при сельскохозяйственном использовании // *Агрохимия*. 2000. № 10. С. 28–33.
25. Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Влияние извести на физико-химические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность полевого севооборота при систематическом применении азотных и калийных удобрений в длительном опыте // *Агрохимия*. 2019. № 8. С. 14–17.
26. Кузьменко Н.Н. Влияние известкования на показатели плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 35–38.
27. Brahy V., Delvaux B. Cation exchange resin and test vermiculite to study soil processes in situ in a toposequence of luvisol and cambisol on loess // *Europ. J. Soil Sci.* 2001. V. 52 (3). P. 397–408.
28. Ковалевская Н.П., Завьялова Н.Е., Шаравин Д.Ю., Васбиева М.Т. Особенности микробоценоза дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении минеральных и органических удобрений // *Пробл. агрохим. и экол.* 2018. № 2. С. 24–28.
29. Кутузова Р.С., Сирота Л.Б., Орлова О.В., Воробьев Н.И. Микробное сообщество и анализ почвенно-микробиологических процессов в дерново-подзолистой почве // *Почвоведение*. 2001. № 3. С. 320–332.
30. Налиухин А.Н., Хамитова С.М., Глинушкин А.П., Авдеев Ю.М., Снетилова В.С., Лактионов Ю.В., Суров В.В., Силюянова О.В., Белозеров Д.А. Изменение метагенома прокарриотного сообщества как показатель плодородия пахотных дерново-подзо-

- листных почв при применении удобрений // Почвоведение. 2018. № 3. С. 331–337.
31. Якушев В.П., Осипов А.И., Миннулин Р.М., Воскресенский С.В. К вопросу об известковании кислых почв в России // Агрофизика. 2013. № 2 (10). С. 18–22.
32. 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 Biol. Biochem. 2014. V. 68 (1). P. 252–262.
33. 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.
34. Куликова А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: Ульянов. ГСХА им. П. А. Столыпина, 2013. 176 с.
35. Самсонова Н.Е. Кремний в почвах и растениях // Агрохимия. 2005. № 6. С. 76–86.
36. Biel K.Y., Matichenkov V.V., Fomina I.R. Protective role of silicon in living systems // Function. Foods Chronic Diseases. Richardson, 2008. V. 3. P. 208–231.
37. Cornelis J.T., Delvaux B., Georg R.B., Lucas Y., Ranger J., Opfergelt S. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review // Biogeosciences. 2011. V. 8 (1). P. 89–112.
38. Агафонов Е.В., Хованский М.В. Влияние бентонита на повышение плодородия чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2014. № 5. С. 597–601.
39. Белоусов В.С., Тараненко В.В., Дядюченко Л.В. Пролонгирующее влияние цеолитсодержащих пород Краснодарского края на азотные удобрения // Агрохимия. 2019. № 2. С. 37–42.
40. Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Погорелов А.Г. Сравнительная характеристика некоторых кремниевых удобрений // Агрохимия. 2011. № 11. С. 25–30.
41. Дан-Дан З., Пенг-Бо З., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П. Оценка объемов связывания углерода корнями риса под влиянием кремниевых удобрений // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 3. С. 17–22.
42. Матыченков В.В., Кособрюхов А.А., Бочарникова Е.А. Урожайность кукурузы и содержание хлорофилла в растениях при внесении в почву кремниевых удобрений // Агрохимия. 2013. № 5. С. 25–30.
43. Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва–растение и методы их определения // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2016. № 3. С. 37–46.
44. Капранов В.Н. Эффективность кремнийсодержащего вещества диатомита на дерново-подзолистой почве // Пробл. агрохим. и экол. 2010. № 2. С. 10–14.
45. Куликова А.Х. Влияние высококремнистых пород как удобрений сельскохозяйственных культур на урожайность и качество продукции // Агрохимия. 2010. № 7. С. 18–25.
46. 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.
47. Пашкевич Е.Б., Кирюшин Е.П. Роль кремния в питании растений и в защите сельскохозяйственных культур от фитопатогенов // Пробл. агрохим. и экол. 2008. № 2. С. 52–57.
48. Chimney M.J., Yongshan W., Matichenkov V.V., Calvert D.V. Minimizing phosphorus release from newly flooded organic soils amended with calcium silicate slag: a pilot study // Wetland. Ecol. Manag. 2007. V. 15 (5). P. 385–390.
49. Epstein E. Silicon: its manifold roles in plants // Ann. Appl. Biol. 2009. V. 155. P. 155–160.
50. Matichenkov V.V., Wei X., Liu D., Bocharnikova E.A. Theory, practice and prospection of Si fertilizer // Agri. Sci. Technol. 2013. V. 14 (3). P. 498–502.
51. Чао Л., Кси Б., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П. Влияние недостатка увлажнения и повышенного содержания соли на кремниевое состояние почв европейской части России и центрального Китая // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 3. С. 16–22.
52. Васильева Н.Г. Оценка эффективности трепела как почвенного мелиоранта // Пробл. агрохим. и экол. 2017. № 3. С. 24–30.
53. Cama J., Metz V., Ganor J. The effect of pH and temperature on kaolinite dissolution rate under acidic conditions // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66 (22). P. 3913–3926.
54. Metz V., Amram K., Ganor J. Stoichiometry of smectite dissolution reaction // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69 (7). P. 1755–1772.
55. Шабина И.С., Вилков В.С., Кузнецова Л.П. Характеристики основных сортов сельскохозяйственных культур, рекомендованных для возделывания в Волго-Вятском регионе. Н. Новгород: НГСХА, ООО «Юнион Принт», 2010. 150 с.
56. Пискунов А.С. Методы агрохимических исследований. М.: КолосС, 2004. 312 с.
57. Полякова Н.В., Володина Е.Н., Платонычева Ю.Н. Рабочая классификация почв Нижегородской области. Н. Новгород: НГСХА, 2019. 64 с.
58. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
59. Кусова Н.В., Степанова Л.П. Кипящие камни (цеолиты). Орел: ОрелГАУ, 2005. 18 с.
60. Мосталыгина Л.В., Елизарова С.Н., Костин А.В. Бентонитовые глины Зауралья: экология и здоровье человека. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. 148 с.
61. Мамонтов В.Г., Гладков А.А. Практикум по химии почв. М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2015. 272 с.
62. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
63. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 352 с.

64. Мартыросян Г.Г., Манукян А.Г., Овсепян Э.Б., Костанян К.А. Исследование адсорбционно-структурных свойств природных и обработанных диатомитов // Журн. приклад. хим. 2003. Т. 76. Вып. 4. С. 551–555.
65. Махкамова Д.Н., Содикова Ш.А., Усмонова З.Т. Bentonитовая глина, ее физико-химическая характеристика и применение в народном хозяйстве // Universum: Техн. науки. 2019. № 6 (63). С. 95–98.
66. Пономарева О.А., Тимошин С.Е., Князева Е.Е., Ордомский В.В., Ющенко В.В., Куликов Н.С., Зайковский В.И., Иванова И.И. Физико-химические и каталитические свойства цеолитных материалов с комбинированной микро-мезопористой структурой // Журн. физ. химии. 2011. Т. 85. № 12. С. 2253–2259.
67. Брек Д. Цеолитные молекулярные сита. М.: Мир, 1976. 781 с.
68. Кольцова Т.Н. Анализ структур цеолитов с общей формулой $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \times n\text{H}_2\text{O}$ // Неорг. мат.-лы. 2007. Т. 43. № 2. С. 218–226.
69. Рабо Дж. Химия цеолитов и катализ на цеолитах. М.: Мир, 1980. Т. 1. 502 с.
70. Гладкова К.Ф. Роль кремния в фосфатном питании растений // Агрохимия. 1982. № 3. С. 133–140.
71. Елешев Р.Е., Иванов А.Л., Садвакасов С.К. Изучение влияния совместного внесения фосфорных и кремнийсодержащих удобрений на фосфатный режим основных типов почв Казахстана. Сообщ. 1. Исследование влияния различных форм кремнийсодержащих удобрений // Агрохимия. 1990. № 10. С. 35–42.
72. Иванов А.Л. Изучение влияния совместного внесения фосфорных и кремнийсодержащих удобрений на фосфатный режим основных типов почв Казахстана. Сообщ. 3. Влияние кремния на сорбционную способность коллоидных фракций почв в отношении фосфатов // Агрохимия. 1992. № 5. С. 25–30.
73. Лякина О.А. Использование фосфатов пониженной растворимости и соединений кремния при выращивании сельскохозяйственных культур в условиях дерново-подзолистых почв: Дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2012. 161 с.

Influence of Diatomite, Zeolite and Bentonite Clay on Agrochemical Indicators Sod-Podzolic Soil and Yield Agricultural Crops

A. V. Kozlov^{a, #}, A. H. Kulikova^b, and I. P. Uromova^c

^aRussian State Agrarian University—Moscow Timiryazev Agricultural Academy
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127434, Russia,

^bStolypin Ulyanovsk State Agrarian University
Novyi Venets bul. 1, Ulyanovsk 432017, Russia

^cK. Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University
ul. Ulyanova 1, Nizhny Novgorod 603950, Russia

[#]E-mail: a.kozlov@rgau-msha.ru

In three-year microfield experiments on sod-podzolic light loam soil, the effect of reclamation doses (3, 6 and 12 t/ha) of siliceous rocks (diatomite, zeolite and bentonite clay) on the main agrochemical properties of the soil and crop productivity in the grain link of the crop rotation of winter wheat-spring barley-seed peas was studied. Among other positive effects, a significant effect of diatomite was found in reducing the concentration of exchangeable forms of aluminum in the soil (by 0.11 mg-eq/100 g), increasing the content of exchangeable forms of magnesium (by 0.33 mg-eq/100 g) and phosphates of soil solution (by 225%). Against the background of the influence of diatoms, barley gave the greatest increase in grain yield (by 38%) and straw (by 29%). The most significant effect of zeolite was revealed in a decrease in the actual, metabolic and hydrolytic acidity of the soil (a decrease of 1.11, 0.48 pH units and 0.33 mg-eq/100 g), as well as the concentration of exchange compounds of calcium (an increase of 17.7 mg-eq/100 g), magnesium (by 12.0 mg-eq/100 g) and potassium (by 46%). The introduction of zeolite rock contributed to the greatest increase in the yield of grain (by 32%) and straw (by 23%) of barley. The most significant influence of bentonite clay was established on the indicators of actual soil acidity (their decrease by 0.65 pH units), the content of exchangeable aluminum (decrease by 0.19 mg-eq/100 g) and phosphates of soil solution (increase by 175%). The introduction of clay contributed to the formation of the greatest increase in grain yield (by 33%) and straw (by 19%) of seed peas.

Keywords: diatomite, zeolite, bentonite clay, sod-podzolic soil, indicators of acid-base state of the soil, agrochemical properties, winter wheat, spring barley, seed peas, yield.