

УДК 631.415:631.445.2:631.8

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-213-240



Ссылки для цитирования:

Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р. Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы во времени и по профилю при длительном использовании удобрений в условиях Предуралья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 213-240. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-213-240

Cite this article as:

Vasbieva M.T., Yamaltdinova V.R., Changes in the acid-base properties of soddy-podzol soil with time and along the profile, resulting from long-term use of fertilizers under the conditions of the Cis-Urals, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 213-240, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-213-240

Благодарность:

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 124020600030-6.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state assignment No. 124020600030-6.

Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы во времени и по профилю при длительном использовании удобрений в условиях Предуралья

© 2024 г. М. Т. Васбиева*, В. Р. Ямалтдинова**

*Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия,
614532, ул. Культуры, 12, с. Лобаново, Пермский район, Пермский край,*

**<https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbieva@mail.ru,*

***<https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>,*

e-mail: yamaltdinova2303@gmail.com.

*Поступила в редакцию 09.09.2024, после доработки 04.04.2025,
принята к публикации 03.06.2025*

Резюме: Показано влияние длительного использования органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения, выровненных по элементам питания (контроль – без удобрений; навоз КРС 10 и 20 т/га в год; НРК эквивалентно 10 и 20 т навоза; навоз 5, 10 и 20 т + НРК

эквивалентно 5, 10 и 20 т навоза) на изменение обменной (pH_{KCL}), гидролитической кислотности (H_2), суммы обменных оснований (S) и степени насыщенности почвы основаниями (V). Исследования проведены в полевом опыте 1969–1970 гг. закладки в Пермском НИИСХ – филиале ПФИЦ УрО РАН на дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почве. Севооборот полевой восьмипольный. Данные представлены по ротациям севооборота (1969–2017 гг.) в пахотном слое почвы и на конец VI ротации (2016–2017 гг.) в метровом слое. Влияние удобрений на свойства почвы изучено на фоне известкования (в дозе 1.0 H_2), которое было проведено в пару первой ротации. Наибольшую эффективность известкования наблюдали в первые две ротации севооборота, с III ротации отмечено постепенное ухудшение показателя pH_{KCL} , H_2 , S и V по всем вариантам опыта, темпы изменения существенно отличались в зависимости от используемой системы удобрения. Насыщенность пашни навозом КРС 20 т/га в год обеспечивала в III–VI ротациях как минимум поддержание изученных свойств почвы на исходном уровне (до известкования) или способствовала их улучшению (отмечено уменьшение H_2 и увеличение V), насыщенность навозом 10 т/га в год сдерживала темпы подкисления почвы (ухудшение показателей кислотности было менее выражено, чем в контрольном варианте). Положительное влияние использования навоза на показатель pH_{KCL} , H_2 и V наблюдали в основном в слое почвы 0–40 см. Применение минеральной системы удобрений привело к подкислению почвы и уменьшению V . Показатель pH_{KCL} , H_2 и V в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в V–VI ротациях были существенно ниже исходного уровня (pH_{KCL} до известкования – 5.5, II ротация – 5.9, V–VI ротация – 4.5–4.6; H_2 – 3.1, 2.5 и 3.7–4.4 смоль(экв)/кг; V – 84, 90, 80–82% соответственно). Отрицательное влияние минеральных удобрений на показатель pH_{KCL} , H_2 и V при насыщенности NPK экв. 20 т/га навоза ($N_{70}P_{50}K_{100}$ в год) наблюдали в метровом слое, NPK экв. 10 т/га навоза ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год) – в пахотном слое. Органоминеральная система удобрений по влиянию на показатели pH_{KCL} , H_2 , S и V занимала промежуточное положение между минеральной и органической, процессы подкисления почвы наблюдались, но они были менее выражены.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва; известкование; минеральные и органические удобрения.

Changes in the acid-base properties of soddy-podzol soil with time and along the profile, resulting from long-term use of fertilizers under the conditions of the Cis-Urals

© 2025 M. T. Vasbieva*, V. R. Yamaltdinova**

Perm Federal Research Center,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
12 Cultures Str., Lobanovo 614532, Perm, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0003-4048-6319>, e-mail: vasbieva@mail.ru,
**<https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>,
e-mail: yamaltdinova2303@gmail.com.

Received 09.09.2024, Revised 04.04.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: The influence of long-term use of organic, mineral and organomineral fertilizer systems leveled by nutrients (control – without fertilizer application; cattle manure 10 and 20 t/ha per year; NPK equivalent to 10 and 20 t of manure; manure 5, 10 and 20 t + NPK equivalent to 5, 10 and 20 tons of manure) on the exchangeable (pH_{KCL}), hydrolytic acidity (Ac_{tot}), the sum of exchangeable bases (S) and the degree of soil saturation with bases (V) is considered. The field experiment was performed in 1969–1970 at the Perm Research Institute of Agriculture, on soddy slightly podzolic heavy loam soil. Field crop rotation included 8 fields. Data are presented for each cycle of crop rotation (1969–2017) in the arable soil layer and at the end of rotation VI (2016–2017) in the meter layer. The effect of fertilizers on soil properties was studied against the background of liming (at a dose of $1.0 Ac_{tot}$), which was carried out in the first rotation. The greatest efficiency of liming was observed in the first two rotations; a gradual deterioration in pH_{KCL} , Ac_{tot} , S and V was noted from the third rotation in all variants of the experiment; the degree of changes differed significantly depending on the fertilizer system used. Application of cattle manure at the rate of 10 t/ha per year restrained the deterioration of the acid-base properties of the soil (relative to the control variant); application of 20 t/ha per year ensured in III–VI rotations at least the maintenance of the studied soil properties at the initial level (before liming) or contributed to their improvement. The positive effect of manure on pH_{KCL} , Ac_{tot} and V indicators was observed mainly in the soil layer of 0–40 cm. The use of a mineral fertilizer system led to acidification of the soil and a decrease in V . The pH_{KCL} , Ac_{tot} and V indicators in the “NPK eq. 20 t/ha of manure” in V–VI rotations were significantly lower than the initial level (pH_{KCL} before

liming – 5.5, II rotation – 5.9, V–VI rotation – 4.5–4.6; Ac_{tot} – 3.1, 2.5 and 3.7–4.4 cmol(eq)/kg; V – 84, 90, 80–82%, respectively). The adverse effect of mineral fertilizers on pH_{KCL} , Ac_{tot} and V after application of NPK eq. 20 t/ha of manure ($N_{70}P_{50}K_{100}$ per year) was observed in a meter layer, NPK eq. 10 t/ha of manure ($N_{35}P_{25}K_{50}$ per year) – in the arable layer. The organomineral fertilizer system occupied an intermediate position between mineral and organic ones in terms of its effect on pH_{KCL} , Ac_{tot} , S and V; processes of soil acidification were observed, but they were less pronounced.

Keywords: soddy-podzolic soil; liming; mineral and organic fertilizers.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема почвенной кислотности имеет огромное значение, поскольку от реакции среды непосредственно зависят практически все происходящие в почвах химические и биологические процессы. Изменение кислотно-основных свойств почвы в результате сельскохозяйственного использования определяется выносом полевыми культурами кальция, магния, калия, выщелачиванием данных элементов за пределы пахотного слоя в условиях промывного водного режима, типом сельскохозяйственных угодий, рельефом, использованием различных агрохимикатов, загрязнением окружающей среды (Шихова, Чеглакова, 2022; Бобраков, Ушаков, 2024; Иванов, Рублюк, 2024). Сильная кислотность почвы является одной из причин недостаточной эффективности удобрений (Завалин и др., 2022). Основным способом улучшения показателей почвенной кислотности является известкование, нейтрализация кислотности приводит к существенным изменениям в показателях эффективного плодородия (Аканова, Шильников, 2018; Окорков и др., 2023; Литвинович и др., 2024). Влияние удобрений на кислотно-основные свойства почвы может меняться в зависимости от их вида, сочетания, доз, периодичности, длительности внесения, проведения известкования и целого комплекса сопутствующих факторов (Бортник и др., 2023; Волкова и др., 2024; Kalkhoran et al., 2020). В работе Л.Н. Шиховой и О.А.

Чеглаковой (2022) показано, что применение NPK в возрастающих дозах (от 30 до 150 кг д. в./га) в течение 45 лет привело к достоверному увеличению всех видов кислотности почвы пахотного слоя. С начала опыта величина гидролитической кислотности возросла на 0.3–1.5 мг-экв./100 г почвы, обменной кислотности – на 0.2–0.5 ед. pH_{KCL} в зависимости от вносимой дозы удобрений. Отрицательное влияние NPK на кислотность почв, в первую очередь, объясняют использованием и включением в состав физиологически кислых азотных удобрений. Фосфорные удобрения, по мнению некоторых исследователей, могут оказывать благоприятное воздействие на кислотно-основные свойства почвы за счет содержащихся в них кальция, магния и кремния (Минеев, Гомонова, 2009), другие говорят об отсутствии влияния (Васбиева и др., 2022) или об отрицательном воздействии (Лыскова, 2017; Окорков и др., 2021). Многолетними исследованиями на серых лесных среднесуглинистых почвах Верхневолжья установлено повышение гидролитической кислотности от водорастворимых фосфорных удобрений (в составе РК и NPK) за счет специфической адсорбции фосфатов минеральной частью поглощающего комплекса и вытеснения ионов водорода (Окорков и др., 2021). В работе И.В. Лысковой (2017) показано, что длительное внесение на дерново-подзолистой почве возрастающих доз фосфорных удобрений (100, 150, 200 кг д. в./га) на фоне $N_{90}K_{90}$ привело к росту обменной (с 1.12 до 1.58–1.75 мг-экв/100 г) и гидролитической кислотности (с 6.7 до 7.9–8.3 мг-экв/100 г), содержания подвижных форм алюминия (с 9.5 до 13.6–15.4 мг/100 г). Возможно, применение высоких доз фосфорных удобрений усугубляло влияние азотных или азотно-калийных.

Внесение органических удобрений считают одним из приемов снижения почвенной кислотности (Лапа, Кулеш, 2015; Чеботарев, Броварова, 2022; Зинякова и др., 2024), при

этом эффективность зависит от дозы, длительности внесения и свойств почвы. Например, в исследованиях Н.А. Пеговой (2017) внесение навоза на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в дозе 60 т/га 1 раз в ротацию семипольного севооборота не оказало существенного влияния на показатели кислотности почвы. В работе Р.А. Афанасьева и Г.Е. Мёрзлой (2021) показано, что при использовании органической системы удобрения (подстилочный навоз крупного скота натуральной влажности в среднегодовой дозе 9 т/га) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве наблюдали увеличение кислотности почвы относительно исходного уровня.

Цель исследований – оценить влияние использования минеральной, органической и органоминеральной систем удобрения, выровненных по элементам питания, на показатели кислотности дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в условиях длительного опыта по ротациям севооборота и по профилю почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на опытном поле Пермского НИИСХ (филиал ПФИЦ УрО РАН) в длительном полевом опыте на дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почве. Изучали органическую, минеральную и органоминеральную системы удобрений, выровненные по элементам питания. Схема исследований: 1) без удобрений (контроль); 2) навоз 10 т/га в год; 3) навоз 20 т/га в год; 4) NPK эквивалентно 10 т навоза; 5) NPK эквивалентно 20 т навоза; 6) навоз 5 т + NPK эквивалентно 5 т навоза; 7) навоз 10 т + NPK эквивалентно 10 т навоза; 8) навоз 20 т + NPK эквивалентно 20 т навоза. Повторность вариантов четырехкратная, размещение рендомизированное. Опыт поставлен в двух последовательных во времени закладках (1969 г., 1970 г.). Общая площадь делянки 115.5 м². Исследования проводили в полевом восьмипольном севообороте с чередованием культур: пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го года поль-

зования (г. п.), клевер 2-го г. п., ячмень, картофель, овес. Изучаемая схема в опыте сложилась со второй ротации севооборота (1977–1978 гг.), поэтому данные представлены за II–VI ротации.

Навоз КРС вносили в севообороте в два приема: под рожь и картофель (разовые дозы составили 20, 40 и 80 т/га). Минеральные удобрения, рассчитанные по эквивалентному содержанию в навозе, распределяли, в зависимости от количества, под озимую рожь, пшеницу, ячмень, картофель и овес. Клевер не удобряли, учитывали последствие. За пять ротаций севооборота (II–VI ротации) с навозом при насыщенности пашни 10 т/га в год в почву поступило N – 1 400, P – 950, K – 2 070 кг/га ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год), при насыщенности 20 т/га – 2 800, 1 900 и 4 140 кг/га ($N_{70}P_{50}K_{100}$ в год) соответственно. Солома после уборки зерновых культур во всех вариантах опыта до 2013 г. отчуждалась, с 2014 г. солома измельчалась комбайном и запахивалась. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый.

Агрохимическая характеристика почвы до закладки опыта: содержание $C_{орг}$ 1.3%, pH_{KCL} – 5.5, H_2 – 3.1 смоль(экв)/кг, S – 16.4 смоль(экв)/кг, подвижного P и K по Кирсанову – 162 и 173 мг/кг соответственно. Почвообразующая порода – бурая некарбонатная покровная глина. Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния, которое увеличивается с глубиной, как и сумма поглощенных оснований.

Отбор образцов почв в опыте проводили систематически, осенью, после окончания ротации севооборота в пахотном слое (0–20 см) или по слоям до глубины 1 м (0–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см). Отбирали индивидуальные образцы в 3–5 точках на каждой делянке, образцы смешивали. Изучение агрохимических свойств почвы проводили в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО, статистическую обработку результатов – с использованием Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В опыте в пару первой ротации севооборота было проведено известкование (в дозе 1.0 H_2), было отмечено в слое почвы 0–20 см существенное улучшение показателя pH_{KCL} , уменьшение гидролитической кислотности, увеличение суммы обменных оснований и насыщенности почв основаниями (рис. 1–4). Наибольшее положительное влияние известкования наблюдали в первые две ротации (1969–1986 гг.), с III ротации отмечено ухудшение показателей обменной и потенциальной кислотности почвы относительно исходного уровня. Показатель pH_{KCL} в пахотном слое почвы в контрольном варианте в III–IV ротациях уменьшился до 5.2–5.3, в V–VI ротациях до 4.9 (pH_{KCL} при закладке опыта до известкования – 5.5). Гидролитическая кислотность почвы в III–VI ротациях севооборота варьировала в пределах 2.8–3.1 смоль(экв)/кг почвы и стала близка к исходной величине (H_2 при закладке опыта до известкования – 3.1).

Срок положительного влияния известкования зависит от кислотности почвы, чем кислее почва, тем меньше период действия. По данным В.Г. Минеева и Н.Ф. Гомоновой (2014), на дерново-подзолистой сильнокислой почве (показатель pH_{KCL} при закладке опыта до известкования – 4.4) срок возвращения почвы к первоначальному уровню кислотности после первого известкования составил 3 года, после второго – 5 лет, третьего – 6–7 лет, четвертого – 11 лет. Почва в нашем опыте до внесения извести характеризовалась слабокислой реакцией среды и повышенной степенью насыщенности основаниями, что обеспечило более длительное действие извести.

По данным Е.М. Митрофановой (2015), изучавшей вопросы известкования в Пермском крае (на почве близкой по характеристикам в представленном опыте), наибольшее

подкисление пахотного слоя после внесения извести наблюдали в течение первой ротации полевого севопольного севооборота (пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го г.п., клевер 2-го г. п., ячмень, овес). В вариантах с дозами извести 0.5–1.0 H_2 в конце I ротации севооборота снижение сдвига рН от максимально достигнутого уровня составляло 57–50%. Через 30 лет после внесения извести сдвиг рН от максимально достигнутого уровня в вариантах с дозами 0.5 и 1.0 H_2 составил 21–14%. В нашем опыте уменьшение показателя pH_{KCL} в пахотном слое почвы до исходного уровня отмечено уже к концу III ротации севооборота (через 24 года), что возможно связано с другим типом севооборота.

Сумма обменных оснований в контрольном варианте опыта после известкования в течение II–VI ротаций севооборота в слое почвы 0–20 см варьировала в пределах 18.4–19.6 смоль(экв)/кг), уменьшения до исходного уровня не наблюдали (S при закладке опыта до известкования – 16.4 смоль(экв)/кг). Большие запасы валового содержания кальция и магния в исследуемой дерново-подзолистой почве могут являться основной причиной стабильности суммы обменных оснований в почве (Попова и др., 2013).

Степень насыщенности почв основаниями после известкования в конце II ротации составила 89 (до закладки – 84), в течение III–VI ротации варьировала в пределах 86–87%.

Применение минеральной системы удобрений (“NPK экв. 10 и 20 т/га навоза”) привело к постепенному подкислению почвы.

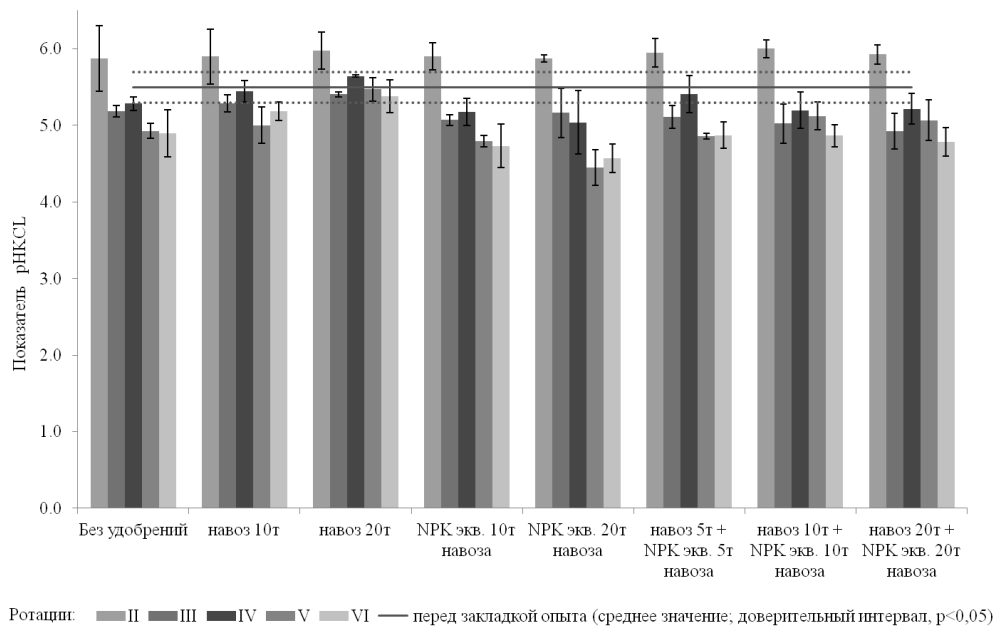


Рис. 1. Изменение обменной кислотности (pH_{KCL}) в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 1. Variation of exchangeable acidity (pH_{KCL}) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

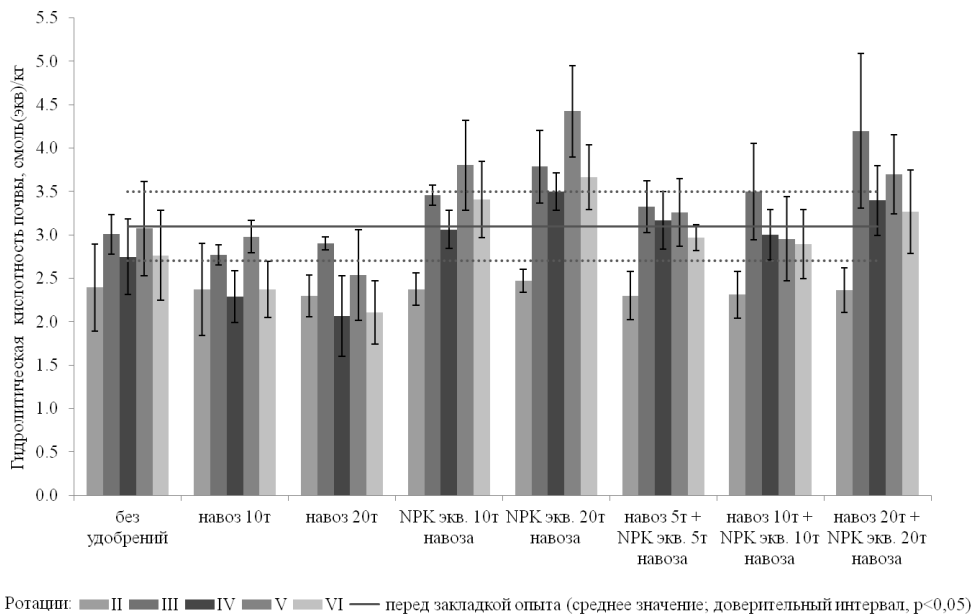


Рис. 2. Изменение гидролитической кислотности в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 2. Variation of hydrolytic acidity (Ac_{tot}) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

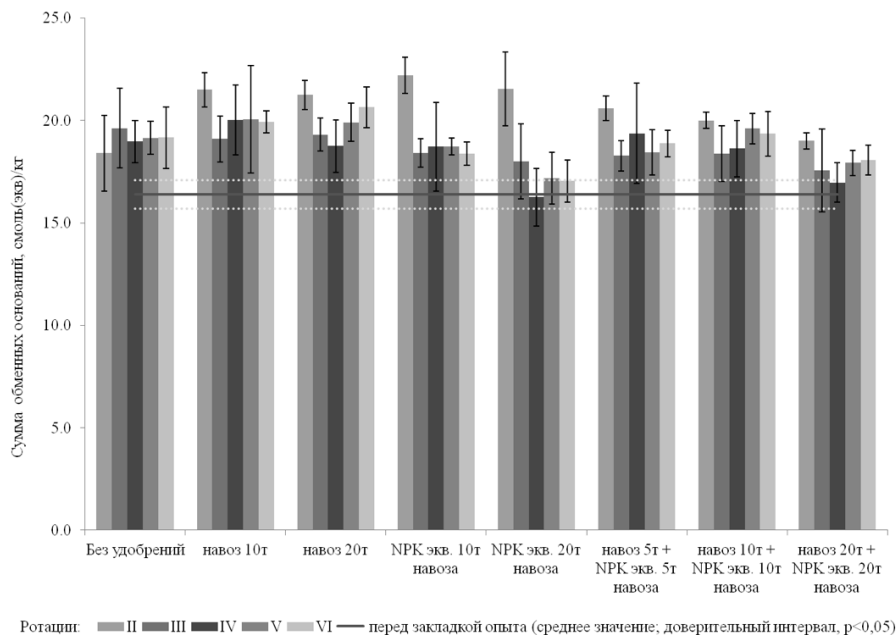


Рис. 3. Изменение суммы обменных оснований в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 3. Variation of the sum of exchangeable bases (S) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

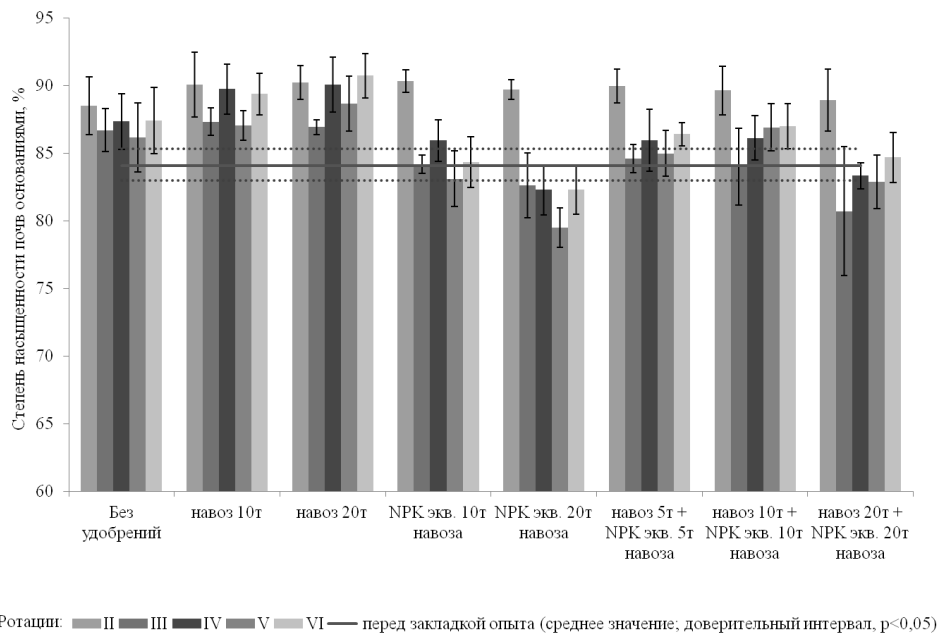


Рис. 4. Изменение степени насыщенности основаниями в пахотном слое дерново-подзолистой почвы по ротациям севооборота при длительном применении различных систем удобрений (1977–2017 гг.).

Fig. 4. Variation of the degree of soil saturation with bases (V) in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017).

Положительное влияние известкования в данных вариантах наблюдали в первые две ротации, с III ротации отмечено увеличение H_2 почвы, уменьшение показателей pH_{KCL} , S и V , как относительно исходного уровня, так и контрольного варианта. Гидролитическая кислотность в пахотном слое почвы в отдельные ротации увеличивалась до 3.8–4.4 смоль(экв)/кг почвы, показатель pH_{KCL} снижался до 4.5. Сумма обменных оснований в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в IV ротации уменьшилась до исходного значения (16.4 смоль(экв)/кг). Степень насыщенности почвы основаниями при использовании минеральных удобрений к концу III ротации снизилась с 90 до 84%, в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в IV–VI ротациях – до 80–82%.

Применение органической системы удобрений оказывало положительное влияние на кислотно-основные свойства почвы в течение всех шести ротаций севооборота. Эффективность известкования при использовании навоза так же, как и в вариантах с минеральной системой удобрений, уменьшается с III ротации севооборота, однако темпы существенно ниже. Показатель pH_{KCL} в варианте навоз 10 т/га в год был выше контрольного варианта и в III–VI ротациях варьировал от 5.0 до 5.4, в варианте навоз 20 т/га в год отмечено поддержание данного показателя на исходном уровне (5.5–5.6). Гидролитическая кислотность почвы при применении навоза в обоих вариантах была меньше, как исходного уровня, так и контрольного варианта. Наибольшее положительное влияние на данный показатель отмечено в варианте навоз 20 т/га в год, здесь в IV–VI ротациях H_2 пахотного слоя почвы варьировала от 2.1 до 2.5 смоль(экв)/кг (контрольный вариант – 2.7–3.1; навоз 10 т/га в год – 2.3–3.0 смоль(экв)/кг). Варьирование показателей кислотности по ротациям можно объяснить качеством поступающего органического материала, длительностью использования навоза, сезонной составляющей и пространственной неоднородно-

стью почвенного покрова. Сумма обменных оснований почвы в вариантах с навозом была выше исходного уровня и контрольного варианта, в V–VI ротациях наблюдали увеличение S до 19.9–20.7 смоль(экв)/кг – максимальные значения данного показателя в опыте в слое почвы 0–20 см. Степень насыщенности почв основаниями при насыщенности почвы навозом 10 и 20 т/га в год варьировала по ротациям севооборота в пределах 87–91%.

Положительное влияние органических удобрений на кислотно-основные свойства почвы можно объяснить содержанием в них кальция и магния. Органические удобрения улучшают водопроницаемость почвы, в результате чего подавляются восстановительные процессы, ведущие к образованию токсичных Mn^{2+} и Fe^{2+} , и усиливается вымывание токсичных элементов из пахотного слоя. Длительное внесение органических удобрений повышает содержание органического вещества, что также положительно влияет на показатели кислотности почвы (Попова и др., 2013).

Органоминеральная система удобрений по влиянию на показатели кислотности почвы, S и V занимала промежуточное положение. Здесь также наблюдали уменьшение показателя pH_{KCL} , S , V и увеличение H_2 , как и при внесении минеральных удобрений в эквивалентных количествах, но менее интенсивно. Похожие результаты отмечены в работах (Попова и др., 2013; Чебаторев, Броварова, 2022; Ye et al., 2022).

Изучение влияния систем удобрения на кислотно-основные свойства почвы в метровом слое были проведены в конце VI ротации. Отрицательное влияние минеральных удобрений на показатели кислотности почвы, S и V в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” наблюдали в метровом слое, в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” – только в пахотном слое (табл. 1).

Таблица 1. Изменение показателей кислотности, суммы обменных оснований и степени насыщенности основаниями по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрений (VI ротация, 2016–2017 гг.)
Table 1. Variation of soil acidity, sum of exchangeable bases, base saturation degree in the arable layer of sod-podzolic soil according to crop rotations with long-term use of various fertilizer systems (1977–2017)

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
pH _{KCL}					
Без удобрений	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8
Навоз 10 т/га	5.2	5.1	5.0	5.0	4.9
Навоз 20 т/га	5.4	5.2	5.1	5.0	4.8
NPK экв. 10 т навоза	4.7	4.9	4.8	4.7	4.9
NPK экв. 20 т навоза	4.6	4.7	4.6	4.3	4.3
Навоз 5 т+NPK экв.	4.9	5.0	4.9	4.8	4.5
Навоз 10 т + NPK экв.	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8
Навоз 20 т + NPK экв.	4.8	5.0	5.0	4.9	4.7
HCP ₀₅	0.1	0.3	0.3	0.3	0.4

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
<i>H₂</i> , смоль(экв)/кг					
Без удобрений	2.8	2.2	2.0	1.9	1.9
Навоз 10 т/га	2.4	1.9	1.8	1.8	1.8
Навоз 20 т/га	2.1	1.8	1.8	1.8	1.9
НПК экв. 10 т навоза	3.4	2.4	2.0	1.9	1.9
НПК экв. 20 т навоза	3.7	2.5	2.2	2.8	2.6
Навоз 5 т+НПК экв.	3.0	2.3	2.1	2.0	2.2
Навоз 10 т + НПК экв.	2.9	2.2	2.2	2.1	2.0
Навоз 20 т + НПК экв.	3.3	2.5	2.2	2.4	2.4
НСП ₀₅	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
S, смоль(экв)/кг					
Без удобрений	19.6	22.6	24.8	25.9	25.8
Навоз 10 т/га	19.9	23.7	20.2	26.7	26.5
Навоз 20 т/га	20.7	23.3	26.4	26.8	27.3
НПК экв. 10 т навоза	18.4	23.1	25.7	27.5	27.9
НПК экв. 20 т навоза	17.1	22.3	25.6	26.3	26.3
Навоз 5 т+НПК экв.	18.9	21.6	27.0	26.3	27.1
Навоз 10 т + НПК экв.	19.4	24.0	28.1	27.3	28.0
Навоз 20 т + НПК экв.	18.1	20.7	24.6	26.7	26.5
НСП ₀₅	1.5	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Вариант	Показатель / глубина (см)				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
V, %					
Без удобрений	90	91	93	93	93
Навоз 10 т/га	91	93	92	94	94
Навоз 20 т/га	92	93	94	94	93
НПК экв. 10 т навоза	88	90	93	94	94
НПК экв. 20 т навоза	85	90	92	90	91
Навоз 5 т+НПК экв.	88	91	93	93	92
Навоз 10 т + НПК экв.	88	92	93	93	93
Навоз 20 т + НПК экв.	85	89	92	92	92
НСП ₀₅	2	2	$F_{\phi} < F_T$	2	2

Полученные результаты, в первую очередь, обусловлены более высокой насыщенностью пашни азотными, а также, возможно, калийными удобрениями в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза”. Установлено, что сочетание азотных удобрений с калием хлористым оказывает более сильное отрицательное влияние на физико-химические свойства почвы, чем применение азотных удобрений в чистом виде (Vasbieva et al., 2022).

Ухудшение показателей кислотности также может быть связано с количеством азота удобрений, не используемого культурами, т. е. избыточного. Считается, что имеет значение не только доза азотных удобрений, но и обеспечение благоприятных условий для проявления их эффективности.

По данным А.И. Иванова (2000), на окультуренных дерново-подзолистых почвах хозяйственный вынос азота культурами севооборота находился в пределах 110–130 кг/га, поэтому доза азотного удобрения 120 кг д. в./га не вызывала существенного роста кислотности почвы по отношению к контролю за 12 лет применения. Баланс азота по результатам наших исследований в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год) сложился отрицательный (–38 кг/га), в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” ($N_{70}P_{20}K_{100}$ в год) – близкий к нулевому (табл. 2). При этом отрицательное влияние минеральных удобрений на показатели кислотности почвы наблюдали в обоих вариантах. Возможно, это связано с невысоким коэффициентом использования азота из удобрений (расчетный метод), который по ротациям варьировал в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” от 32 до 60%, в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” – от 10 до 29%.

Положительное влияние навоза (насыщенность 10 и 20 т/га в год) на показатель pH_{KCL} и V относительно контрольного варианта наблюдали в слое 0–40 см, H_2 – в слое 0–60 см.

Таблица 2. Хозяйственный баланс азота в опыте, кг/га в среднем в год (среднее по 2 закладкам, 1977–2017 гг.)

Table 2. Balance of nitrogen in the experiment, kg/ha on average per year (average for 2 experiment layings, 1977–2017)

Вариант	Поступление азота с удобрениями	Хозяйственный вынос	Баланс, ±
Без удобрений	-	58	-58
Навоз 10 т/га	36	69	-33
Навоз 20 т/га	71	73	-1
НПК экв. 10 т навоза	36	74	-38
НПК экв. 20 т навоза	71	78	-7
Навоз 5 т + НПК экв.	39	74	-35
Навоз 10 т + НПК экв.	74	80	-5
Навоз 20 т + НПК экв.	144	83	61

Достоверные изменения по профилю почвы при использовании органоминеральной системы удобрения наблюдали только в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год + НПК экв. навозу). Здесь отмечено увеличение H_2 в метровом слое и уменьшение V в слое 0–40 см.

Существенных изменений по профилю почвы в содержании обменной формы кальция и магния в результате длительного использования различных систем удобрения относительно контрольного варианта в опыте не выявлено. Только в вариантах “НПК экв. 20 т/га навоза” и “навоз 20 т/га + НПК экв. навозу” наблюдали достоверное уменьшение в пахотном слое почвы содержания обменных соединений кальция с 16.8 до 14.3–14.6 смоль(экв)/кг (на 13–15%) ($HCp_{05} = 1.2$ смоль(экв)/кг).

ВЫВОДЫ

Известкование (доза 1.0 H_2) дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почвы, сформированной на желто-бурой покровной глине, обеспечило существенное улучшение кислотности почвы, увеличение S и V . Наибольшую эффективность известкования наблюдали в течение первых двух ротаций полевого восьмипольного севооборота, с III ротации отмечено постепенное ухудшение кислотно-основных свойств почвы по всем вариантам опыта. При этом темпы существенно отличались в зависимости от используемой системы удобрения. Применение органической системы удобрений оказывало положительное влияние на кислотно-основные свойства почвы. Насыщенность пашни навозом КРС 20 т/га в год как минимум обеспечивала поддержание изученных свойств почвы на исходном уровне (до известкования) или способствовала их улучшению. Положительное влияние использования навоза на показатели кислотности почвы и V наблюдали в основном в слое 0–40 см. Применение минеральной системы удобрений привело к подкислению почвы и уменьшению V . Значения обменной, гидролитической кислотности и степени насыщенности почвы основаниями в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” в V–VI ротациях были существенно ниже исходного уровня. Отрицательное влияние минеральных удобрений на кислотно-основные свойства в варианте “NPK экв. 20 т/га навоза” наблюдали в метровом слое; в варианте “NPK экв. 10 т/га навоза” – только в пахотном слое. Органоминеральная система удобрений по влиянию на кислотность почвы, S и V занимала промежуточное положение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аканова Н.И., Шильников И.А. Проблема химической мелиорации почв в земледелии Российской Федерации // Плодородие. 2018. № 2(101). С. 9–11.

2. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Сравнительная эффективность систем удобрения // *Агрохимия*. 2021. № 2. С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121020034>.
3. Бобраков Ф.Ю., Ушаков Р.Н. Мониторинг состояния кислотности агросерой почвы и биодиагностика ее устойчивости к подкислению // *Плодородие*. 2024. № 2(137). С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.137.08>.
4. Бортник Т.Ю., Карпова А.Ю., Клековкин К.С. Агроэкологическое состояние дерново-среднеподзолистой среднесуглинистой почвы после 40-летнего применения различных систем удобрения // *Агрохимический вестник*. 2023. № 1. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-001>.
5. Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е., Шишков Д.Г. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении азотных, фосфорных и калийных удобрений в условиях Предуралья // *Почвоведение*. 2022. № 11. С. 1415–1425. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110132>.
6. Волкова Е.С., Шайкова Т.В., Дятлова М.В. Эффективность азотных удобрений и биопрепаратов под озимую рожь на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2024. № 119. С. 139–171. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-139-171>.
7. Завалин А.А., Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Эффективность применения биомодифицированных минеральных удобрений под ячмень при различной кислотности дерново-подзолистой почвы // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2022. № 2. С. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2022/2/65-68>.
8. Зинякова Н.Б., Соколов Д.А., Лебедева Т.Н., Удалцов С.Н., Семенов В.М. Влияние многолетнего применения минеральных удобрений и навоза на агрохимические свойства серой лесной почвы, продуктивность культур и секвестрацию углерода // *Агрохимия*. 2024. № 4. С. 14–34. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124040033>.
9. Иванов А.И. Почвенно-агрохимическое обоснование системы удобрения на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России: Дис. ... докт. сельскохозяйственных наук: 06.01.04. Санкт-Петербург, 2000. 295 с.
10. Иванов Д.А., Рублюк М.В. Динамика гидролитической кислотности почв в агроландшафте // *Агрохимический вестник*. 2024. № 2. С. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-2-008>.
11. Лапа В.В., Кулеш О.Г. Роль уровня почвенной кислотности и условий питания в изменении агрохимических свойств дерново-подзолистой

легкосуглинистой почвы // Почвоведение и агрохимия. 2015. № 1(54). С. 140–150.

12. *Литвинович А.В., Нельсон К.М., Лаврищев А.В., Манаков П.С.* Влияние удобрений и мелиорантов на величину почвенной кислотности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, урожайность и химический состав зеленой массы ярового рапса (по данным лабораторно- вегетационного опыта) // Агрохимия. 2024. № 5. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124050055>.

13. *Лыскова И.В.* Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, урожайность и качество зерновых культур // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 6(61). С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.61.6.35-40>.

14. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф.* Значение фосфора в улучшении свойств дерново-подзолистой почвы при действии и последствии длительного применения минеральных удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 2. С. 3–9.

15. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф.* Периодичность известкования при окультуривании дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 1. С. 37–41.

16. *Митрофанова Е.М.* Влияние известкования и минеральных удобрений на кислотность дерново-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2015. № 7. С. 3–10.

17. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Коновалова Л.К.* Серые лесные почвы Владимирского ополья, их формирование и оценка ресурсногопотенциала: удобрение и питание полевых культур. Суздаль-Воронеж: МИНОБРНАУКИ РФ, ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”, 2023. 241 с.

18. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Влияние длительного применения удобрений на изменение физико-химических свойств серой лесной почвы Верхневолжья // Владимирский земледелец. 2021. № 2(96). С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-27-34>.

19. *Пегова Н.А.* Влияние систем обработки и биоресурсов на агрохимические свойства дерново-подзолистой суглинистой почвы // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 6. С. 31–35.

20. *Попова С.И., Митрофанова Е.М., Зиганьшина Ф.М.* Известкование кислых почв в Предуралье. Пермь: Издательство “От и До”, 2013. 252 с.

21. *Чеботарев Н.Т., Броварова О.В.* Влияние длительного применения систем удобрений на свойства почвы и продуктивность севооборотов условиях Европейского Севера России // Агрохимический вестник. 2022. № 5. С. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-006>.

22. Шихова Л.Н., Чеглакова О.А. Изменение кислотности и состава ППК при длительном внесении возрастающих доз минеральных удобрений в дерново-подзолистой почве // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 6. С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500262722060072>.
23. Kalkhoran S.S., Pannell D.J., Thamo T., Polyakov M., White B. Optimal lime rates for soil acidity mitigation: impacts of crop choice and nitrogen fertiliser in Western Australia // Crop & Pasture Science. 2020. Vol. 71. P. 36–46.
24. Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Shishkov D.G. Changes in the Agrochemical Properties of Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic) during a Long-Term Use of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers under Cis-Ural // Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. No. 11. P. 1623–1632. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110138>.
25. Ye J., Wang Y., Wang Y., Hong L., Jia X., Kang Ja., Lin Sh., Wu Z., Wang H. Improvement of soil acidification in tea plantations by long-term use of organic fertilizers and its effect on tea yield and quality // Front Plant Sci. 2022. Vol. 13. No. 1055900. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055900>.

REFERENCES

1. Akanova N.I., Shilnikov I.A., Problema khimicheskoy melioratsii pochv v zemledelii Rossiyskoy Federatsii (The problem of chemical soil melioration in agriculture of the Russian Federation), *Plodorodiye*, 2018, No. 2(101), pp. 9–11.
2. Afanasyev R.A., Merzlaya G.E., Sravnitel'naya effektivnost' sistem udobreniya (Comparative efficiency of fertilization systems), *Agrokhiimiya*, 2021, No. 2, pp. 31–36, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121020034>.
3. Bobrakov F.Yu., Ushakov R.N., Monitoring sostoyaniya kislotnosti agroseroy pochvy i biodiagnostika yeye ustoychivosti k podkislениyu (Monitoring the acidity state of agro-gray soil and biodiagnostics of its resistance to acidification), *Plodorodiye*, 2024, No. 2(137), pp. 31–35, DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.137.08>.
4. Bortnik T.Yu., Karpova A.Yu., Klekovkin K.S., Agroekologicheskoye sostoyaniye dernovo-srednepodzolistoy srednesuglinistoy pochvypосle 40-letnego primeneniya razlichnykh sistem udobreniya (Agroecological state of sod-medium podzolic medium loamy soil after 40 years of using various fertilization systems), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2023, No. 1, pp. 3–10, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-1-001>.
5. Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Shishkov D.G., Izmeneniye agrokhimicheskikh svoystv dernovo-podzolistoy tyazhelosuglinistoy pochvy pri dlitel'nom primeneniі azotnykh, fosfornykh i kaliynykh udobreniy v

usloviyakh Predural'ya (Changes in the agrochemical properties of sod-podzolic heavy loamy soil with long-term use of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in the conditions of the Cis-Urals), *Pochvovedeniye*, 2022, No. 11, pp. 1415–1425, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110132>.

6. Volkova E.S., Shaykova T.V., Dyatlova M.V., Efficiency of nitrogen fertilizers and biological preparations for winter rye on soddy-podzolic soil of different cultivation status, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 119, pp. 139–171, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-139-171>.

7. Zavalin A.A., Kirpichnikov N.A., Bizhan S.P., Effektivnost' primeneniya biomodifitsirovannykh mineral'nykh udobreniy pod yachmen' pri razlichnoy kislotnosti dernovo-podzolistoy pochvy (Efficiency of using biomodified mineral fertilizers for barley with different acidity of sod-podzolic soil), *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2022, No. 2, pp. 65–68, DOI: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2022/2/65-68>.

8. Zinyakova N.B., Sokolov D.A., Lebedeva T.N., Udaltsov S.N., Semenov V.M., Vliyaniye mnogoletnego primeneniya mineral'nykh udobreniy i navoza na agrokhimicheskiye svoystva seroy lesnoy pochvy, produktivnost' kul'tur i sekvestratsiyu ugleroda (Effect of long-term use of mineral fertilizers and manure on the agrochemical properties of gray forest soil, crop productivity and carbon sequestration), *Agrokhimiya*, 2024, No. 4, pp. 14–34, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124040033>.

9. Ivanov A.I., *Pochvenno-agrokhimicheskoye obosnovaniye sistemy udobreniya na khorosho okul'turenykh dernovo-podzolistykh pochvakh Severo-Zapada Rossii: Dis. ... dokt. sel'skokhozyaystvennykh nauk: 06.01.04*. (Soil and agrochemical substantiation of the fertilization system on well-cultivated sod-podzolic soils of the North-West of Russia, Dr. Agri. Sci. thesis, 06.01.04), Sankt-Peterburg, 2000, 295 p.

10. Ivanov D.A., Rublyuk M.V., Dinamika gidroliticheskoy kislotnosti pochv v agrolandshafte (Dynamics of hydrolytic acidity of soils in the agricultural landscape), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2024, No. 2, pp. 40–45, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-2-008>.

11. Lapa V.V., Kulesh O.G., Rol' urovnya pochvennoy kislotnosti i usloviy pitaniya v izmenenii agrokhimicheskikh svoystv dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochvy (The role of soil acidity level and nutrition conditions in changing the agrochemical properties of sod-podzolic light loamy soil), *Pochvovedeniye i agrokhimiya*, 2015, No. 1(54), pp. 140–150.

12. Litvinovich A.V., Nelson K.M., Lavrishchev A.V., Manakov P.S., Vliyaniye udobreniy i meliorantov na velichinu pochvennoy kislotnosti dernovo-podzolistoy legkosuglinistoy pochvy, urozhaynost' i khimicheskii sostav zelenoy massy yarovogo rapsa (po dannym laboratorno-

vegetatsionnogo opyta) (The influence of fertilizers and ameliorants on the value of soil acidity of sod-podzolic light loamy soil, the yield and chemical composition of green mass of spring rape (according to laboratory and vegetation experiment)), *Agrokimiya*, 2024, No. 5, pp. 37–44, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124050055>.

13. Lyskova I.V., Vliyaniye mineral'nykh udobreniy na plodorodiye dernovo-podzolistoy pochvy, urozhaynost' i kachestvo zernovykh kul'tur (The influence of mineral fertilizers on the fertility of sod-podzolic soil, the yield and quality of grain crops), *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka*, 2017, No. 6(61), pp. 35–40, DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2017.61.6.35-40>.

14. Mineev V.G., Gomonova N.F., Znacheniyе fosforа v uluchshenii svoystv dernovo-podzolistoy pochvy pri deystvii i posledeystvii dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh udobreniy (The importance of phosphorus in improving the properties of sod-podzolic soils under the effect and aftereffect of long-term use of mineral fertilizers), *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2009, No. 2, pp. 3–9.

15. Mineev V.G., Gomonova N.F., Periodichnost' izvestkovaniya pri okul'turivaniі dernovo-podzolistoy srednesuglinistoy pochvy (Frequency of liming during cultivation of sod-podzolic medium loamy soil), *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 2014, No. 1, pp. 37–41.

16. Mitrofanova E.M., Vliyaniye izvestkovaniya i mineral'nykh udobreniy na kislotnost' dernovo-podzolistoy pochvy Predural'ya (Effect of liming and mineral fertilizers on the acidity of sod-podzolic soil in the Cis-Urals), *Agrokimiya*, 2015, No. 7, pp. 3–10.

17. Okorkov V.V., Okorkova L.A., Konovalova L.K., *Seryye lesnyye pochvy Vladimirskogo opol'ya, ikh formirovaniye i otsenka resursnogopotentsiala: udobreniye i pitaniye polevykh kul'tur* (Gray forest soils of the Vladimir Opolye, their formation and assessment of resource potential: fertilization and nutrition of field crops), Suzdal'-Voronezh: MINOBRNAUKI RF, FGBNU “Verkhnevolzhskiy FANTS”, 2023, 241 p.

18. Okorkov V.V., Okorkova L.A., Fenova O.A., Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya udobreniy na izmeneniye fiziko-khimicheskikh svoystv seroy lesnoy pochvy Verkhnevolzh'ya (The effect of long-term use of fertilizers on changes in the physicochemical properties of gray forest soil of the Upper Volga region), *Vladimirskiy zemledelets*, 2021, No. 2(96), pp. 27–34, DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-27-34>.

19. Pegova N.A., Vliyaniye sistem obrabotki i bioresursov na agrokhimicheskiye svoystva dernovo-podzolistoy suglinistoy pochvy (The effect of processing systems and bioresources on the agrochemical properties of sod-podzolic loamy soil), *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2017, No. 6, pp. 31–35.

20. Popova S.I., Mitrofanova E.M., Ziganshina F.M., *Izvestkovaniye kislykh pochv v Predural'ye* (Liming of acidic soils in the Cis-Urals), Perm': Izdatel'stvo "Ot i Do", 2013, 252 p.
21. Chebotarev N.T., Brovarova O.V., Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya sistem udobreniy na svoystva pochvy i produktivnost' sevooborotav usloviyakh Yevropeyskogo Severa Rossii (Effect of long-term use of fertilizer systems on soil properties and crop rotation productivity in the conditions of the European North of Russia), *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2022, No. 5, pp. 24–28, DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-006>.
22. Shikhova L.N., Cheglakova O.A., Izmeneniye kislotsnosti i sostava PPK pri dlitel'nom vnesenii vozrastayushchikh doz mineral'nykh udobreniy v dernovo-podzolistoy pochve (Changes in acidity and composition of the crop-arable complex with long-term application of increasing doses of mineral fertilizers in sod-podzolic soil), *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*, 2022, No. 6, pp. 32–36, DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500262722060072>.
23. Kalkhoran S.S., Pannell D.J., Thamo T., Polyakov M., White B., Optimal lime rates for soil acidity mitigation: impacts of crop choice and nitrogen fertiliser in Western Australia, *Crop & Pasture Science*, 2020, Vol. 71, pp. 36–46.
24. Vasbieva M.T., Zavyalova N.E., Shishkov D.G., Changes in the Agrochemical Properties of Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic) during a Long-Term Use of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers under Cis-Ural, *Eurasian Soil Science*, 2022, Vol. 55, No. 11, pp. 1623–1632, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322110138>.
25. Ye J., Wang Y., Wang Y., Hong L., Jia X., Kang Ja., Lin Sh., Wu Z., Wang H., Improvement of soil acidification in tea plantations by long-term use of organic fertilizers and its effect on tea yield and quality, *Front Plant Sci.*, 2022, Vol. 13, No. 1055900, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055900>.