

ДИНАМИКА АГРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЧВЫ В МНОГОЛЕТНЕМ ПОЛЕВОМ ОПЫТЕ ПРИ ВНЕСЕНИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ИЗВЕСТИ

© 2022 г. А. С. Фрид^{1,*}, В. А. Касатиков², Т. И. Борисочкина³,
К. А. Колчанова³, Н. С. Никитина³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 р.п. Большие Вяземы, Московская обл., ул. Институт, влад. 5, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений – филиал Верхневолжского ФАНЦ
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, д. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия

³ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2022 г.

После доработки 08.05.2022 г.

Принята к публикации 10.06.2022 г.

Проанализировали многолетнюю динамику агрохимических показателей почвы в микрополевым опыте (делянки 3 м²), заложенном в 1984 г. на дерново-подзолистой глееватой супесчаной почве на моренном суглинке (Владимирская обл.). Вносили различные большие дозы осадков городских сточных вод (ОСВ) и извести (доломитовую муку) в качестве мелиорантов.

Устойчивость по годам влияния этих факторов опыта отмечена для подвижных фосфора и калия, органического углерода, но не для показателей обменного комплекса почвы. Сравнение многолетних временных динамик различных вариантов опыта с контролем при различных сочетаниях доз мелиорантов показало, что для рН_{KCl} и гидролитической кислотности (H_r) средние различия увеличивались с ростом доз извести, для содержания подвижного P₂O₅, C_{орг} и суммы обменных катионов – с ростом доз ОСВ, для показателей ЕКО и содержания обменного K₂O статистически значимых средних различий было мало. При сравнении вариантов между собой (без контроля) оказалось, что для обменных катионов и ЕКО достоверных различий временных динамик были единицы, для показателей H_r и обменного K₂O – несколько больше, для содержания подвижного P₂O₅, C_{орг} и показателя рН_{KCl} – много. Внесенные с большими дозами ОСВ фосфор и калий в значительной степени оставались в почве в трудноизвлекаемых формах. Почти 40-летнее внесение в больших дозах ОСВ и извести в пахотный слой данной почвы практически не привело к окультуриванию подпахотного слоя.

Ключевые слова: многолетний полевой опыт, внесение осадков городских сточных вод и извести, многолетняя динамика агрохимических показателей почвы, устойчивость действия факторов опыта, сравнение временных динамик почвенных показателей и доз внесения мелиорантов, дерново-подзолистая супесчаная почва, Владимирская обл.

DOI: 10.31857/S0002188122090058

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние полевые опыты – довольно распространенный метод исследования в почвоведении и агрохимии. Однако многолетнюю специфику таких опытов анализируют очень редко. Одна из причин этого – отсутствие общепринятой методики анализа подобных данных. В работе [1] представлен возможный вариант такой методики.

Цель работы – анализ многолетней динамики агрохимических показателей почвы в одном из длительных опытов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроделяночный полевой опыт заложен в 1984 г. на дерново-подзолистой глееватой супесчаной почве на моренном суглинке на территории ВНИИОУ (Судогодский р-н Владимирской обл.) [2]. Варианты опыта содержали контроль и сочетания различных доз осадков городских сточных вод (ОСВ) и извести (доломитовой муки) в качестве мелиорантов (табл. 1). Не считая контроля, в остальных вариантах дозы ОСВ имели 4 уровня (градации), дозы извести – 3. Число ор-

Таблица 1. Схема многолетнего опыта

Вариант, №	Разовые дозы внесения, т/га		Суммарно внесено за 1984–2015 гг., т/га	
	ОСВ	известь	P ₂ O ₅	K ₂ O
1 (контроль)	0	0	0	0
2	15	3	2.1	0.41
3	30	3	4.2	0.82
4	60	3	8.4	1.6
5	120	3	16.9	3.3
6	15	6	2.1	0.41
7	30	6	4.2	0.82
8	60	6	8.4	1.6
9	120	6	16.9	3.3
10	15	9	2.1	0.41
11	30	9	4.2	0.82
12	60	9	8.4	1.6
13	120	9	16.9	3.3

Примечание. Дозы ОСВ указаны при 50%-ной влажности. Внесение P₂O₅ и K₂O – это внесение валового вещества.

Таблица 2. Агрохимические показатели по разрезам полевого опыта на 1-м повторении (2015 г., медианы измерений)

Место разреза	Горизонт почвы	pH _{H₂O} /pH _{KCl}	H _Г	Ca _{обм}	Mg _{обм}	ЕКО	P ₂ O ₅ подвиж., Кирсанов/Олсен	K ₂ O обменный по Масловой	C _{орг} , сухое сжигание/по Тюрину	N _{вал} , сухое сжигание
Пашня рядом с опытом	Апах (0–20)	7.51/6.44	0.54	17.3	10	27.84	13.8/3.9	7.5	0.75/–	0.10
	А2подпах	7.24/5.64	1.1	5.35	3.3	9.75	0.17/–	6.4	0/–	0.04
	Вg	4.88/3.29	12.5	7.7	3.2	23.4	1.1/–	12.2	0/–	0.03
Вариант 1 (контроль)	Апах (0–20)	7.02/6.01	1.0	6.5	2.1	9.6	28/3.1	3.35	0.89/0.81	0.10
	А2 (25–35)	5.91/4.32	2.1	2.7	2.0	6.8	0.3/–	3.6	0/–	0.03
	В1g (45–50)	4.83/3.36	15	7.3	3.5	25.8	1.6/–	12	0.032/–	0.04
	В1g (55–60)	5.15/3.57	9.2	5.5	3.7	18.4	0/–	9.9	0/–	0.04
	В2g (70–77)	4.67/3.26	12	6.8	2.6	21.4	1.1/–	10.5	0/–	0.04
Вариант 8 (ОСВ 660 т/га, известь 6 т/га)	Апах (0–20)	7.27/6.33	1.0	12	4.1	17.1	136/7.0	3.3	1.59/1.34	0.17
	А2 (32–37)	5.73/4.28	2.8	2.0	0.75	5.55	2.1/–	2.4	0.16/–	0.05
	В1g (50–55)	4.83/3.54	10.6	3.65	1.7	15.95	0.7/–	7.3	0/–	0.04
	В2g (70–75)	4.57/3.31	13	5.0	1.9	19.9	1.1/–	9.7	0/–	0.04
Вариант 9 (ОСВ 1320 т/га, известь 6 т/га)	Апах (0–20)	7.08/6.29	1.1	19	5.1	25.2	234/8.8	3.7	2.35/1.99	0.24
	А2 (30–40)	7.05/5.76	1.0	5.0	0.9	6.9	2.0/–	2.0	0.14/–	0.05
	В1g (52–60)	4.79/3.55	7.3	3.8	1.1	12.2	0.6/–	6.2	0/–	0.03
	В2g (70–75)	4.48/3.28	13.5	7.1	2.6	23.2	0.8/–	12	0/–	0.04

Примечания. 1. Дозы ОСВ даны как суммарное внесение к данному году, дозы извести – как одноразовая доза внесения. 2. Для почвенных горизонтов указаны глубины взятия образцов, см. 3. ЕКО = H_Г + Ca_{обм} + Mg_{обм}. 4. Прочерк – отсутствие данных. 5. Плотность почвы в Апах: контроль – 1.14, вариант 8 – 1.12, вариант 9 – 1.09. То же в табл. 3–9. Единицы измерения и дозы мелиорантов те же в табл. 3.

Таблица 3. Агрохимические показатели пахотного слоя (0–20 см) (2017 г.)

Вариант	Внесено <i>ОСВ</i>	Разовая доза известки	Полевое повто- рение	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	$Ca_{обм}$	$Mg_{обм}$	$(Ca + Mg)_{обм}$	P_2O_5		$K_2O_{обм}$	С (сухое сжига- ние)	$N_{общ}$
									Кирса- нов	Олсен			
	т/га				мг-экв/100 г			мг/100 г		%			
2	180	3	1	7.36	6.53	4.4	2.9	7.3	—	8.6	3.6	1.18	0.15
3	360	3	1	7.37	6.52	3.7	4.2	7.9	58.4	10	3.4	1.21	0.15
4	720	3	1	7.34	6.58	11.9	5.5	17.4	118	12	3.1	1.67	0.19
5	1440	3	1	7.12	6.55	13.7	5	18.7	190	15	3.1	1.88	0.21
6	180	6	1	7.48	6.65	2.3	3.1	5.4	65	9.9	2.9	1.17	0.14
7	360	6	1	7.42	6.59	11.4	6.9	18.3	64.5	11	2.9	1.46	0.13
10	180	9	1	7.42	6.65	16.9	3.5	20.4	108	12	2.0	1.83	0.19
11	360	9	1	7.34	6.69	9.9	2.2	12.1	105	13	2.6	1.40	0.16
12	720	9	1	7.43	6.64	9.7	3.9	13.6	137	12	2.7	2.02	0.19
13	1440	9	1	7.26	6.59	22.4	3.5	25.9	219	6.5	3.6	1.69	0.26
1	0	0	2	7.48	6.43	5.8	3	8.8	29.1	6.5	3.4	0.83	0.11
8	720	6	2	7.32	6.53	17.3	2.7	20	146	15	7.5	1.99	0.20
9	1440	6	2	7.17	6.54	21.2	3.4	24.6	170	13.5	2.8	2.06	0.22
1	0	0	3	7.16	6.29	6.6	2.5	9.1	50.5	6.4	3.8	1.45	0.18
2	180	3	3	7.24	6.46	1.2	1.9	3.1	117	9.8	3.7	1.63	0.19
3	360	3	3	7.26	6.43	10.4	4.5	14.9	93.7	10.5	3.5	1.52	0.19
4	720	3	3	7.22	6.4	10.8	4.2	15	107	9.4	3.5	1.77	0.20
5	1440	3	3	7.02	6.38	11.7	3.9	15.6	185	10.5	4.3	2.10	0.22
6	180	6	3	7.33	6.54	5.1	5.2	10.3	68.2	10	4	1.18	0.15
7	360	6	3	7.31	6.53	12.9	6.8	19.7	117	10.5	3.8	1.56	0.18
8	720	6	3	7.34	6.49	13.4	5.7	19.1	129	12.5	3.3	1.77	0.19
9	1440	6	3	6.87	6.35	6.4	4.6	11	228	12	4.2	1.94	0.22
10	180	9	3	7.38	6.56	8.9	5.6	14.5	56.7	8.4	6.2	1.34	0.16
11	360	9	3	7.40	6.57	12	7.0	19	71.6	10.5	4	1.40	0.17
12	720	9	3	7.31	6.51	13.9	3.4	17.3	123	9.9	3.4	1.77	0.20
13	1440	9	3	7.23	6.53	10.8	2.1	12.9	174	10	3.7	1.83	0.2

ганизованных полевых повторений – 6, площадь делянки – 3 м² (2 × 1.5 м). Расположение вариантов внутри повторений – рандомизированное.

ОСВ вносили осенью в пахотный слой в 1984–1995, 2000, 2006, 2010 и 2015 гг., доломитовую муку – в 1984, 1990, 1995, 2006, 2011 и 2015 гг. Дозы известки соответствовали ≈2, 4 и 6 величинам гидролитической кислотности (H_r).

Имеется опубликованная информация об агрохимических свойствах почвы перед закладкой опыта и в 2003, 2014–2019 гг. (средние для вариантов) [3–9]. Дополнительно к этому в 2015 и 2017 гг. были проведены обследования опыта сотрудниками Почвенного института им. В.В. Докучаева (табл. 2, 3). Результаты последних в некоторых случаях для дальнейшего математического анали-

за были усреднены с ранее опубликованными. Повторим, что математический анализ опыта в настоящей работе проводили только для средних в вариантах.

Так как число изученных сроков опыта равно 8, то согласно методике [1], при анализе этих данных решали только 2 основные задачи: 1 – устойчивость по годам эффектов от доз факторов опыта на агрохимические показатели почвы, 2 – сходство и различие многолетних динамик этих же показателей между вариантами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем переходить к основным задачам, кратко обсудим данные табл. 2, 3. В первую оче-

Таблица 4. Результаты ДА агрохимических показателей почвы

Год	Доля влияния фактора/уровень значимости			
	ОСВ	известь	ОСВ	известь
	рН _{КСИ}		H _Г	
2003	0.097/–	0.61/0.05	0.80/0.01	0.13/0.05
2014	0.27/–	0.37/–	0.43/–	0.27/–
2015	0.37/0.001	0.61/0.0005	0.04/–	0.93/0.0005
2016	0.07/0.10	0.90/0.0005	0.13/0.10	0.81/0.0005
2017	0.65/0.001	0.31/0.0025	0.20/0.0005	0.79/0.0005
2017*	0.25/0.10	0.63/0.005	–/–	–/–
	Ca + Mg		ЕКО	
2003	0.96/0.01	0.006/–	0.95/0.01	0.012/–
2014	0.22/–	0.35/–	0.28/–	0.30/–
2015	0.52/0.01	0.38/0.01	0.58/0.025	0.28/0.05
2016	0.40/0.05	0.45/0.025	0.45/0.01	0.39/0.025
2017	0.35/0.01	0.59/0.0025	0.38/0.025	0.52/0.005
2017*	0.35/–	0.33/–	–/–	–/–
	P ₂ O ₅		K ₂ O	
2003	0.94/0.01	0.009/–	0.78/0.025	0.005/–
2014	0.98/0.0005	0.004/–	0.61/0.025	0.22/0.10
2015	0.97/0.0005	0.012/–	0.90/0.0005	0.089/0.0025
2016	0.96/0.0005	0.0065/–	0.82/0.0025	0.09/–
2017	0.96/0.0005	0.033/0.01	0.96/0.0005	0.014/–
2017*	0.92/0.001	0.0004/–	0.13/–	0.076/–
	C _{орг}		N _{вал}	
2014	0.96/0.025	0.01/–	0.84/0.05	0.068/–
2015	0.99/0.0005	0.0076/0.025	–/–	–/–
2016	0.99/0.0005	0.0034/–	–/–	–/–
2017	0.99/0.0005	0.0039/–	–/–	–/–
2017*	0.81/0.025	0.0044/–	0.91/0.0005	0.042/–

Примечания. 1. H_Г – гидролитическая кислотность, Ca + Mg – соответствующие обменные катионы, ЕКО – емкость катионного обмена (ЕКО = H_Г + Ca + Mg), P₂O₅ – подвижный фосфор по Кирсанову, K₂O – подвижный калий. 2. 2017* – использованы средние варианты только из табл. 3. 3. Один прочерк означает незначимость, двойной прочерк – отсутствие данных.

редь отметили (табл. 2) резкое ухудшение всех показателей плодородия уже в подпахотном слое почвы (кроме содержания обменного калия), несмотря на почти 40-летнее внесение ОСВ и извести в пахотный слой. Даже в варианте 9 сильнейшее окультуривающее воздействие мелиорантов почти не проникло в подпахотный слой. Мелиоративные дозы фосфора, кальция, магния, органического вещества не прошли вниз, несмотря на супесчаный гранулометрический состав. А если прошли, то куда делись? Этот вопрос требует специального изучения. Ясно только, что в данных условиях без глубокого механического перемешивания окультуривание почвы в смысле расши-

рения плодородного слоя не происходило. Что касается только пахотного слоя (табл. 3), то тут различия между вариантами были более закономерными.

Устойчивость по годам эффектов доз факторов. Для каждого оцененного года определяли зависимость агрохимических показателей почвы от факторов дисперсионным (ДА) и регрессионным (РА) анализами. При этом не участвовал вариант контроля, чтобы не нарушать схему опыта – полного факторного эксперимента (4 × 3).

Результаты ДА по годам представлены в табл. 4. Величина рН_{КСИ} большей частью значимо зависе-

Таблица 5. Результаты РА агрохимических показателей почвы

Год	Уравнение регрессии
2003	$pH_{KCl} = 6.28 + 0.042I_{ЗВ}, R^2 = 0.60$
2014	$pH_{KCl} = 6.63 + 0.38 \times 10^{-4}OCB - 0.06I_{ЗВ} + 0.46 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.57$
2015	$pH_{KCl} = 6.39 + 0.33 \times 10^{-3}OCB - 0.16 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.026I_{ЗВ}, R^2 = 0.93$
2016	$pH_{KCl} = 6.53 + 0.1 \times 10^{-3}OCB - 0.75 \times 10^{-7}OCB^2 + 0.056I_{ЗВ} - 0.26 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.96$
2017	$pH_{KCl} = 6.39 + 0.2 \times 10^{-3}OCB - 0.7 \times 10^{-7}OCB^2 + 0.95 \times 10^{-3}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.95$
2017*	$pH_{KCl} = 6.51 - 0.59 \times 10^{-4}OCB + 0.15 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.87$
2003	$H_r = 0.57 + 0.38 \times 10^{-3}OCB + 0.08I_{ЗВ} - 0.85 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.92$
2014	$H_r = 0.66 + 0.26 \times 10^{-3}OCB - 0.12 \times 10^{-6}OCB^2 - 0.078I_{ЗВ} + 0.6 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.67$
2015	$H_r = 0.99 - 0.16 \times 10^{-3}OCB + 0.94 \times 10^{-7}OCB^2 + 0.027I_{ЗВ} - 0.44 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.97$
2016	$H_r = 0.55 - 0.47 \times 10^{-4}OCB + 0.18 \times 10^{-7}OCB^2 - 0.025I_{ЗВ} + 0.14 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.94$
2017	$H_r = 0.79 - 0.15 \times 10^{-3}OCB + 0.53 \times 10^{-7}OCB^2 - 0.2 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.98$
2003	$S = 6.78 + 0.27 \times 10^{-2}OCB - 0.035I_{ЗВ}, R^2 = 0.96$
2014	$S = 7.65 + 0.62 \times 10^{-3}OCB + 0.81I_{ЗВ} - 0.059I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.56$
2015	$S = 7.36 + 0.44 \times 10^{-3}OCB + 0.29I_{ЗВ} - 0.019I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.90$
2016	$S = 7.68 + 0.64 \times 10^{-3}OCB - 0.26 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.047I_{ЗВ}, R^2 = 0.83$
2017	$S = 7.34 + 0.74 \times 10^{-3}OCB - 0.22 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.095I_{ЗВ}, R^2 = 0.93$
2017*	$S = -3.59 + 0.015OCB - 0.66 \times 10^{-5}OCB^2 + 4.39I_{ЗВ} - 0.3I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.66$
2003	$EKO = 7.47 + 0.31 \times 10^{-2}OCB - 0.46 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.96$
2014	$EKO = 8.35 + 0.69 \times 10^{-3}OCB + 0.73I_{ЗВ} - 0.053I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.58$
2015	$EKO = 8.32 + 0.43 \times 10^{-3}OCB + 0.32I_{ЗВ} - 0.024I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.85$
2016	$EKO = 8.19 + 0.59 \times 10^{-3}OCB - 0.24 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.038I_{ЗВ}, R^2 = 0.82$
2017	$EKO = 8.19 + 0.59 \times 10^{-3}OCB - 0.17 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.071I_{ЗВ}, R^2 = 0.90$
2003	$P_2O_5 = 10.3 + 0.25OCB - 0.96 \times 10^{-4}OCB^2, R^2 = 0.92$
2014	$P_2O_5 = 61.1 + 0.1OCB - 0.13 \times 10^{-4}OCB^2, R^2 = 0.98$
2015	$P_2O_5 = 57.0 + 0.09OCB - 0.29 \times 10^{-4}OCB^2 + 0.077I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.98$
2016	$P_2O_5 = 51.3 + 0.16OCB - 0.31 \times 10^{-4}OCB^2, R^2 = 0.96$
2017	$P_2O_5 = 59.5 + 0.053OCB + 0.28 \times 10^{-4}OCB^2 + 0.3I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.99$
2017*	$P_2O_5 = 63.3 + 0.09OCB, R^2 = 0.90$
2003	$K_2O = 3.96 + 0.11 \times 10^{-5}OCB^2, R^2 = 0.77$
2014	$K_2O = 4.90 - 0.95 \times 10^{-3}OCB + 0.12 \times 10^{-5}OCB^2 + 0.79 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.81$
2015	$K_2O = 3.16 + 0.21 \times 10^{-2}OCB - 0.65 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.15I_{ЗВ} - 0.69 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.98$
2016	$K_2O = 2.52 + 0.2 \times 10^{-2}OCB - 0.74 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.28I_{ЗВ} - 0.025I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.90$
2017	$K_2O = 3.24 + 0.59 \times 10^{-3}OCB - 0.11 \times 10^{-6}OCB^2 - 0.74 \times 10^{-3}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.97$
2017*	Нет зависимости
2014	$C_{орг} = 0.98 + 0.49 \times 10^{-3}OCB, R^2 = 0.95$
2015	$C_{орг} = 0.92 + 0.84 \times 10^{-3}OCB - 0.22 \times 10^{-6}OCB^2 - 0.048I_{ЗВ} + 0.43 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.995$
2016	$C_{орг} = 0.85 + 0.54 \times 10^{-3}OCB + 0.63 \times 10^{-2}I_{ЗВ}, R^2 = 0.991$
2017	$C_{орг} = 0.80 + 0.7 \times 10^{-3}OCB - 0.15 \times 10^{-6}OCB^2 + 0.56 \times 10^{-2}I_{ЗВ}, R^2 = 0.99$
2017*	$C_{орг} = 1.12 + 0.13 \times 10^{-2}OCB - 0.51 \times 10^{-6}OCB^2, R^2 = 0.76$
2014	$N_{вал} = 0.096 + 0.43 \times 10^{-4}OCB + 0.2 \times 10^{-3}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.92$
2017*	$N_{вал} = 0.184 + 0.49 \times 10^{-4}OCB - 0.014I_{ЗВ} + 0.12 \times 10^{-2}I_{ЗВ}^2, R^2 = 0.91$

Примечания. 1. Размерность H_r , S и EKO – мг-экв/100 г, P_2O_5 и K_2O – мг/100 г, $C_{орг}$ и $N_{вал}$ – %. 2. S = Ca + Mg, OCB – суммарная доза, внесенная к данному году (т/га), $I_{ЗВ}$ – разовая доза доломита при конкретном внесении (т/га).

ла от обоих факторов, причем большее влияние оказало внесение извести. Определенной связи со сроками внесения в этом случае не установлено. Для показателя гидролитической кислотности установлена несколько другая закономерность: видна тенденция к уменьшению со временем влияния доз *ОСВ* и к увеличению влияния доз извести. Аналогичные тенденции во времени показаны для обменных катионов и ЕКО, что свидетельствовало о некоем едином процессе преобразования обменного комплекса почвы, пополняемого из *ОСВ* и доломита.

Для содержания подвижного фосфора во все годы отмечено подавляющее влияние доз *ОСВ* и практически отсутствие влияния доз извести. Для содержания подвижного калия выявлена подобная закономерность, хотя в среднем влияние доз *ОСВ* было меньшим. Для содержания $C_{орг}$ и валового азота результаты были подобны тем, что получены для содержания подвижного фосфора.

Если рассматривать вышеописанное с точки зрения устойчивости влияния факторов опыта, то она отмечена для содержания подвижных фосфора и калия, $C_{орг}$, а для показателей обменного комплекса устойчивости влияние не было обнаружено.

Рассмотрим результаты РА. В РА везде использовали квадратичную модель для обоих факторов, наименее значимые члены модели отбрасывали, достигая варианта модели с наименьшей ошибкой. Эти варианты представлены в табл. 5, они отражают основные закономерности и в целом подтверждали результаты ДА.

На величину pH_{KCl} в большинстве лет влияли оба фактора, причем эффект доз *ОСВ* в 2015–2017 гг. был нелинейным (проходил через максимум). В 2015 г. максимум эффекта соответствовал суммарной дозе 1000, в 2016 – 670, в 2017 – 1430 т/га. В целом можно считать влияние *ОСВ* на pH_{KCl} устойчивым. Эффект от доз извести тоже был устойчивым (повышение показателя pH_{KCl}), за исключением 2014 г., когда зависимость проходила через минимум при дозе 6.5 т извести/га.

Возрастание доз *ОСВ* в первые 2 представленных срока увеличивало величину H_r , в последующем (после переходного 2015 г.) – уменьшало. Влияние доз извести на показатель H_r проходило то через максимум, то через минимум. Таким образом, не было устойчивого характера влияния факторов во времени.

Влияние доз *ОСВ* на сумму обменных оснований можно считать устойчивым во времени в первом приближении (возрастание S), т.к. рассчитанные по уравнениям максимумы были близки к

верхним границам реальных доз. Влияние доз извести тоже можно считать устойчиво положительным по тем же причинам, кроме 2003 г.

Величина ЕКО возрастала во все годы опыта с ростом доз *ОСВ*, т.е. воздействие было устойчивым. С ростом доз извести отмечена другая закономерность: в 2003 г. – снижение ЕКО, в 2014–2015 гг. – возрастание ЕКО до дозы извести 6.7–6.9 т/га и снижение при больших дозах, в 2016–2017 гг. – возрастание ЕКО во всем диапазоне доз извести. Таким образом, воздействие доз извести на данном отрезке времени было неустойчивым. В этом случае можно говорить о постепенном переходе от снижающего влияния извести к возрастающему, при этом учитывая, что 2016 и 2017 гг. – это первые годы после очередного внесения извести. Можно также отметить, что и ДА и РА указывали на изменчивость величины ЕКО в условиях данного опыта: изменчивость как внутри отдельных лет, так и между годами.

На содержание подвижного фосфора во все исследованные годы влияние доз *ОСВ* было положительным, но большей частью нелинейным с замедлением роста (кроме 2017 г.). Такая закономерность создавала впечатление, что при больших дозах *ОСВ* часть внесенного фосфора оставалась недоступной методу Кирсанова. Влияние доз извести тоже было положительным, но проявлялось только 2 года (2015 и 2017). Таким образом, влияние факторов опыта на содержание подвижного фосфора было в первом приближении устойчивым.

На содержание подвижного калия влияние доз *ОСВ* было положительным и нелинейным, несколько выпадал 2014 г., когда зависимость проходила через минимум при суммарной дозе 400 т *ОСВ*/га. Влияние доз извести в этом случае было неоднозначным: в 2003 г. его не фиксировали, в 2014–2015 гг. оно было положительным, в 2016 г. проходило через максимум при разовой дозе 5.6 т/га, а в 2017 г. было отрицательным. Таким образом, влияние доз *ОСВ* в этом случае можно считать более или менее устойчивым, а влияние доз извести неустойчивым (имелась временная динамика влияния).

На содержание органического углерода увеличение доз *ОСВ* влияло ожидаемо положительно (и нелинейно) все годы, т.е. устойчиво. Влияние доз извести менялось со временем (было неустойчивым): в 2014 г. оно не проявилось, в 2015 г. проходило через минимум при разовой дозе 5.6 т/га, в дальнейшем было положительным.

Влияние факторов на содержание валового азота почвы описывают данные только за 2 года,

Таблица 6. Сходство пар вариантов опыта и значимость различий их временных динамик для содержания Ca + Mg

		Варианты												
		1(К)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Варианты	1(К)	X	54	39	24	15	33	23	14	9	20	20	20	14
	2		X	<u>71</u>	39	23	<u>73</u>	33	20	12	32	34	34	22
	3	-0.59*		X	69	35	<u>87</u>	62	29	15	56	57	61	36
	4				X	63	57	<u>79</u>	39	20	65	69	<u>90</u>	66
	5	-1.9		-1.3	-0.61*	X	33	43	38	25	41	46	62	<u>81</u>
	6	-0.48*	-0.53*				X	49	28	16	51	56	57	33
	7							X	44	18	<u>80</u>	<u>75</u>	<u>79</u>	56
	8	-2.9*		-2.2*				-1.2*	X	44	55	54	46	51
	9	-2.9	-3.2*	-2.3*			-3.2*			X	21	23	22	27
	10										X	<u>95</u>	<u>74</u>	56
	11	-1.6*										X	<u>83</u>	62
	12	-1.6*		-0.89*									X	<u>74</u>
	13	-2.2*		-1.6*	-0.8*				-0.67					X

*Отмечены слабозначимые средние разности (уровень значимости 0.10). То же в табл. 7, 8.

Таблица 7. Сходство пар вариантов опыта и значимость различий их временных динамик содержания подвижного P₂O₅

		Варианты												
		1(К)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Варианты	1(К)	X	57	48	22	11	59	41	19	9	48	40	20	10
	2	-35	X	<u>92</u>	43	19	<u>90</u>	<u>85</u>	39	15	<u>91</u>	<u>83</u>	41	18
	3	-51		X	51	21	<u>86</u>	<u>94</u>	45	16	<u>91</u>	<u>88</u>	48	20
	4	-74	-42	-36	X	46	46	63	<u>86</u>	30	55	67	<u>89</u>	41
	5	-140	-91	-88	-43	X	18	25	53	67	22	26	55	<u>96</u>
	6	-30			+44	+87	X	<u>82</u>	38	14	<u>94</u>	<u>84</u>	39	17
	7	-60	-16	-8.7*	+27*	+79	-17*	X	56	19	<u>92</u>	<u>97</u>	59	24
	8	-82	-50	-44		+35	-52	-35	X	39	47	58	<u>95</u>	49
	9	-150	-100	-95	-56		-100	-87	-48	X	16	19	38	69
	10	-41			+36	+85	-8.6		+43	+97	X	<u>95</u>	48	20
	11	-47	-15*		+27	+70	-17		+35	+83	-8.8*	X	59	24
	12	-81	-49	-43		+36	-51	-34		+49	-43	-34	X	52
	13	-130	-94	-85	-46		-90	-78	-38		-88	-72	-39	X

поэтому об устойчивости говорить затруднительно. Влияние доз ОСВ было положительным и линейным, а влияние доз извести — нелинейным, при этом положительным в 2014 г. и проходящим через минимум при дозе 5.8 т/га в 2017* г.

Сходство и различие вариантов в зависимости от многолетних временных динамик агрохимиче-

ских показателей почвы. Общее представление о временных динамиках агрохимических показателей почвы дает рис. 1. На нем показаны в условном временном масштабе многолетние изменения для контрольного варианта и вариантов с наименьшими и наибольшими дозами мелиорантов (для уменьшения перегруженности рисунка).

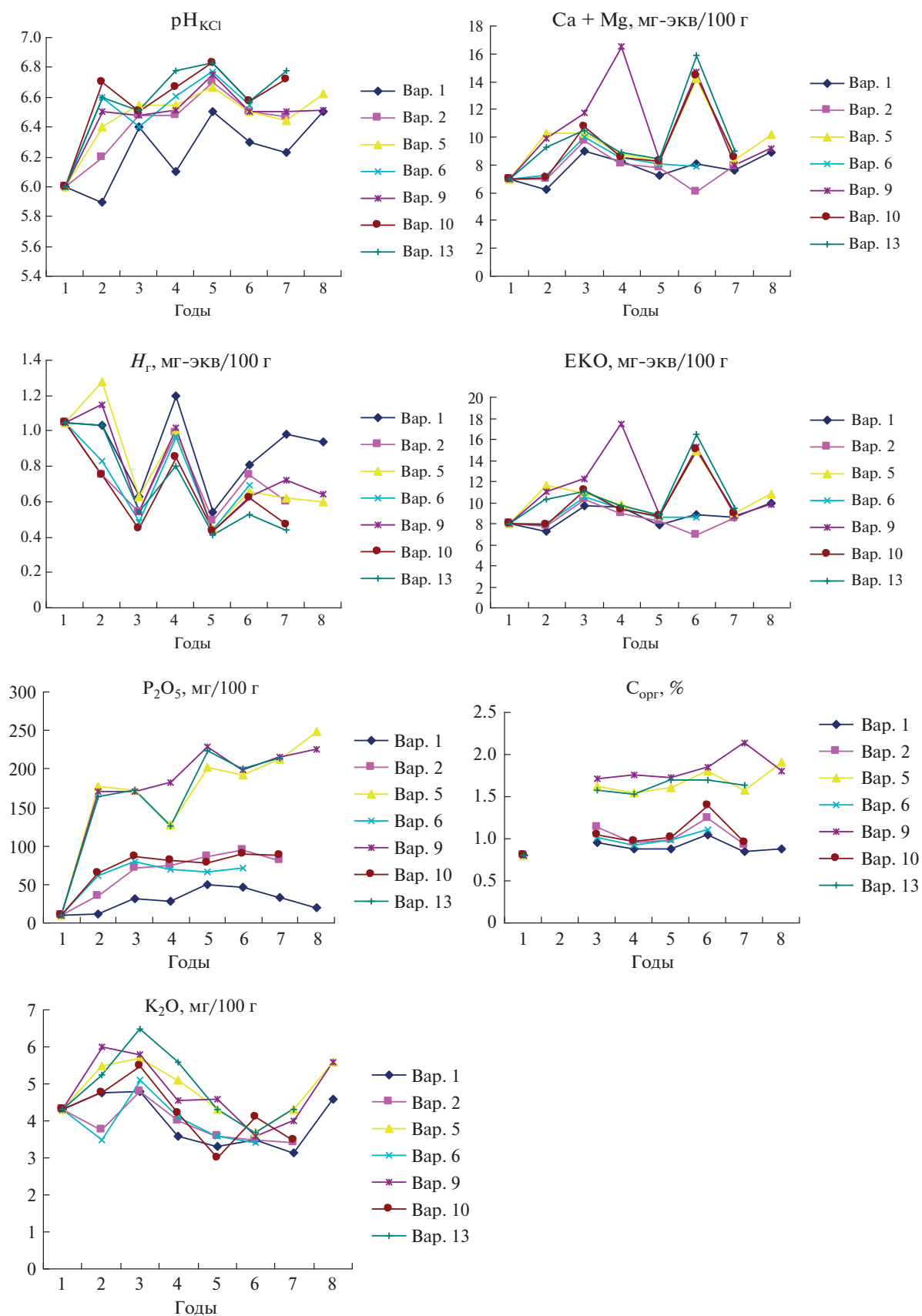


Рис. 1. Многолетняя динамика агрохимических показателей почвы. По оси абсцисс – годы: 1 – перед закладкой опыта, 2 – 2003, 3 – 2014, 4 – 2015, 5 – 2016, 6 – 2017, 7 – 2018, 8 – 2019 г.

Таблица 8. Зависимость значимой средней разницы многолетних динамик (между контролем и другими вариантами) агрохимических показателей почвы от градаций факторов опыта

pH _{KCl}					
Градации <i>ОСВ</i>					
		1	2	3	4
Градации извести	1	-0.20	-0.24	-0.27	-0.23
	2	-0.29*	-0.29	-0.27	-0.23
	3	-0.37	-0.36	-0.34	-0.38
<i>H_T</i>					
Градации <i>ОСВ</i>					
		1	2	3	4
Градации извести	1	+0.15	+0.17	+0.09	
	2	+0.13	+0.19	+0.11	+0.13
	3	+0.23	+0.20	+0.16*	+0.21
Ca + Mg					
Градации <i>ОСВ</i>					
		1	2	3	4
Градации извести	1		-0.59*		-1.9
	2	-0.48*		-2.9*	-2.9
	3		-1.6*	-1.6*	-2.2*
ЕКО					
Градации <i>ОСВ</i>					
		1	2	3	4
Градации извести	1				-1.8*
	2			-2.8*	-2.7
	3				-2.0*
P ₂ O ₅					
Градации <i>ОСВ</i>					
		1	2	3	4
Градации извести	1	-35	-51	-74	-140
	2	-30	-60	-82	-150
	3	-41	-47	-81	-130
K ₂ O					
Градации <i>ОСВ</i>					
		1	2	3	4
Градации извести	1				-0.81
	2				-0.81
	3				-0.94
C _{орг}					
Градации <i>ОСВ</i>					
		1	2	3	4
Градации извести	1	-0.11	-0.19	-0.34	-0.65
	2	-0.06	-0.20	-0.34	-0.78
	3	-0.13	-0.18	-0.36	-0.59

Для показателя pH_{KCl} временные ряды близки между собой, но контрольный вариант заметно отличается меньшими показателями, причем для него видны сильные изменения от года к году и общая тенденция к росту. Для гидролитической кислотности отмечена похожая закономерность с сильными изменениями, но контрольный вариант заметно не отличался от других. Для суммы обменных оснований и ЕКО временные ряды для вариантов в основном были довольно близки друг к другу с уходом вверх при самых высоких дозах *ОСВ*. Для содержания P₂O₅ ряды закономерно повышались с ростом доз *ОСВ*. При малых и средних дозах *ОСВ* была видна стабилизация уровня содержания P₂O₅ со временем, а при больших дозах продолжается его рост. Для содержания K₂O такой четкой закономерности не обнаружено, изменения в вариантах более или менее были синхронными. Для содержания C_{орг} закономерность была похожа на временной ряд содержания подвижного фосфора.

Парные сходства временных динамик вариантов (по шкале от 0 до 100%) рассчитывали, как указано в работе [1], по всей совокупности вариантов. В качестве примера эти сходства показаны в табл. 6 и 7 для обменных оснований и подвижного фосфора – верхние треугольники таблиц. Уровни сходства 70% и выше отмечены подчеркиванием.

Парные различия временных динамик вариантов оценивали по *t*-критерию для сопряженных выборок. В табл. 6 и 7 (нижние треугольники) показаны только значимые по *t*-критерию средние разности, причем слабые значимые (уровень значимости 0.10) отмечены звездочкой.

По смыслу ясно, что, если временные динамики вариантов имеют низкий уровень сходства, то они должны иметь значимые различия по *t*-критерию, и наоборот. Однако из-за различия алгоритмов этих подходов данная закономерность выполняется не строго. Поэтому считали более вероятным результат, когда оба подхода не противоречили друг другу.

Прежде всего, рассмотрим сравнение всех вариантов с контрольным. Для всех агрохимических показателей, кроме 2-х случаев для C_{орг}, соответствующие уровни сходства были невелики. Тем не менее, значимые различия почти для всех вариантов с контролем отмечены только для pH_{KCl}, *H_T*, содержания P₂O₅ и C_{орг}, для обменных катионов, ЕКО и K₂O этого не установлено.

Из этих расчетов видно, что, например, для Ca + Mg различающимися можно признать вре-

Таблица 9. Сопоставление многолетних динамик суммарного внесения P_2O_5 и K_2O с осадками сточных вод и содержания подвижных форм в почве, мг/100 г

Вариант, №	Год					
	2003	2014	2015	2016	2017	2018
Фосфор						
2						
Почва	34.2	72	75	86	94	81.6
Внесено валового	78	86	86	93	93	93
Внесено подвижного	16.5	18	18	20	20	20
5						
Почва	177	172	127	202	193	212
Внесено валового	640	710	710	770	770	770
Внесено подвижного	140	150	150	160	160	160
Калий						
2						
Почва	3.75	4.8	4.0	3.6	3.5	3.4
Внесено валового	15	17	17	18	18	18
Внесено подвижного	1.0	1.1	1.1	1.25	1.25	1.25
5						
Почва	5.5	5.7	5.1	4.3	3.7	4.3
Внесено валового	130	140	140	150	150	150
Внесено подвижного	8.6	9.5	9.5	10	10	10

менные динамики следующих вариантов (табл. 6): 1 (контроль) и 5 (градация доз ОСВ = 4, градация доз извести = 1), 1(К) и 9(4, 2), 3(2, 1) и 5(4, 1), 7(2, 2) и 13(4, 3). Видно, что где-то различия были обусловлены дозами одного фактора, а где-то – дозами обоих факторов опыта. Аналогично можно оценить пары вариантов и по другим агрохимическим показателям.

У разных показателей количество надежно различающихся по многолетней динамике пар вариантов сильно менялось. Например, для обменных оснований установлено всего 4 таких пары (см. выше). Для ЕКО же имеется лишь одна пара – варианты 1 и 9. Это можно расценить как слабое влияние факторов опыта на временную динамику обменного комплекса пахотного слоя.

Для других агрохимических показателей почвы найдены десятки различающихся по динамике пар вариантов. Для содержания подвижного фосфора (табл. 7) все варианты с внесением мелиорантов отличаются от контроля, а между собой

они тоже часто различаются за счет разных доз *ОСВ* или извести. Подобная ситуация установлена и для pH_{KCl} и содержания $C_{орг}$. Таким образом, для этих агрохимических показателей почвы многолетняя динамика сильно зависела от доз мелиорантов.

Несколько меньше различающихся по динамике пар вариантов для H_T и K_2O : для H_T большинство вариантов отличалось от контроля, а в остальных случаях различия ожидаемо были связаны с разными дозами извести; для содержания K_2O отличались от контроля лишь 3 варианта с максимальными дозами *ОСВ* (варианты 5, 9, 13), а различия в других парах вариантов почти всегда были связаны с разницей в дозах *ОСВ*.

Представляет интерес рассмотреть отличия многолетних динамик в вариантах в зависимости от градаций (доз) факторов опыта как части общего анализа, изложенного выше (табл. 8). Для этого использованы значимые средние различия. Для pH_{KCl} видна тенденция к росту абсолютной разности с увеличением дозы извести; аналогичная закономерность отмечена для показателя H_T . Для показателя $Ca + Mg$ большинство средних разниц было слабо значимо или не значимо, но видна тенденция к росту абсолютных величин с увеличением доз *ОСВ*. Для показателя ЕКО и содержания K_2O значимых средних разниц было очень мало. Для содержания P_2O_5 и $C_{орг}$ все разницы с контролем были значимы и однозначно увеличивались с ростом дозы *ОСВ*.

Динамики внесения фосфора и калия и их содержания в пахотном слое. Рассмотрим, как сопрягались эти статьи баланса фосфора и калия в данном опыте. Для краткости соответствующие данные приведены в табл. 9 только для вариантов с наименьшей и наибольшей дозой внесения *ОСВ*. Так как в *ОСВ* измерили как валовое содержание, так и подвижные формы фосфора и калия, то сопоставлены обе эти формы. Содержание P_2O_5 и K_2O в *ОСВ* менялось в зависимости от года внесения, поэтому для данной задачи использовали медианные величины.

При наименьших дозах *ОСВ* (вариант 2) содержание подвижного фосфора в почве оказалось близко к валовому внесению, но значительно больше внесения подвижной формы. Для содержания K_2O отмечена другая закономерность: содержание в почве подвижной формы было заметно меньше валового внесения, но больше внесения обменной формы, содержащейся в *ОСВ*.

При наибольших дозах внесения *ОСВ* (вариант 5) содержание подвижного P_2O_5 было не-

сколько больше внесенной подвижной формы, но во много раз меньше внесенного валового фосфора. Содержание подвижного калия почвы было меньше внесенного обменного и значительно меньше внесенного валового калия.

Так как миграции фосфора и калия вглубь почвы практически не обнаружено (табл. 2), то с точки зрения баланса питательных веществ в этом случае не учтен в основном вынос их урожаем растений. Скорее всего, это могло повлиять на сопоставление данных о содержании обменного калия при малых дозах внесения *ОСВ*, когда внесенное валовое количество было лишь несколько больше найденного подвижного калия в почве. В остальных случаях преобладали чисто почвенные химические и физико-химические процессы. Валовые фосфор и калий из *ОСВ* лишь частично переходили в подвижные формы, оставаясь в основном в трудноизвлекаемом запасе.

ВЫВОДЫ

1. Устойчивость влияния факторов опыта (внесение осадка сточных вод (*ОСВ*), извести) в зависимости от года опыта отмечена для содержания подвижных фосфора и калия, органического углерода почвы, но эта закономерность не выявлена для показателей обменного комплекса почвы.

2. Сравнение многолетних временных динамик различных вариантов опыта с контролем в зависимости от доз мелиорантов показало, что для показателей pH_{KCl} и H_T средние разницы увеличивались с ростом доз извести, для содержания P_2O_5 , $C_{орг}$ и суммы обменных катионов – с ростом доз *ОСВ*, для показателя ЕКО и содержания K_2O значимых средних разниц было мало.

3. При сравнении вариантов опыта между собой (без контроля) оказалось, что для показателей $Ca + Mg$ и ЕКО достоверных различий были единицы, для H_T и K_2O – несколько больше, для P_2O_5 , $C_{орг}$ и pH_{KCl} – много.

4. Внесенные с большими дозами *ОСВ*, фосфор и калий в значительной степени оставались в почве в трудноизвлекаемых формах.

5. Почти 40-летнее внесение *ОСВ* и извести в пахотный слой дерново-подзолистой глееватой супесчаной почвы на моренном суглинке показало, что окультуривания подпахотного слоя практически не произошло. Вопрос требует специального изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид А.С. Рекомендации к анализу данных многолетних полевых опытов (проект) // Агрохимия.

2022. № 3. С. 81–93.

<https://doi.org/10.31857/S0002188122030048>

2. Реестр аттестатов длительных опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами Российской Федерации. Изд. 2-е. М.: ВНИИА, 2005. С. 130–131.
3. Касатиков В.А., Раскатов В.А., Шабардина Н.П. Последствие осадка сточных вод на свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и урожайность ячменя // Плодородие. 2015. № 4 (85). С. 27–29.
4. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние систематического применения осадков городских сточных вод на агроэкологические и физические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы // “75 лет Геосети опытов с удобрениями” Мат-лы Всерос. совещ. научн. учрежд.-участников Геосети опытов с удобр. М., 2016. С. 108–113.
5. Касатиков В.А., Шабардина Н.П., Раскатов В.А. Последствие систематического применения осадка городских сточных вод по фонам известкования на агробиологические и экологические свойства дерново-подзолистой почвы // Плодородие. 2017. № 1. С. 43–46.
6. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Действие систематического применения осадка городских сточных вод на агроэкологические свойства почвы, урожайность культур в длительном опыте // “Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг.”. Мат-лы Всерос. координац. совещ. научн. учрежд.-участников Географич. сети опытов с удобрениями / Под ред. В.Г. Сычева. М., 2018. С. 107–116.
7. Касатиков В.А., Анисимова Т.Ю., Шабардина Н.П. К вопросу о мелиоративном влиянии систематического применения осадка городских сточных вод на агроэкологические свойства слабокультуренной дерново-подзолистой почвы // Мелиорация. 2018. № 3 (85). С. 78–84.
8. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Последствие мелиоративных доз осадка городских сточных вод в сочетании с известкованием на агробиологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы // Мелиорация. 2019. № 2 (88). С. 59–63.
9. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние торфо-гуминового удобрения на фоне последствия мелиоративных доз осадка сточных вод на агроэкологические показатели агроценоза и продуктивность культур звена севооборота // “Биологический круговорот питательных веществ при использовании удобрений и биоресурсов в системах земледелия различной интенсификации”. Суздаль–Иваново, 2021. С. 179–184.

Dynamics of Agrochemical Indicators of Soil in Long-Term Field Experience in the Application of Sewage Sludge and Lime

A. S. Frid^{a, #}, V. A. Kasatikov^b, T. I. Borisochkina^c,
K. A. Kolchanova^c, and N. S. Nikitina^c

^aThe All-Russian Scientific Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, vlad. 5, Moscow region, Bolshye Vyazemy 143050, Russia

^bAll-Russian Research Institute of Organic Fertilizers – Branch of the Verkhnevolzhsky FASC
601390 Vladimir region, Sudogodsky district, Vyatkino village, Pryanishnikova str., 2, Russia

^cFRC “V.V. Dokuchaev Soil Institute”
Puzhevsky p. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia

[#]E-mail: asfrid@mail.ru

We analyzed the long-term dynamics of agrochemical soil indicators in a microfield experiment (plots of 3 m²), laid in 1984 on sod-podzolic sandy loam on moraine loam (Vladimir region). Various large doses of municipal sewage sludge (SS) and lime (dolomite flour) were introduced as meliorants. The stability over the years of the influence of these factors of experience was noted for mobile phosphorus and potassium, organic carbon, but not for indicators of the exchange complex of the soil. Comparison of long-term time dynamics of various variants of the experiment with control with different combinations of doses of meliorants showed that for pH_{KCl} and hydrolytic acidity (H_a), the average differences increased with increasing doses of lime, for the content of mobile P₂O₅, C_{org} and the amount of exchangeable cations – with increasing doses of SS, for indicators of cation exchange capacity (CEC) and the content of exchangeable K₂O statistically significant average differences it wasn't enough. When comparing the variants with each other (without control), it turned out that there were only units of significant differences in time dynamics for exchange cations and CEC, slightly more for H_a and exchange K₂O, and a lot for the content of mobile P₂O₅, Sorg and pH_{KCl}. Phosphorus and potassium introduced with large doses of SS largely remained in the soil in hard-to-recover forms. Almost 40 years of application in large doses of SS and lime to the arable layer of this soil practically did not lead to the cultivation of the sub-arable layer.

Key words: long-term field experience, precipitation of urban wastewater and lime, long-term dynamics of agrochemical soil indicators, stability of the effect of experience factors, comparison of time dynamics of soil indicators and doses of ameliorants, sod-podzolic sandy loam soil, Vladimir region.