

АГРОХИМИЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 631.8:631.45:631.445.2

ЭВТРОФИКАЦИЯ ПАХОТНОЙ ПОЧВЫ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ И ОРГАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ

© 2023 г. В. М. Семенов^а, *, Т. Н. Лебедева^а, Н. Б. Зинякова^а, Д. А. Соколов^а, М. В. Семенов^б

^аИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2, Пущино, Московская область, 142290 Россия

^бПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер, 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: v.m.semenov@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2022 г.

После доработки 29.06.2022 г.

Принята к публикации 28.07.2022 г.

Под агрогенной эвтрофикацией почвы понимается ее искусственное обогащение органическим углеродом и питательными элементами в результате внесения минеральных и органических удобрений с целью повышения плодородия почвы и продуктивности растений. Эвтрофикация серой лесной почвы (Luvisc Retic Greyzemis Phaeozems (Loamic)) создавалась ежегодным внесением возрастающих доз минеральных (N_{90-360} , P_2O_5 75–300 и K_2O 100–400 кг/га) и органических (свежий навоз крупного рогатого скота от 25 до 100 т/га) удобрений под культуры пятипольного севооборота в течение девяти лет микрополевого опыта. Количество внесенного с навозом NPK было приблизительно равным соответствующим дозам минеральных удобрений. Скорость обогащения почвы $C_{орг}$ при минеральной и органической системах удобрения составляла соответственно 0.29–0.38 и 0.76–1.56 г/(кг год), $N_{общ}$ – 0.04–0.06 и 0.06–0.09 г/(кг год), подвижным P_2O_5 – 4–57 и 11–55 мг/(кг год), подвижным K_2O – 5–44 и 6–31 мг/(кг год). Дозы удобрений при обеих системах были самым значимым фактором накопления в почве азота нитратов, подвижных форм фосфора и калия, тогда как накопление $N_{общ}$ контролировалось длительностью применения удобрений. Содержание $C_{орг}$ в почве при органическом и минеральном удобрении зависело от дозы навоза и от длительности внесения NPK соответственно. Эвтрофикация почвы минеральными удобрениями сопровождалась уменьшением pH почвы, а эвтрофикация органическими удобрениями, наоборот, вела к увеличению pH. Подчеркивается, что переудобренность и многолетнее применение удобрений являются главными факторами развития почвенной эвтрофикации и сопутствующего изменения pH почвы.

Ключевые слова: серая лесная почва, $C_{орг}$, $N_{общ}$, $N-NO_3^-$, подвижный P_2O_5 , подвижный K_2O , pH почвы, переудобренность

DOI: 10.31857/S0032180X22600676, **EDN:** JKKEYD

ВВЕДЕНИЕ

Обогащение среды питательными элементами называется эвтрофикацией, а обеднение – олиготрофикацией. Эвтрофикация и олиготрофикация присущи наземным и водным, природным и сельскохозяйственным экосистемам [26, 36, 39, 46, 47, 51]. Главными признаками эвтрофных экосистем являются высокая обеспеченность почвы одним или несколькими питательными элементами и высокая продуктивность растительных и микробных сообществ. Термины олиготрофный, мезотрофный и эвтрофный применимы только к питательным веществам, а не к обогащению катионами или уровню pH [50].

Олиготрофные экосистемы, как правило, малопродуктивные, характеризуются низким содержанием в почве питательных веществ и слабой их доступностью растениям и микроорганизмам.

Известно выделение эвтрофных и олиготрофных типов торфяных почв [20], эвтрофных, мезотрофных и олиготрофных видов растительности [38, 43], копитрофных и олиготрофных микроорганизмов, растущих соответственно на богатых и бедных питательных средах [15, 33, 45]. Эвтрофикация (олиготрофикация) естественных экосистем развивается в течение от нескольких десятилетий или сотен лет до тысячелетий [36, 39]. В агроэкосистемах и сопредельных средах признаки эвтрофикации или олиготрофикации могут проявляться в течение нескольких лет и сохраняться продолжительное время из-за избыточного накопления остаточных фосфатов в удобренной почве [46, 47, 51].

Продуктивность растительных сообществ в наземных экосистемах лимитируется преимущественно азотом и в меньшей мере фосфором и калием, в водных – фосфором и реже азотом [29, 47],

рост микробной биомассы — углеродом и отчасти азотом [28, 44]. Поэтому углерод, азот и фосфор являются главными элементами, контролирующими трофность почвы и экосистемы в целом, а соотношения C/N, C/P и N/P в почве — чувствительными индикаторами и предикторами [42]. Атмосферные выпадения азота являются главной причиной эвтрофикации лесных экосистем [40, 41, 49]. Эвтрофикация лесных почв сопровождается изменением видового состава растительности, в частности исчезновением олиготрофных видов [41]. Увеличение продуктивности лесов по мере роста концентрации CO₂ в атмосфере и глобального потепления сопровождается олиготрофикацией лесных почв [26].

Трофность почв агроэкосистем зависит от уровня и продолжительности применения минеральных и органических удобрений. При экстенсивном земледелии без применения удобрений или внесении их в дозах, не компенсирующих вынос питательных веществ с урожаем (дефицитный баланс), происходит истощение естественного плодородия почвы [5, 7]. Агрогенная олиготрофикация почвы в этом случае может перерасти в питательную деградацию, как это было характерно для пахотных почв Российской Федерации после резкого уменьшения применения удобрений с начала 90-х годов [4]. В интенсивном земледелии, направленном на максимизацию урожая сельскохозяйственных культур, в том числе с целью секвестрации атмосферного CO₂, минеральные и органические удобрения вносятся зачастую в дозах, превышающих физиологические потребности растений [8]. Допустимые для одних почв и культур дозы минеральных удобрений могут быть избыточными для других почв и культур, ведя к снижению урожая [21, 31]. Верхние пределы доз азотных удобрений, применяемых в земледелии разных стран, сильно разнятся: от 100–150 до 250–350 и даже 500–600 кг N/га в год [31, 35]. Известны примеры применения экстремально высоких доз фосфорных и калийных удобрений под фруктовые деревья [25, 52] или в запас [2, 12].

Существенный вклад в формирование положительного баланса азота и фосфора в агроландшафтах оказывает животноводство [24]. Отходы животноводства и осадки сточных вод в свежем или в компостированном виде вносятся в почву как органические удобрения, а также с целью их утилизации. Органические удобрения по сравнению с минеральными обеспечивают продолжительное и непрерывное снабжение растений всеми питательными элементами, в том числе микроэлементами, при этом питательные вещества из органических удобрений менее подвержены потерям после внесения в почву [34]. С другой стороны, органические удобрения содержат не

точный и не постоянный набор питательных элементов, соотношение между питательными элементами в навозе не адаптировано к потребностям растений в течение вегетационного периода. Применяя органические удобрения, нельзя обеспечить точные дозы элементов питания, что несет угрозу избыточного внесения питательных веществ в почву.

Хотя в большинстве стран установлены строгие ограничения на объемы внесения минеральных и органических удобрений в почву [30, 37], переудобренность (Over-fertilization) — распространенное явление в практике земледелия и главная причина агрогенной эвтрофикации почвы [34]. Избыточный азот аккумулируется в урожае растений в виде нитратов, теряется из почвы в результате улетучивания аммиака, нитрификации/денитрификации и вымывания нитратов, а избыточные поступления фосфора и калия ведут к накоплению в почве или к смыву с поверхностным стоком [6, 16]. Эвтрофикация почвы атмосферными выпадениями азота и серы или применением минеральных удобрений создает опасность снижения почвенного pH [23, 48]. Во многих регионах проблемы подкисления и эвтрофикации возникают одновременно [23]. Ацидификация — одна из разновидностей химической деградации почвы, причина утраты биоразнообразия естественных экосистем, снижения продуктивности сельскохозяйственных культур и эффективности применяемых удобрений.

Таким образом, понимание причин возникновения эвтрофикации почвы является ключом к решению проблемы загрязнения водоемов и атмосферы питательными элементами и ухудшения биохимического качества продукции при интенсивном земледелии.

Цель работы — определить, как быстро и до каких пределов возможна эвтрофикация пахотной серой лесной почвы. Есть ли отличия в эвтрофикации почвы при использовании минеральных и органических удобрений? Как меняется pH почвы по мере эвтрофикации при длительном внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений?

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Общие сведения. Исследование проводили в стационарном многолетнем микрополевом опыте, заложенном внутри сетчатого павильона на территории института (54°8308' N, 37°6052' E), на протяжении девяти лет (2011–2019 гг.). Микрополевым опыт — это опыт с удобрениями, проводимый в полевых условиях в сосудах без дна или на микроделянках площадью не более 1 м². Особенность микрополевых опытов состоит в том, что устраняется почвенная пестрота, обеспечивается

равномерное внесение удобрений, предотвращается горизонтальная миграция питательных веществ, четче реализуется основной действующий фактор, но вместе с тем сохраняется вся совокупность естественных почвенных и агроклиматических факторов.

В 2000 г. короба из пластика без дна площадью 0.25 м^2 ($0.5 \times 0.5 \times 0.3 \text{ м}$) были заполнены пахотной серой лесной почвой среднесуглинистого гранулометрического состава (Luvic Retic Greyzemis Phaeozems (Loamic)) с неудобренного массива бывшей Опытной станции института. С 2000 по 2004 г. на микроделянках выращивали кукурузу и овес, используя дозы минеральных удобрений не выше N120P120K120. В 2005 г. был произведен уравнительный посев рапса, и почва была переведена в залежь. Ежегодно естественная растительность, растущая на микроделянках, срезалась и удалялась с поверхности почвы. В мае 2011 г. почва на микроделянках была перекопана на глубину 0–20 см, частично изъята из емкостей, перемешана и вновь засыпана в сосуды в случайной последовательности. Усредненные по микроделянкам физико-химические показатели почвы были следующими: $\text{pH}_{\text{KCl}} - 4.96 \pm 0.16$, $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{общ}}$ (сухим сжиганием) — 0.97 ± 0.03 и $0.095 \pm 0.001\%$ от массы почвы соответственно, $\text{N}_{\text{мин}}$ (по Кудярову), подвижные P_2O_5 и K_2O (по Кирсанову) — 19.8 ± 0.4 , 88.2 ± 10.6 и $73.3 \pm 1.8 \text{ мг/кг}$ воздушно-сухой почвы соответственно, содержание физической глины — $32 \pm 1\%$ [3].

Схема опыта, дозы удобрений, культуры. В опыте предусматривалось: 1) создать модели традиционной (минеральной) и органической систем удобрения; 2) использовать умеренные, высокие и экстремальные дозы удобрений, которые могли бы вызвать медленные и быстрые изменения свойств почвы; 3) создать предпосылки переудобренности почвы минеральными и органическими удобрениями. Варианты опыта: 1) без удобрений (контроль); 2) N1P1K1; 3) N2P2K2; 4) N3P3K3; 5) N4P4K4; 6) свежий подстилочный навоз крупного рогатого скота (КРС) из расчета 25 т/га; 7) то же 50 т/га; 8) то же 75 т/га; 9) то же 100 т/га; 10) чистый пар. Дозы N1P1K1 и навоз 25 т/га условно отнесены к умеренным, N2P2K2 и навоз 50 т/га — к высоким, а N3P3K3, N4P4K4 и навоз 75 т/га, навоз 100 т/га — к экстремальным. Азотные удобрения (карбамид) вносили с шагом из расчета 90 кг/га азота в интервале от 90 (N1) до 360 (N4) кг/га, фосфорные (двойной суперфосфат) — с шагом 75 кг/га P_2O_5 в интервале от 75 (P1) до 300 (P4) кг/га, калийные (сернокислый калий) — с шагом 100 кг/га K_2O в интервале от 100 (K1) до 400 (K4) кг/га. Минеральные и органические удобрения равномерно распределяли по поверхности почвы, после чего почву вручную перекапывали на глубину 20–22 см. Содержание сухого вещества в навозе КРС

в среднем за 9 лет составляло $19.3 \pm 0.9\%$, $\text{C}_{\text{орг}} - 37.3 \pm 1.8\%$, $\text{N}_{\text{общ}} - 1.97 \pm 0.04\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 - 1.50$ и $\text{K}_2\text{O} - 2.00\%$ на сухое вещество (табл. S1). Количество поступающего с навозом КРС азота, фосфора и калия были приблизительно равны дозам минеральных удобрений (табл. S2). За 9 лет опыта с минеральными удобрениями было внесено $0.81 - 3.24 \text{ т/га}$ азота в зависимости от дозы, $0.68 - 2.70 \text{ т/га}$ P_2O_5 и $0.90 - 3.60 \text{ т/га}$ K_2O . С органическими удобрениями в почву поступило $43 - 173 \text{ т/га}$ сухой массы, $16 - 65 \text{ т/га}$ органического углерода, $0.85 - 3.41 \text{ т/га}$ азота, $0.65 - 2.59 \text{ т/га}$ P_2O_5 и $0.86 - 3.46 \text{ т/га}$ K_2O . Минеральные и органические удобрения в соответствующих дозах вносили ежегодно весной перед посевом культур, разбрасывая по поверхности почвы и смешивая с 0–20 см слоем почвы. Повторность опыта трехкратная.

В 5-польном севообороте возделывали культуры устойчивые к высоким дозам минеральных и органических удобрений в следующей последовательности: сахарная свекла (“Анастасия”) — кукуруза на зеленую массу (“Молдавский”) — лук репчатый (“Центурион”) — картофель (“Жуковский”) — картофель (“Жуковский”). После всходов на каждой микроделянке оставляли 2 растения сахарной свеклы и картофеля, 6 — растений кукурузы и лука, что обеспечивало нормальную площадь питания. Уборку урожая культур проводили в сентябре, учитывая массу основной продукции. Побочная продукция удалялась с микроделянок, а остатки корней перемешивались с почвой. Почва чистого пара в течение вегетационного периода дважды перекапывалась, сорные растения удалялись. Урожай корнеплодов сахарной свеклы в среднем за 2 ротации в контрольном варианте без удобрений составлял 1.94 кг/м^2 , зеленой массы кукурузы — 1.45 кг/м^2 , луковиц репчатого лука — 0.46 кг/м^2 , клубней картофеля — 0.98 кг/м^2 . Наибольшую прибавку урожая корнеплодов от минеральных и органических удобрений получали при внесении N2P2K2 и 75 т/га навоза (228 и 253%) соответственно, зеленой массы — N4P4K4 и 100 т/га (517 и 362%), луковиц — N2P2K2 и 50 т/га 111 и 103%), клубней — N3P3K3 и 75 т/га (262 и 109%). Во вторую ротацию размеры урожая на контроле были в среднем на 46% меньше, чем в первую ротацию, в вариантах с минеральными удобрениями — на 26%, а с органическими удобрениями на — 14%.

Отбор проб почвы и химические анализы. Образцы почвы отбирали после уборки урожая из слоя 0–20 см на каждой делянке тростевым буром и готовили смешанный образец. Смешанные пробы почвы высушивались на открытом воздухе, видимые остатки растений удалялись в ходе просеивания через сито с диаметром отверстий 2 мм. В образцах почвы, растертых до частиц $< 1 \text{ мм}$, определяли солевой pH_{KCl} потенциометрическим

способом (Sartorius Basic Meter PB–11), содержание $N-NO_3^-$ дисульфифеноловым методом, подвижные формы фосфора (P_2O_5) по Кирсанову в вытяжке 0.2 М HCl на спектрофотометре (UNICO-1200) и калия (K_2O) по Кирсанову в вытяжке 0.2 М HCl на пламенном фотометре (BWB-XP Perfomance Plus). Содержание общего (органического) углерода и общего азота определяли с помощью CNHS-анализатора (Leco 932) сухим сжиганием. Экспериментальные данные приведены в виде средних величин из трех аналитических повторений и их стандартных отклонений. Математическую обработку данных проводили с помощью MS Excel и программы Statistica 10. Экспериментальные данные аппроксимировали линейными, полиномиальными или экспоненциальными функциями, отображающими зависимость изменения химических свойств почвы от длительности внесения и доз минеральных и органических удобрений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание $C_{орг}$ в почве. Многолетняя динамика $C_{орг}$ в почве проявляется в виде прироста или убыли его содержания в почве, отражая преобладание, соответственно, прихода органического вещества или потерь в результате минерализационных и эрозионных процессов. За 9 лет наблюдений содержание $C_{орг}$ в почве без удобрений увеличилось на $0.16 \pm 0.03\%$ от массы, при внесении возрастающих доз полного минерального удобрения — на $0.25 \pm 0.05\%$, в вариантах с органическими удобрениями — на $0.70-1.44\%$ в зависимости от дозы навоза (рис. S1). Результаты метаанализа большого числа опытов в мире показывают, что применение навоза в значительно большей мере увеличивает содержание $C_{орг}$, $C_{мик}$ и $N_{общ}$ в почве, чем добавление азота минеральных удобрений и соломы [27].

В почве без удобрений и с внесением минеральных удобрений единственным источником нового органического вещества являются прижизненные и послеуборочные растительные остатки. Применение минеральных удобрений, повышая урожай культур, способствует большему поступлению в почву растительных остатков. Однако в присутствии добавленного с удобрением минерального азота растительные остатки быстрее и в большей мере минерализуются, что ограничивает прирост $C_{орг}$ в почве. В вариантах с органическими удобрениями величина урожая культур была в среднем за две ротации севооборота на 25% меньше, чем с минеральными удобрениями, но с навозом в почву ежегодно поступало дополнительно от 1.8 до 7.2 т/га углерода. Хотя от 19 до 28% углерода в свежем навозе КРС минерализуется и теряется уже в течение первого года [13],

оставшееся его количество давало устойчивый прирост $C_{орг}$ в почве. В почве чистого пара содержание $C_{орг}$ колебалось примерно на одном уровне (рис. S1).

Скорость накопления $C_{орг}$ в неудобренной почве составляла 0.22 г/(кг год), а с минеральными удобрениями — 0.29–0.38 г/(кг год) (табл. 1). Устойчивое накопление $C_{орг}$ в почве в пределах от 0.76 до 1.56 г/(кг год) давало систематическое внесение навоза в возрастающих дозах. При анализе зависимости изменения $C_{орг}$ в почве от продолжительности внесения минеральных и органических удобрений можно заметить, что скорость накопления $C_{орг}$ за начальные 5 лет применения удобрений была существенно выше, чем в последующие (5–9 лет) годы опыта. Можно предположить, что в вариантах с органическими удобрениями возникало насыщение почвы органическим углеродом, а с минеральными удобрениями — усиливалась минерализация органического вещества почвы и растительных остатков вследствие сужения отношения C/N с 10.2 до 9.7 при дозе N1P1K1 и 8.5 при дозе N4P4K4 (рис. S2). Для сравнения, скорость накопления $C_{орг}$ в дерново-подзолистой супесчаной почве в среднем за 36 лет бессменного выращивания многолетних трав без удобрений составляла 0.11 г/(кг год), при применении минеральных удобрений N300PK — 0.19 г/(кг год), а при внесении бесподстилочного навоза в дозах, эквивалентных N300–N700 — 0.34–0.42 г/(кг год) [18]. Также, как и в нашем опыте, в первую половину опыта (0–20 лет) скорость накопления $C_{орг}$ в дерново-подзолистой почве в вариантах с минеральными и органическими удобрениями была многократно больше, чем во вторую половину (20–36 лет).

Прибавка содержания $C_{орг}$ в почве от минеральных удобрений за 9 лет эксперимента составила всего лишь 9% относительно неудобренного контроля, тогда как от органических удобрений — от 39% при дозе навоза 25 т/га до 109% при дозе 100 т/га. Судя по недостоверной зависимости содержания $C_{орг}$ в почве от доз минеральных удобрений, применяемых в течение 9 лет эксперимента, минеральные удобрения не дают стабильного накопления почвенного органического вещества, при этом прирост $C_{орг}$ от умеренных и высоких доз больше, чем от экстремальных (табл. 2). Как известно из литературы, положительное действие минеральных удобрений на содержание $C_{орг}$ в почве проявляется лишь при полном возврате растительных остатков в почву [22], тогда как в нашем опыте побочная продукция культур (листья сахарной свеклы, стебли лука и ботва картофеля) не возвращалась в почву. В отличие от вариантов с минеральными удобрениями, коэффициенты регрессии при применении навоза в интервалах 25–50 и 75–100 т/га были одинаковы-

Таблица 1. Линейные регрессионные модели изменения химических свойств почвы за девятилетнее внесение минеральных и органических удобрений

Параметр модели	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH_{KCl}, единиц/год										
a	0*	−0.08	−0.12	−0.13	−0.12	0.04	0.05	0.12	0.13	−0.03
a ₁	−0.02*	−0.09	−0.17	−0.17	−0.20	0.10*	0.11	0.19	0.18*	−0.05*
a ₂	0.01*	−0.08	−0.06	−0.08	−0.06	0*	0*	0.05*	0.11*	0.02*
b	4.98	4.89	4.84	4.82	4.55	5.05	5.07	5.14	5.25	5.00
R ²	0.040	0.930	0.930	0.939	0.770	0.571	0.655	0.849	0.831	0.595
P	0.667	0.001	0.001	0.001	0.009	0.049	0.028	0.003	0.004	0.042
C_{орг}, г/(кг год)										
a	0.22	0.29	0.35	0.38	0.37	0.76	0.99	1.18	1.56	0.05*
a ₁	0.23	0.34	0.45	0.43	0.40	0.84	1.12	1.91	2.32	0.11
a ₂	0.11	−0.04	−0.12	0.06	0	0.71	1.02	0.68	0.66	−0.05
b	9.56	9.64	9.55	9.47	9.50	10.0	10.3	11.8	12.1	9.56
R ²	0.889	0.774	0.741	0.866	0.797	0.992	0.980	0.877	0.905	0.241
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.149
N_{общ}, г/(кг год)										
a	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.02
a ₁	0.02	0.04	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.10	0.13	0.03
a ₂	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.06	0.07	0.06	0.05	0.01
b	0.93	0.95	0.94	0.94	0.95	0.90	0.90	0.98	1.00	0.92
R ²	0.903	0.848	0.891	0.945	0.916	0.979	0.974	0.920	0.921	0.797
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
P₂O₅, мг/(кг год)										
a	−1.96	3.97	20.2	36.8	56.6	10.8	21.1	34.4	55.0	0.44*
a ₁	−1.20	7.72	22.5	43.6	67.4	15.0	27.3	35.7	58.2	2.39
a ₂	−3.04	1.89	19.5	31.8	42.3	7.93	20.1	38.9	55.5	−2.22
b	88.5	101.4	104.0	118.7	113.0	92.6	103.1	92.7	98.0	88.2
R ²	0.955	0.614	0.984	0.941	0.980	0.907	0.896	0.945	0.957	0.085
P	0.001	0.037	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.525
K₂O, мг/(кг год)										
a	−0.62*	4.67*	12.3	23.4	44.3	6.16*	10.8	20.0	31.3	0.63*
a ₁	−1.00	11.3	21.8	29.6	57.5	13.4	18.4	26.5	54.9	−0.40
a ₂	−0.52	0.08	7.63	26.0	41.0	2.13	7.50	16.1	7.04	2.22
b	74.2	105.4	121.8	141.3	178.6	109.9	117.8	115.6	148.3	74.0
R	0.494	0.462	0.702	0.827	0.885	0.527	0.708	0.907	0.845	0.435
P	0.078	0.093	0.018	0.004	0.016	0.065	0.018	0.001	0.003	0.107
N−NO₃, мг/(кг год)										
a	−0.03*	0.02*	0.16*	2.27*	2.78*	0.19*	0.54	0.61*	1.36	−0.03*
a ₁	0.02	0.30	0.58	6.17	6.07	0.17	0.80	1.73	2.43	0
a ₂	−0.03	−0.10	−0.65	−0.05	1.45	0.29	0.40	−0.28	0.65	0
b	1.17	2.61	5.37	4.29*	6.34*	1.12*	1.05*	2.89*	2.56*	1.50
R ²	0.284	0.009	0.116	0.286	0.345	0.683	0.914	0.528	0.820	0.200
P	0.355	0.878	0.574	0.353	0.297	0.085	0.011	0.164	0.034	0.450

Примечание. Обозначение номеров вариантов дано в тексте. Для pH_{KCl} и C_{орг} рассчитано к полному удобрению (N + P₂O₅ + K₂O, т/га), для N_{общ} и N−NO₃[−] – к азотному удобрению (N, т/га), для P₂O₅ и K₂O – к фосфорному и калийному удобрениям (P₂O₅ и K₂O, т/га). Дозы свежего навоза крупного рогатого скота – 0, 25, 50, 75, 100 т/га. Коэффициенты a, a₁ и a₂ для уравнений линейной регрессии (y = ax + b) за 0–9, 0–5 и 5–9 лет соответственно.

* Недостоверные параметры уравнений при P < 0.05.

Таблица 2. Линейные регрессионные модели изменения химических свойств почвы в интервалах возрастающих доз минеральных и органических удобрений

Параметр модели	pH_{KCl}	$C_{орг}$, г/кг	$N_{общ}$, г/кг	P_2O_5 , мг/кг	K_2O , мг/кг	$N-NO_3^-$, мг/кг
Минеральные удобрения						
a	−0.90	0.61*	0.55	1036	792	57.2
a_1	−1.17	1.23*	0.86	811	578	19.8
a_2	−0.65*	0.09	0.32*	1203	1078	87.2
b	4.85	10.8	1.07	60.4*	52.8	−1.45*
R^2	0.594	0.048	0.215	0.588	0.781	0.427
P	0.001	0.146	0.001	0.001	0.001	0.001
Органические удобрения						
a	0.01	0.09	0.004	2.66	2.17	0.08
a_1	0.01	0.09	0.004	2.49	2.08	0.05
a_2	0.01	0.10	0.005	3.04*	2.62	0.11
b	4.96	10.9	1.05	74.7	74.6	0.30*
R^2	0.641	0.629	0.388	0.497	0.744	0.596
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Примечание. Дозы минеральных и органических удобрений приведены в тексте. Для pH_{KCl} и $C_{орг}$ рассчитано к полному удобрению ($N + P_2O_5 + K_2O$, т/га), для $N_{общ}$ и $N-NO_3^-$ — к азотному удобрению (N, т/га), для P_2O_5 и K_2O — к фосфорному и калийному удобрениям (P_2O_5 и K_2O , т/га). Дозы свежего навоза крупного рогатого скота — 0, 25, 50, 75, 100 т/га. Коэффициент a — для уравнений линейной регрессии ($y = ax + b$) в интервале всех доз минеральных и органических удобрений, a_1 — в интервале от N0P0K0 до N2P2K и от 0 до 50 т/га навоза, a_2 — в интервале N2P2K2 до N4P4K4 и 50–100 т/га навоза соответственно.

* Недостовверные параметры уравнений при $P < 0.05$.

ми и достоверными, свидетельствуя о значимом вкладе возрастающих доз органических удобрений в увеличение обеспеченности почвы органическим веществом.

При оценке влияния возрастающих доз удобрений на агрохимические свойства почвы следует учитывать два момента. Во-первых, с экстремально высокой дозой удобрений в почву вносится столько же питательных веществ, сколько с умеренной дозой за несколько лет. Во-вторых, влияние удобрений складывается из прямого действия в год внесения и последствий ранее внесенных доз. Таким образом, значение химического показателя почвы может быть выражено функцией двух аргументов: количества внесенного удобрения и продолжительности применения удобрений. В условиях нашего опыта уровень содержания $C_{орг}$ в почве при минеральной системе удобрения на 69% зависел от длительности применения удобрений и на 5% от внесенного в почву количества NPK (табл. 3). При органической системе — на 28% от длительности внесения и на 63% от внесенной массы навоза.

Нами получена зависимость изменения содержания $C_{орг}$ в почве от суммарного количества удобрений, внесенных за две ротации севооборота, которая описывалась полиномом второго порядка (рис. 1). Полученные зависимости подтверждают ослабление прироста $C_{орг}$ в почве при длительном использовании экстремально высоких доз минеральных удобрений и указывают на начало насыщения серой лесной почвы органическим веществом при поступлении 700–900 т/га навоза за 9 лет на уровне равном $2.34 \pm 0.04\%$ $C_{орг}$ от массы почвы. Согласно уравнению, представленному на рис. 1, предельное содержание $C_{орг}$ в пахотной серой лесной почве, выше которого добавленное органическое вещество не удерживается в почве, составляет 2.75% от массы, что достигается поступлением 1300 т/га свежего навоза КРС, содержащим примерно 95 т/га $C_{орг}$. В упомянутом выше опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве предельная концентрация $C_{орг}$, создаваемая многолетним внесением бесподстилочного навоза на посевах многолетних трав, составляла $2.11 \pm 0.16\%$ от массы почвы [18].

Таблица 3. Влияние длительности внесения (X , число лет) и дозы (Z , т/га) минеральных и органических удобрений на химические показатели почвы (Y)

Показатель	Параметр	Минеральные удобрения ($N + P_2O_5 + K_2O$)	Органические удобрения
pH_{KCl}	Уравнение	$Y = 5.21 - 0.076X - 0.898Z$	$Y = 4.71 + 0.056X + 0.009Z$
	R^2 общий	0.862	0.801
	P общий	<0.001	<0.001
	R^2 фактор X	0.268	0.159
	P фактор X	<0.001	<0.001
	R^2 фактор Z	0.594	0.641
	P фактор Z	<0.001	<0.001
$C_{орг}$, г/кг	Уравнение	$Y = 9.16 + 0.333X + 0.668Z$	$Y = 6.68 + 0.851X + 0.093Z$
	R^2 общий	0.738	0.911
	P общий	<0.001	<0.001
	R^2 фактор X	0.690	0.282
	P фактор X	<0.001	<0.001
	R^2 фактор Z	0.048	0.629
	P фактор Z	<0.008	<0.001
$N_{общ}$, г/кг	Уравнение	$Y = 0.84 + 0.046X + 0.550Z$	$Y = 0.73 + 0.065X + 0.004Z$
	R^2 общий	0.834	0.887
	P общий	<0.001	<0.001
	R^2 фактор X	0.619	0.499
	P фактор X	<0.001	<0.001
	R^2 фактор Z	0.215	0.388
	P фактор Z	<0.001	<0.001
P_2O_5 , мг/кг	Уравнение	$Y = 21.65X + 1036.5Z - 40.6^*$	$Y = 23.27X + 2.655Z - 33.9^*$
	R^2 общий	0.790	0.768
	P общий	<0.001	<0.001
	R^2 фактор X	0.202	0.271
	P фактор X	<0.001	<0.001
	R^2 фактор Z	0.588	0.497
	P фактор Z	<0.001	<0.001
K_2O , мг/кг	Уравнение	$Y = 12.33X + 791.8Z - 4.74^*$	$Y = 10.04X + 2.17Z + 27.7^*$
	R^2 общий	0.865	0.857
	P общий	<0.001	<0.001
	R^2 фактор X	0.084	0.113
	P фактор X	<0.001	<0.001
	R^2 фактор Z	0.781	0.744
	P фактор Z	<0.001	<0.001
$N-NO_3$, мг/кг	Уравнение	$Y = 0.977X^* + 57.2Z - 6.34^*$	$Y = 0.535X + 0.083Z - 2.38$
	R^2 общий	0.488	0.756
	P общий	<0.001	<0.001
	R^2 фактор X	0.062*	0.160
	P фактор X	0.118	<0.001
	R^2 фактор Z	0.427	0.596
	P фактор Z	<0.001	<0.001

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации, P – уровень значимости.* Недостоверно при $P < 0.05$.

По полученным уравнениям можно также рассчитать величину прироста $C_{орг}$ в почве на единицу внесенных удобрений. В интервале умеренных доз минеральных удобрений и в первые годы действия удобрений внесение 100 кг/га NPK дополнительно повышало содержание $C_{орг}$ на 0.045 г/кг, тогда как на фоне экстремально высоких доз при систематическом их внесении всего лишь на 0.006 г/кг. Соответственно, применение 10 т/га свежего навоза КРС в ненасыщенной углеродом почве обеспечивало рост содержания $C_{орг}$ на 0.249 г/кг, а в насыщенной углеродом почве за счет предыдущего многолетнего внесения органических удобрений — на 0.099 г/кг.

Таким образом, минеральные удобрения в дозах, увеличивающих урожай культур, способствуют небольшому накоплению в почве $C_{орг}$, тогда как переудобренность может быть причиной химической дестабилизации почвенного органического вещества. При систематическом внесении органических удобрений происходит реальная эвтрофикация почвы углеродом вплоть до полного насыщения, после чего внесенное органическое вещество не закрепляется в почве, а преимущественно теряется в виде $C-CO_2$. Скорость накопления $C_{орг}$ в почве была меньше декларируемой величины 4 промилле даже при внесении экстремально высоких доз навоза.

Содержание $N_{общ}$ и $N-NO_3^-$ в почве. Систематическое применение удобрений сопровождалось повышением содержания общего азота в почве. Хотя с минеральными и органическими удобрениями в почву поступало примерно одинаковое количество азота, прирост $N_{общ}$ от возрастающих доз минеральных удобрений составил 0.30–0.45 г/кг, а от органических — на 0.41–0.74 г/кг (рис. S2). За 9 лет опыта содержание $N_{общ}$ в почве с минеральными удобрениями возросло в 1.1–1.3 раза по сравнению с неудобренным контролем, а с органическими — в 1.3–1.6 раз. Азот минеральных удобрений мобилен и для его закрепления требуется органическое вещество, которого в почве недостаточно для полной иммобилизации. В органических удобрениях преобладающая часть азота находится в связанном виде, постепенно минерализуется и сохраняется в почве достаточное продолжительное время.

Скорость накопления $N_{общ}$ в почве с минеральными удобрениями составляла 0.04–0.06 г/(кг год), а с органическими — 0.06–0.09 г/(кг год) (табл. 1). При всех дозах минеральных удобрений накопление общего азота в почве в первые 5 лет опыта было в 2–6 раз быстрее, чем в последующие годы опыта, подтверждая гипотезу о недостаточном для иммобилизации поступлении органического вещества с растительными остатками. При применении навоза в традиционных дозах 25 и 50 т/га

содержание $N_{общ}$ увеличивалось равномерно, тогда как при экстремально высоких дозах, по мере насыщения почвы органическим веществом, избыточные количества углерода и азота терялись из почвы (рис. 1).

Умеренные и высокие дозы минеральных удобрений обеспечивали более высокий прирост общего азота в почве, чем экстремальные, тогда как величины ежегодного прироста $N_{общ}$ в почве от возрастающих доз органических удобрений были примерно одинаковыми (табл. 2). В целом за 9 лет опыта вклад длительности применения минеральных удобрений в увеличение содержания $N_{общ}$ в почве составлял 62%, а количества внесенного в почву NPK — 22% (табл. 3). При органической системе содержание $N_{общ}$ на 50% зависело от длительности внесения и на 39% от внесенной массы навоза.

По уравнениям, представленным на рис. 1, рассчитаны величины прироста $N_{общ}$ в почве на единицу внесенных удобрений. В интервале умеренных доз минеральных удобрений и в первые годы действия удобрений внесение 100 кг/га N давало дополнительно 0.023 г/кг общего азота, тогда как на фоне экстремально высоких доз и систематического их внесения лишь 0.007 г/кг. Соответственно, применение 10 т/га свежего навоза КРС в ненасыщенной углеродом почве обеспечивало рост содержания $N_{общ}$ на 0.01 г/кг, а в насыщенной углеродом почве за счет предыдущего многолетнего внесения органических удобрений — на 0.008 г/кг.

В пахотной почве независимо от формы азотного удобрения основная часть доступного растениям азота представлена нитратами. Нитраты не образуют переходящий запас в почве, а преобладающая их часть в летний период потребляется растениями и теряется путем денитрификации. Поэтому в почве после уборки урожая обнаруживаются, как правило, низкие или “следовые” концентрации нитратов (рис. S4). При выращивании быстро созревающих культур (сортов) на фоне избыточных доз удобрений, превышающих потребность растений в азоте, запасы нитратов в почве могут остаться неизрасходованными. В нашем опыте высокое остаточное содержание нитратов обнаружено в годы выращивания картофеля при внесении экстремальных доз минеральных удобрений от 270 до 360 кг N/га. По обобщенным данным [14] при минеральной системе удобрения избыточными для зерновых культур являются дозы азота свыше 150 кг N/га, а при органико-минеральной системе — более 250 кг N/га.

Влияние продолжительности применения удобрений на содержание нитратов в почве было противоречивым (табл. 1). Если в первую ротацию севооборота содержание остаточных нитратов повышалось при ежегодном внесении удобре-

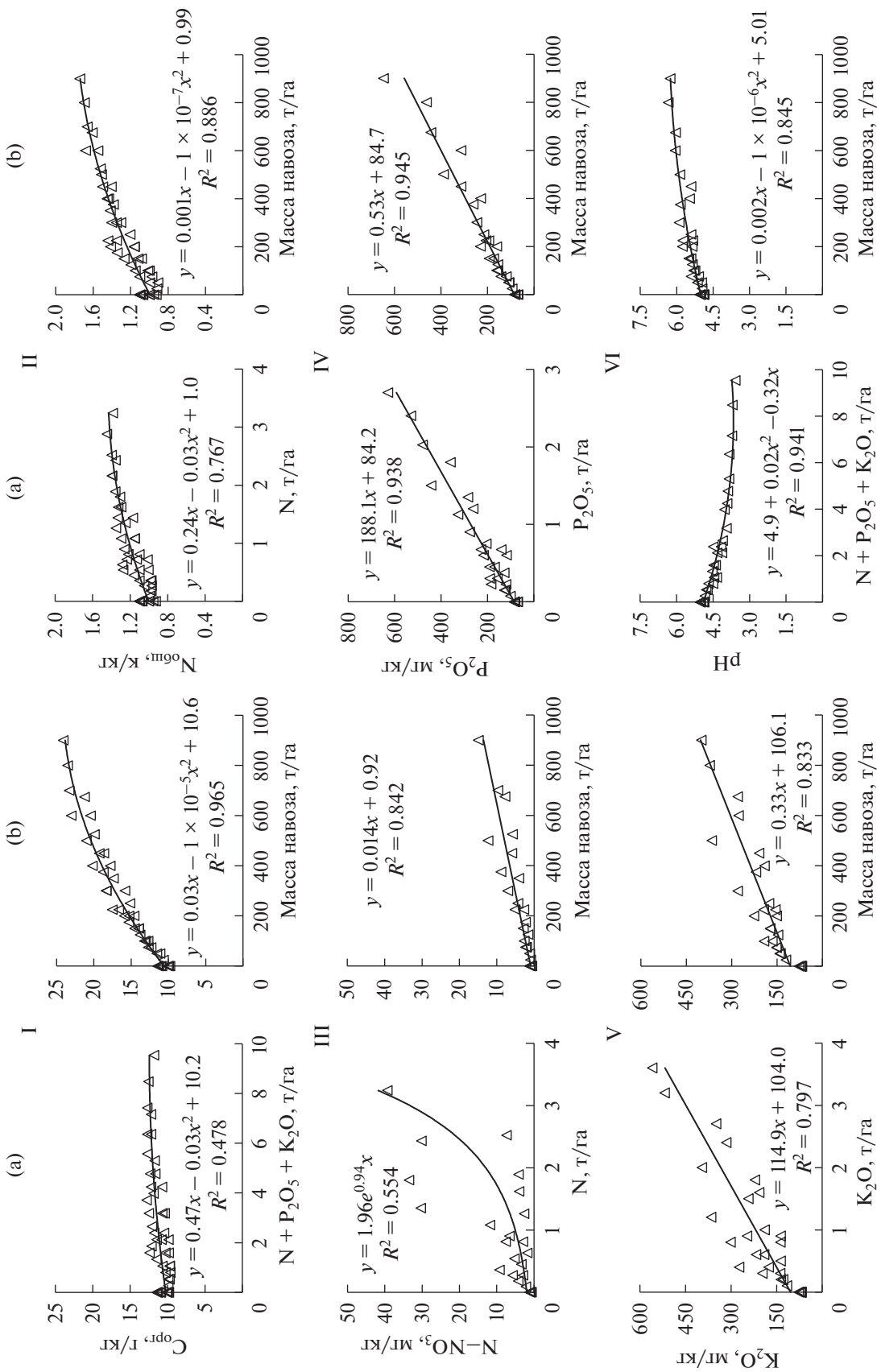


Рис. 1. Кумулятивный эффект десятилетнего систематического внесения минеральных (а) и органических (б) удобрений в возрастающих дозах на содержание органического углерода (I), общего азота (II), нитратов (III), подвижных фосфора (IV), калия (V) и pH (VI) в серой лесной почве.

ний, то во вторую ротацию снижалось во многих вариантах. В целом за все годы наблюдений в 6 вариантах из 8 не было достоверной связи между длительностью применения удобрений и остаточным содержанием $N-NO_3^-$ в почве. Более отчетливой была зависимость содержания нитратов в почве от дозы минеральных и органических удобрений (табл. 2). По мере увеличения дозы минеральных удобрений остаточное содержание нитратного азота в почве возрастало на 57.2 мг/кг, а при повышении доз навоза — на 0.08 мг/кг. Как и ожидалось, прирост остаточного азота нитратов от экстремально высоких доз минеральных и органических удобрений был соответственно в 4.4 и 2.2 раза выше, чем от умеренных и высоких. Если изменение содержания общего азота больше зависело от длительности применения удобрений, чем от дозы, главным фактором изменчивости содержания остаточного $N-NO_3^-$ в почве были дозы минеральных и органических удобрений, вклад которых составлял 43 и 60% (табл. 3). Как было отмечено выше, для общего азота в почве характерной была полиномиальная зависимость с насыщающим типом отклика на объемы поступления в почву минеральных и органических удобрений за 9-летний период. Содержание остаточного азота нитратов в почве с минеральной системой удобрения больше соответствовала экспоненциальной зависимости, а с органической — прямой линейной зависимости (рис. 1).

Таким образом, систематическое применение удобрений может быть реальной причиной азотной эвтрофикации почвы. При этом вклад органических удобрений в обогащение почвы азотом более существенен, чем минеральных удобрений. Однако эвтрофикация почвы азотом минеральных удобрений несет больше угроз окружающей среде, чем азотом органических удобрений из-за высоких остаточных концентраций нитратов, обнаруживаемых в почве в послеуборочный период при применении экстремальных доз минеральных удобрений. Переудобренность — главная причина избытка нитратов в почве.

Обеспеченность почвы подвижным фосфором при ежегодном внесении удобрений. Содержание доступного растениям фосфора является ключевым индикатором эвтрофикации или олиготрофикации почвы. Содержание подвижного P_2O_5 в неудобренной дерново-подзолистой почве снизилось за 15 лет опыта в 1.4 раза, а в вариантах с минеральными и органическими удобрениями возросло в 1.6 раза, составив 238 и 192 мг/кг [11]. В другом опыте 20-летнее выращивание культур без удобрений привело к снижению содержания подвижного P_2O_5 в дерново-подзолистой почве на 15%, тогда как применение умеренных доз NPK (пять ротаций семипольного севооборота) и внесение 40 т/га навоза (3 ротации, 5.7 т/га в год)

повышали содержание подвижного фосфора в 2.6 и 1.2 раза соответственно [1, 10].

В нашем опыте за 9 лет наблюдений содержание P_2O_5 в серой лесной почве без удобрений уменьшилось в 1.3 раза, при внесении возрастающих доз полного минерального удобрения возросло в 1.6–7.1 раз, в вариантах с органическими удобрениями увеличилось в 2.2–7.4 раз в зависимости от дозы навоза (рис. S5). Достигнутые содержания P_2O_5 в вариантах с экстремально высокими дозами минеральных и органических удобрений свидетельствуют о зафосфачивании (over phosphatization) почвы. Зафосфачивание почв — распространенное явление для интенсивного земледелия с интенсивным применением удобрений [9]. Прирост содержания P_2O_5 в почве от ежегодного внесения минеральных удобрений составлял в зависимости от дозы от 4 до 57 мг/(кг год), при этом в течение первой ротации накопление P_2O_5 шло в 1.1–4.1 раз быстрее, чем в течение второй ротации (табл. 1). Систематическое внесение навоза в возрастающих дозах увеличивало содержания подвижного фосфора со скоростью 11–55 мг/(кг год). При умеренных и высоких дозах навоза накопление P_2O_5 шло быстрее в первую ротацию, а при экстремальных дозах — с одинаковой скоростью. В почве без удобрений в среднем за 9 лет опыта наблюдалась убыль P_2O_5 со скоростью 2 мг/(кг год), усиливаясь во вторую ротацию севооборота в 2.5 раза по сравнению с первой ротацией.

Содержание подвижного фосфора в почве возрастало с линейной зависимостью от доз минеральных и органических удобрений, а прирост от экстремальных доз минеральных удобрений и навоза был соответственно в 1.5 и 1.2 раза больше, чем от умеренных и высоких доз (табл. 2). Из уравнений множественной регрессии следует, что накопление подвижных фосфатов в почве с минеральными и органическими удобрениями зависит в большей степени от дозы, чем от длительности внесения удобрений. При минеральной и органической системах вклад длительности внесения составлял 20 и 27% соответственно, а дозы удобрений — 59 и 50% (табл. 3).

В отличие от углерода и общего азота систематическое применение минеральных и органических удобрений не вызывало насыщения почвы фосфатами (рис. 1). Чем продолжительнее и больше поступало в почву удобрений, тем больше накапливалось подвижного фосфора с линейной зависимостью. Как при умеренном применении минеральных и органических удобрений, так и при высоких дозах каждые 100 кг P_2O_5 /га фосфорных удобрений и 10 т/га навоза обеспечивали прирост содержания P_2O_5 в почве соответственно на 18.8 и 5.3 мг/кг (рис. 1). По нормативам для повышения содержания подвижного P_2O_5 на 10 мг/кг в дерново-подзолистой почве разного грануло-

метрического состава требуется внесение от 50–60 до 100–120 кг P_2O_5 /га минеральных удобрений, а в серой лесной почве – от 70–80 до 120–140 кг P_2O_5 /га [17]. В нашем опыте на среднесуглинистой серой лесной почве повышение содержания подвижного P_2O_5 на 10 мг/кг достигалось при дозе фосфорных удобрений около 55 кг/га. Ранее показано, что расход фосфора удобрений на повышение содержания в почве подвижных фосфатов может быть разным, завися от обеспеченности почвы органическим веществом, исходного содержания подвижных фосфатов, гранулометрического состава и pH почвенной среды [19].

Таким образом, пахотная серая лесная среднесуглинистая почва легко подвержена эвтрофикации фосфатами, перерастающей в избыточное зафосфачивание в случае внесения экстремальных доз фосфорсодержащих удобрений. Минеральные и органические удобрения равнозначны по своему вкладу в фосфорную эвтрофикацию почвы. Ежегодное применение суперфосфата и навоза КРС в экстремально высоких дозах от 225 до 300 кг P_2O_5 /га не повлекло насыщения почвы фосфатами.

Влияние ежегодного внесения удобрений на содержание подвижного калия в почве. Обогащение почвы подвижным калием менее распространено явление в земледелии, чем фосфором, но оно реально при систематическом применении удобрений. За 9 лет наблюдений содержание K_2O в почве без удобрений уменьшилось в 1.1 раза, при внесении возрастающих доз полного минерального удобрения возросло в 3.0–7.7 раз, в вариантах с органическими удобрениями увеличилось в 2.1–5.5 раз в зависимости от дозы навоза (рис. S6). При умеренных и высоких дозах минеральных и органических удобрений в почве создавался высокий уровень подвижного калия (137–222 и 156–210 мг/кг соответственно). Применение экстремальных доз сернокислого калия и навоза приводило к переудобренности почвы, в результате чего содержание подвижного K_2O достигало избыточно высокого уровня вплоть до 350–560 и 281–401 мг/кг соответственно. В неудобренной дерново-подзолистой почве содержание K_2O снизилось за 15 лет в 1.2 раза, а в вариантах с минеральной и органической (полужидкий навоз КРС) системами возросло соответственно в 3.4 и 2.6 раза, достигнув 378 и 288 мг/кг [11].

Если неудобренная почва обеднялась подвижным K_2O со скоростью 0.62 мг/(кг год), то почва с ежегодным внесением минеральных удобрений обогащалась со скоростью от 5 до 44 мг/(кг год) в зависимости от дозы, а при органической системе удобрения – со скоростью от 6 до 31 мг/(кг год) (табл. 1). Подвижный калий, также как фосфор, быстрее накапливался в почве в течение первой ротации, чем во второй ротации. В целом по опы-

ту накопление подвижного калия в почве с минеральными и органическими удобрениями зависело в большей степени от дозы (78 и 74% вариации), чем от длительности внесения (8 и 11%) удобрений (табл. 3). Фактор дозы удобрения был самым значимым в увеличении содержания K_2O по сравнению с другими химическими показателями. Содержание подвижного K_2O в почве возрастало с линейной зависимостью от доз минеральных и органических удобрений, а прирост от экстремальных доз минеральных удобрений и навоза был соответственно в 1.9 и 1.3 раза выше, чем от умеренных и высоких доз (табл. 2).

Подобно подвижному фосфору систематическое применение минеральных и органических удобрений не вызывало насыщения почвы подвижным калием, что подтверждается наличием линейной связи между его содержанием и суммарным поступлением калия удобрений в почву (рис. 1). Из полученных уравнений следует, что 100 кг K_2O /га калийных удобрений и 10 т/га навоза повышали содержание K_2O в почве на 11.5 и 3.3 мг/кг соответственно. Повышение обеспеченности серой лесной почвы подвижным калием на 10 мг/кг достигалось внесением с минеральными удобрениями примерно 85 кг K_2O /га, что оказалось выше норматива для суглинистых серых лесных почв [17].

Таким образом, систематическое применение полного минерального удобрения и органических удобрений в виде навоза ведет к постепенному увеличению содержания подвижного калия в пахотной почве вплоть до избыточно высокого уровня. Поскольку калий наряду с азотом и фосфором относится к числу основных элементов минерального питания, контролирующих продуктивность растений, обогащение почвы подвижным калием правомочно тоже относить к эвтрофикации. Главной причиной эвтрофикации почвы калием является переудобренность калийсодержащими удобрениями, в том числе органическими удобрениями.

Изменения pH почвы. Применение минеральных и органических удобрений, прямо или косвенно, изменяет pH почвы. За 20 лет с 1980 по 2000 гг. pH почв в большинстве сельскохозяйственных провинций Китая уменьшился на 0.13–0.80 единиц, что связывается с интенсивным применением минеральных удобрений [32]. Площадь кислых почв в Нечерноземной зоне России к 2016 г. составила 60% от обследованных площадей [17]. Считается, что минеральные удобрения и солома приводят к подкислению почвы, тогда как применение навоза увеличивает pH [27]. За 15 лет опыта pH неудобренной дерново-подзолистой почвы увеличился на 0.2, при минеральной системе удобрения уменьшился на 0.9, а при органической системе с использованием полу-

жидкого навоза КРС возрос на 0.7 [11]. Внесение навоза уменьшило отрицательное влияние минеральных удобрений на кислотность почвы [1]. В нашем опыте pH серой лесной почвы на неудобренном варианте не зависел от продолжительности выращивания культур, снижаясь или увеличиваясь в разные годы на 0.04–0.07 единиц (рис. S7). Систематическое применение полного минерального удобрения в возрастающих дозах в течение 9 лет вызывало устойчивое уменьшение pH почвы на 0.8–1.4 ед., а свежего навоза КРС – увеличение на 0.4–1.4 ед. Скорость снижения pH почвы при внесении полного минерального удобрения составляла 0.08–0.13 ед./год, а в вариантах с навозом pH почвы увеличивался со скоростью 0.04–0.13 ед./год (табл. 1). Наиболее быстрые изменения pH почвы под влиянием удобрений наблюдались в течение первой ротации.

Дозы минеральных и органических удобрений были более значимым фактором изменения pH почвы (59 и 64% соответственно), чем продолжительность применения удобрений (27 и 16%) (табл. 3). Увеличение доз минеральных и органических удобрений достоверно изменяло pH почвы (табл. 2). Судя по коэффициентам регрессий, отклик pH почвы на применение умеренных и высоких доз минеральных удобрений был более отчетливым, чем на экстремальные дозы. Органические удобрения, как в умеренных и высоких дозах, так и в экстремальных, в одинаковой мере повышали pH почвы.

На рис. 1 отображены полиномиальные зависимости изменений pH почвы на действие и последствие минеральных и органических удобрений. Хорошо видно, что подкисление почвы при систематическом внесении минеральных удобрений или нейтрализация кислотности при применении органических удобрений осуществляется не безгранично, а в пределах границ буферности, присущей почве. Внесение 100 кг/га NPK при умеренных (0.3 т/га) удобрительных нагрузках дополнительно снижало pH почвы на 0.03 ед., тогда как при значительных (8 т/га при N3P3K3 и N4P4K4 за 9 и 8 лет) нагрузках дополнительного снижения pH не происходило (рис. 1). Увеличение pH почвы от внесения органических удобрений имело место только до определенного уровня суммарного поступления в почву навоза, выше которого pH почвы не изменялся. При суммарном поступлении навоза в объеме 25 т/га дополнительное его внесение в количестве 10 т/га повышало pH на 0.02 ед., тогда как на фоне 700 т/га (дозы 75–100 т/га ежегодно) дополнительного повышения pH не было.

Таким образом, удобрительная эвтрофикация почвы сопровождается изменением pH почвенной среды, но эти явления имеют разную природу. Сдвиг pH в эвтрофицированной почве обуслов-

лен не увеличением содержания питательных элементов, а зависит от химических свойств удобрений. Поступление химически и физиологически кислых минеральных удобрений приводит к резкому подкислению почвы, тогда как навоз оказывает мелиорирующее действие, благодаря кальцию и органическим соединениям, повышающим буферную способность почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агрогенная эвтрофикация почвы – это искусственное обогащение почвы органическим углеродом и минеральными элементами, поступающими с удобрениями при сельскохозяйственной деятельности, направленной на повышение плодородия почвы и продуктивности растений. Эвтрофикация почвы диаметрально противоположна олиготрофикации, развивающейся в результате истощительного земледелия без применения удобрений с обеднением почвы преимущественно фосфором и калием.

Эвтрофикация почвы может развиваться как при минеральной, так и при органической системе удобрения. При минеральной системе удобрения почва обогащается преимущественно подвижными формами фосфора и калия. Обогащение почвы азотом минеральных удобрений является краткосрочным, проявляясь в виде остаточных нитратов, которые теряются из почвы за осенне-зимний период. Органические удобрения, в отличие от минеральных, обеспечивают полиэвтрофикацию почвы, обогащая одновременно не только азотом, фосфором, калием, но и органическим углеродом.

Переудобренность и длительное применение удобрений – главные факторы развития почвенной эвтрофикации. Если при умеренных дозах удобрений признаки эвтрофикации почвы могут проявиться через десятилетия, то в результате переудобренности – через несколько лет. Содержание $N-NO_3^-$ и подвижных фосфора и калия в почве зависело в большей мере от дозы удобрений, чем от продолжительности применения, как при минеральной системе, так и при органическом удобрении. Преобладающим фактором изменений в содержании общего азота в почве была длительность применения минеральных и органических удобрений. При органической системе вклад дозы удобрений в эвтрофикацию почвы органическим углеродом был выше, чем длительности внесения, тогда как при минеральной системе содержание $C_{орг}$ сильнее зависело от длительности применения удобрений.

Эвтрофикация почвы и изменение почвенного pH – сопутствующие друг другу, но разные эффекты систематического применения удобрений. По мере эвтрофикации почвы минеральными

удобрениями рН почвы уменьшается, тогда как эвтофирование почвы органическими удобрениями сопровождается увеличением рН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-26-00100.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Табл. S1. Содержание углерода и азота в свежем навозе крупного рогатого скота, применяемого в длительном микрополевым опыте.

Табл. S2. Ежегодное и общее количество минеральных и органических удобрений, применяемых в 9-летнем микрополевым опыте на серой почве.

Рис. S1. Изменения содержания органического углерода ($C_{орг}$) в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

Рис. S2. Изменение соотношения $C:N$ в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

Рис. S3. Изменения содержания общего азота ($N_{общ}$) в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

Рис. S4. Изменения содержания $N-NO_3$ в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

Рис. S5. Изменения содержания подвижного P_2O_5 в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

Рис. S6. Изменения содержания подвижного K_2O в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

Рис. S7. Изменения рН почвы в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васбиева М.Т. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений // Почвоведение. 2021. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21010135>
2. Волынкина О.В., Кириллова Е.В. Формирование агрофона с оптимальным содержанием подвижного фосфора в черноземе выщелоченном // Агрохимия, 2021. № 1. С. 3–11. <https://doi.org/10.31857/S0002188121010117>
3. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Влияние возрастающих доз органических и минеральных удобрений на пулы растворенного, подвижного и активного органического вещества в серой лесной почве // Агрохимия. 2014. № 6. С. 8–19.
4. Кудяров В.Н. Оценка питательной деградации пахотных почв России // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85. № 9. С. 771–775. <https://doi.org/10.7868/S0869587315090078>
5. Кудяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1901009X>
6. Кудяров В.Н., Башкин В.Н., Кудярова А.Ю., Боцкарев А.Н. Экологические проблемы применения минеральных удобрений. М.: Наука, 1984. 214 с.
7. Кудяров В.Н., Семенов В.М. Оценка современного вклада удобрений в агрогеохимический цикл азота, фосфора и калия // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1440–1446.
8. Кудяров В.Н., Семенов В.М. Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации // Агрохимия. 2014. № 10. С. 3–17.
9. Кудярова А.Ю. Фосфатогенная трансформация почв. М.: Наука, 1995. 288 с.
10. Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы при длительном применении органических и минеральных удобрений // Агрохимия. 2014. № 9. С. 13–19.
11. Мерзлая Г.Е., Еськов А.И., Тарасов С.И. Действие и последствие систем удобрения с использованием навоза // Плодородие. 2011. № 3. С. 16–19.
12. Носко Б.С., Бабынин В.И., Гладких Е.Ю. Последствие удобрений на физико-химические и агрохимические свойства чернозема типичного // Агрохимия. 2012. № 4. С. 3–13.
13. Паутова Н.Б., Семенова Н.А., Хромыхкина Д.П., Лебедева Т.Н., Семенов В.М. Определение активного органического вещества в свежем подстилочном навозе биокинетическим методом // Агрохимия. 2018. № 9. С. 29–39. <https://doi.org/10.1134/S0002188118090107>
14. Романенков В.А., Беличенко М.В., Рухович О.В., Никитина Л.В., Иванова О.И. Эффективность использования азота в длительных и краткосрочных опытах агрохимслужбы и геосети Российской Федерации // Агрохимия. 2020. № 12. С. 28–37. <https://doi.org/10.31857/S0002188120120091>
15. Семенов А.М., Бубнов И.А., Семенов В.М., Семенова Е.В., Зеленов В.В., Семенова Н.А. Ежедневная динамика численности бактерий и эмиссии CO_2 почвы и связь их волнообразных колебаний с сукцессией микробного сообщества // Почвоведение. 2013. № 8. С. 963–979. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13080078>
16. Семенов В.М., Пругар Я., Кноп К., Пехова Б., Агаев В.А., Соколов О.А. Накопление нитратов растениями

- при интенсивном применении азотных удобрений // Известия АН СССР. Серия биологическая. 1986. № 2. С. 201–209.
17. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
 18. Тарасов С.И., Кравченко М.Е., Бужина Т.А. Баланс азота, использование биогенных элементов в агроценозах с бессменным возделыванием костреча безостого при длительном применении различных доз бесподстилочного навоза // Агрохимия. 2021. № 2. С. 21–30. <https://doi.org/10.31857/S0002188121020125>
 19. Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., Семенова А.И. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование // Агрохимия. 2021. № 5. С. 14–20. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050100>
 20. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 324 с.
 21. Albornoz F. Crop responses to nitrogen overfertilization: A review // Scientia Horticulturae. 2016. V. 205. P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.026>
 22. Alvarez R. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage // Soil Use Manag. 2005. V. 21(1). P. 38–52. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2005.tb00105.x>
 23. Bouwman A.F., van Vuuren D.P., Derwent R.G., Posch M. A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems // Water, Air, and Soil Pollution. 2002. V. 141. P. 349–382. <https://doi.org/10.1023/A:1021398008726>
 24. Bouwman L., Goldewijk K.K., Van Der Hoek K.W., Beusen A.H.W., Van Vuuren D.P., Willems J., Rufino M.C., Stehfest E. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period // PNAS. 2013. V. 110(52). P. 20882–20887. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012878108>
 25. Chen X., Yan X., Wang M., Cai Y., Weng X., Su D., Guo J., Wang W., Hou Y., Ye D., Zhang S., Liu D., Tong L., Xu X., Zhou S., Wu L., Zhang F. Long-term excessive phosphorus fertilization alters soil phosphorus fractions in the acidic soil of pomelo orchards // Soil and Tillage Research. 2022. V. 215. Art. № 105214. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105214>
 26. Craine J.M., Elmore A.J., Wang L., Aranibar J., Bauters M., Boeckx P., Crowley B.E., Dawes M.A., Delzon S., Fajardo A., Fang Y., Fujiyoshi L., Gray A., Guerrieri R., Gundale M.J., ... Zmudczyńska-Skarbek K. Isotopic evidence for oligotrophication of terrestrial ecosystems // Nature Ecology and Evolution. 2018. V. 2. P. 1735–1744. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0694-0>
 27. Dang P., Li C., Lu C., Zhang M., Huang T., Wan C., Wang H., Chen Y., Qin X., Liao Y., Siddique K.H.M. Effect of fertilizer management on the soil bacterial community in agroecosystems across the globe // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2022. V. 326. Art. № 107795. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107795>
 28. Ekblad A., Nordgren A. Is growth of soil microorganisms in boreal forests limited by carbon or nitrogen availability? // Plant and Soil. 2002. V. 242. P. 115–122. <https://doi.org/10.1023/A:1019698108838>
 29. Elser J.J., Bracken M.E.S., Cleland E.E., Gruner D.S., Harpole W.S., Hillebrand H., Ngai J.T., Seabloom E.W., Shurin J.B., Smith J.E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems // Ecology Letters. 2007. V. 10. P. 1135–1142. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x>
 30. Garske B., Stubenrauch J., Ekdorf F. Sustainable phosphorus management in European agricultural and environmental law // Review of European, Comparative and International Environmental Law. 2020. V. 29. P. 107–117. <https://doi.org/10.1111/reel.12318>
 31. Good A.G., Beatty P.H. Fertilizing Nature: A Tragedy of Excess in the Commons // PLoS Biol. 2011. V. 9(8). Art. № e1001124. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001124>
 32. Guo J.H., Liu X.J., Zhang Y., Shen J.L., Han W.X., Zhang W.F., Christie P., Goulding K.W.T., Vitousek P.M., Zhang F.S. Significant Acidification in Major Chinese Croplands // Science. 2010. V. 327(5968). P. 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
 33. Ho A., Di Lorenzo D.P., Bodelier P.L.E. Revisiting life strategy concepts in environmental microbial ecology // FEMS Microbiology Ecology. 2017. V. 93(3), Art. № fix006. <https://doi.org/10.1093/femsec/fix006>
 34. Innes R. Economics of Agricultural Residuals and Overfertilization: Chemical Fertilizer Use, Livestock Waste, Manure Management, and Environmental Impacts // Encyclopedia of Energy, Natural Resource and Environmental Economics. 2013. V. 2. P. 50–57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375067-9.00118-2>
 35. Ju X.T., Xing G.X., Chen X.P., Zhang S.L., Zhang L.J., Liu X.J., Cui Z.L., Yin B., Christie P., Zhu Z.L., Zhang F.S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems // PNAS. 2009. V. 106(9). P. 3041–3046. <https://doi.org/10.1073/pnas.0813417106>
 36. Le Moal M., Gascuel-Oudoux C., Ménesguen A., Souchon Y., Étrillard C., Levain A., Moatar F., Pannard A., Souchu P., Lefebvre A., Pinay G. Eutrophication: A new wine in an old bottle? // Science Total Environment. 2019. V. 651. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>
 37. Musacchio A., Re V., Mas-Pla J., Sacchi E. EU Nitrates Directive, from theory to practice: Environmental effectiveness and influence of regional governance on its performance // Ambio. 2020. V. 49. P. 504–516. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01197-8>

38. *Odland A.* Oligotrophic and mesotrophic vegetation in southern Scandinavian mountains. Gradients in species and community distribution extracted by numerical analyses of earlier published vegetation descriptions // *Phytocoenologia*. 2005. B. 35(4). P. 985–1018.
<https://doi.org/10.1127/0340-269X/2005/0035-0985>
39. *Raven J.A., Andrews M., Quigg A.* The evolution of oligotrophy: implications for the breeding of crop plants for low input agricultural systems // *Annals Applied Biology*. 2005. V. 146(3). P. 261–280.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.040138.x>
40. *Rodríguez L., Macías F.* Eutrophication trends in forest soils in Galicia (NW Spain) caused by the atmospheric deposition of nitrogen compounds // *Chemosphere*. 2006. V. 63(9). P. 1598–1609.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.08.072>
41. *Roth M., Michiels H.G., Puhlmann H., Sucker C., Hauck M.* Multiple soil factors explain eutrophication signals in the understorey vegetation of temperate forests // *J. Vegetation Sci.* 2021. V. 32. Art. № e13063.
<https://doi.org/10.1111/jvs.13063>
42. *Roth M., Michiels H.G., Puhlmann H., Sucker C., Winter M.B., Hauck M.* Responses of Temperate Forests to Nitrogen Deposition: Testing the Explanatory Power of Modeled Deposition Datasets for Vegetation Gradients // *Ecosystems*. 2021. V. 24. P. 1222–1238.
<https://doi.org/10.1007/s10021-020-00579-4>
43. *Schelfhout S., Wasof S., Mertens J., Vanhellemont M., Demey A., Haegeman A., DeCock E., Moeneclaey I., Vangansbeke P., Viaene N., Baeyen S., De Sutter N., Maes M., van der Putten W.H., Verheyen K., De Schrijver A.* Effects of bioavailable phosphorus and soil biota on typical *Nardus* grassland species in competition with fast-growing plant species // *Ecological Indicators*. 2021. V. 120. Art. № 106880.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106880>
44. *Schimel J.P., Schaeffer S.M.* Microbial control over carbon cycling in soil // *Front. Microbiol.* 2012. V. 3. Art. № 348.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00348>
45. *Semenov A.M.* Physiological bases of oligotrophy of microorganisms and the concept of microbial community // *Microbial Ecology*. 1991. V. 22. P. 239–247.
<https://doi.org/10.1007/BF02540226>
46. *Smith V.H., Schindler D.W.* Eutrophication science: where do we go from here? // *Trends in Ecology and Evolution*. 2009. V. 24(4). P. 201–207.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>
47. *Smith V.H., Tilman G.D., Nekola J.C.* Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems // *Environmental Pollution*. 1999. V. 100(1–3). P. 179–196.
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
48. *Stevens C.J., Thompson K., Grime J.P., Long C.J., Gowing D.J.G.* Contribution of acidification and eutrophication to declines in species richness of calcifuge grasslands along a gradient of atmospheric nitrogen deposition // *Functional Ecology*. 2010. V. 24. P. 478–484.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01663.x>
49. *Van Dobben H.F., De Vries W.* The contribution of nitrogen deposition to the eutrophication signal in understorey plant communities of European forests // *Ecology and Evolution*. 2017. V. 7. P. 214–227.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2485>
50. *Wheeler B.D., Proctor M.C.F.* Ecological gradients, subdivisions and terminology of north-west European mires // *J. Ecology*. 2000. V. 88(2). P. 187–203.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00455.x>
51. *Withers P.J.A., Neal C., Jarvie H.P., Doody D.G.* Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here? // *Sustainability*. 2014. V. 6. P. 5853–5875.
<https://doi.org/10.3390/su6095853>
52. *Xu X., Du X., Wang F., Sha J., Chen Q., Tian G., Zhu Z., Ge S., Jiang Y.* Effects of Potassium Levels on Plant Growth, Accumulation and Distribution of Carbon, and Nitrate Metabolism in Apple Dwarf Rootstock Seedlings // *Frontiers Plant Sci.* 2020. V. 11. Art. № 904.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904>

Eutrophication of Arable Soil: The Comparative Effect of Mineral and Organic Fertilizer Systems

V. M. Semenov¹*, T. N. Lebedeva¹, N. B. Zinyakova¹, D. A. Sokolov¹, and M. V. Semenov²

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

²*Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

*e-mail: v.m.semenov@mail.ru

Agrogenic eutrophication refers to the artificial enrichment of soil with organic carbon and nutrients in result of applying mineral and organic fertilizers to increase soil fertility and plant productivity. Eutrophication of gray forest soils (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) was created by annual application of increasing doses of mineral (N 90–360, P₂O₅ 75–300 and K₂O 100–400 kg/ha) and organic (fresh cattle manure from 25 to 100 t/ha) fertilizers under plants of a 5–field crop rotation for 9 years in microplots experiment. The NPK amounts applied with the manure were approximately equal to the corresponding doses of mineral fertilizer. The rates of soil enrichment by Corg under mineral and organic fertilizer systems were, respectively,

0.29–0.38 and 0.76–1.56 g/kg per year, N_{tot} – 0.04–0.06 and 0.06–0.09 g/kg per year, available P_2O_5 – 4–57 and 11–55 mg/kg per year, available K_2O – 5–44 and 6–31 mg/kg per year. The fertilizer doses under both systems were the most significant factor in the accumulation of nitrate nitrogen, available forms of phosphorus and potassium in the soil, while the N_{tot} contents was controlled by the duration of fertilizer application. The C_{org} content in the soil with organic and mineral fertilizers depended on the dose of manure and the duration of NPK application, respectively. Soil eutrophication with mineral fertilizers was accompanied by a decrease in soil pH, and eutrophication with organic fertilizers, on the contrary, led to an increase in pH. It is emphasized that over-fertilization and long-term use of fertilizers are the main factors in the development of soil eutrophication and the concomitant change in soil pH.

Keywords: gray forest soil, C_{org} , N_{tot} , $N-NO_3^-$, available P_2O_5 , available K_2O , soil pH, over-fertilization