

РЕГРАДАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВ (ОБЗОР)

© 2025 г. И. Н. Семенков^{a, b, *}

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^bЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

*e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 07.05.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 29.08.2024 г.

Обобщена информация об изменении свойств постагрогенных почв с фокусом на состав органического вещества в ходе восстановления естественной растительности. В пределах одной ландшафтной зоны от хроносерий распахиваемого горизонта на наиболее бедных субстратах к более богатым снижается контрастность изменения кислотности, содержания и запасов почвенного органического вещества, обогащенность гумуса N. Этот тренд проявляется и в ряду постагрогенных почв: песчаные и супесчаные тайги и подтайги — суглинистые тайги и подтайги — суглинистые лесостепи и степи. В старопашотном горизонте при естественном восстановлении растительности величина pH и содержание подвижного K снижается в (под)тайге и остается неизменной в (лесо)степи. Содержание подвижного P и обменных Ca и Mg слабоконтрастно уменьшается в песчаных почвах (под)тайги и является консервативным показателем в суглинистых почвах (под)тайги и (лесо)степи. В песчаных почвах лесных биомов умеренного пояса содержание почвенного органического вещества и общего N по-разному меняется в ходе постагрогенной сукцессии. В суглинистых почвах лесных и степных биомов их содержание повышается или существенным образом не меняется в ходе естественного восстановления растительности. Несиликатные соединения переходных металлов и подвижные соединения кальция, а также активный кислород, продуцируемый почвенными микроорганизмами, играют важную, но не до конца понятную роль в стабилизации и разрушении почвенного органического вещества. В контексте постагрогенных реградационных изменений почв пока выполнены лишь пилотные оценки трансформации состава почвенного органического вещества.

Ключевые слова: цикл углерода, хроноряд, пространственно-временная замена, экологические индикаторы, залежные почвы, гумус, микробиота, дождевые черви, грибы

DOI: 10.31857/S0032180X25010097, **EDN:** BXQOSP

ВВЕДЕНИЕ

Почвы как крупнейший наземный резервуар углерода — важнейший буфер по смягчению глобальных изменений климата [160]. Содержание почвенного органического вещества (ПОВ) и его фракций [195, 200, 232] характеризует здоровье и потенциал плодородия экосистемы [81, 136], отражает степень ее нарушенности и скорость восстановления [166, 248]. При этом само ПОВ чувствительно к изменению среды [137]. Его устойчивость оценивают по среднему времени пребывания углерода в почве, выделяя пулы по периоду оборота от десятков до тысяч лет [82, 157, 175].

В современном глобальном масштабе вклад смены землепользования в изменение запасов ПОВ больше, чем изменения климата и концентрации CO₂ в атмосфере [198] и может давать до 20% общих антропогенных выбросов CO₂ [183], т.е. является существенным фактором эмиссии парниковых газов [78]. Особенно значительно воздействие сельского хозяйства [154, 244]. Влияние сельского хозяйства на запасы ПОВ прослеживалось даже в 100-летних лесах Бельгии [228], возникших на месте заброшенных угодий. Комплексное исследование механизмов трансформации состава ПОВ заброшенных сельхозземель во взаимосвязи с

биоразнообразием является важной задачей [246, 249], особенно в Нечерноземной зоне Восточно-Европейской равнины, где сосредоточены основные мировые массивы залежных земель.

Цель обзора — обобщить информацию о факторах реградации и временных изменениях в химических свойствах старопашотного горизонта почв с фокусом на состав органического вещества при естественном восстановлении растительности.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТАГРОГЕННЫХ ХРОНОРЯДОВ

Хроноряды почв, отражающие естественное постагрогенное восстановление экосистем на месте заброшенных пахотных угодий, где после внесения удобрений и мелиорантов изменился исходный состав органо-минеральных комплексов, можно рассматривать в качестве длительного эксперимента по коэволюции гумусовых и минеральных веществ пахотного горизонта, растительности и почвенной биоты (табл. S1). Важным вопросом изучения постагрогенных и любых других хроносери является поиск эталона сравнения (точки отсчета) и обоснование прямого сравнения с современными ненарушенными или условно коренными экосистемами [128] — так называемая пространственно-временная замена (space-for-time substitution) [201], — так как предполагается отсутствие значимых изменений условий почвообразования за рассматриваемый период. При этом в подобно-го рода реконструкциях пока еще не учитывается вклад исходной мозаичности свойств почв, наблюдаемой в старовозрастных лесах [78].

Массово на Европейской территории России длительность зарастания заброшенных сельхозугодий надежно реконструируется по картографическим материалам как минимум с конца XVIII в. (Планам генерального межевания) или спутниковым снимкам *Russia*, начиная с 1960-х гг. благодаря американской программе “CORONA”. На некоторые территории имеется и более ранняя аэрофотосъемка [7]. Исторические (до середины XX в.) объемы внесения органических и минеральных удобрений на конкретный участок можно лишь приблизительно оценить по скудным среднестатистическим данным и информации о поголовье домашнего скота [92].

Параметры лесовосстановления на заброшенных сельхозземлях за счет региональных и локальных природных и социально-экономических факторов несколько отличаются. На региональном уровне сильно влияние социально-экономических причин (прежде всего динамики численности сельского населения) при подчиненной роли природно-экологических условий [13, 55]. На Восточно-Европейской равнине вместе с малопродуктивными землями из пашни выводили земли

хорошего качества, экологический потенциал которых остался невостребованным по экономическим, демографическим причинам [13, 193] или ввиду расположения вдали от населенных пунктов, либо как изолированных наделов внутри лесов [70]. Различие в степени окультуренности заброшенных почв может существенным образом сказываться на последующих трендах изменения свойств старопашотного горизонта. В Нечерноземье европейской части России за 1990–2000 гг. больше всего сельхозземель (в среднем 46%, с максимумом до 62% в отдельных районах по данным со спутниковых снимков Landsat) заброшено в Смоленской области [70].

Лесовосстановление на бывших сельхозземлях, предполагает сначала накопление углерода за счет роста запасов фитомассы и формирования подстилки [75, 131], а затем и ПОВ [12, 25, 45, 61] преимущественно за счет увеличения содержания ОВ, прочно связанного с минеральной частью [19, 55, 75, 143, 231]. Скорость закрепления углерода постагрогенными экосистемами зависит от возраста залежи, природной зоны, типа использования, подстилающих пород и других факторов [37, 50, 59, 73, 79, 89, 165]. Однако есть сообщения о недовольных изменениях или даже о снижении запасов ПОВ при естественном лесовосстановлении [51, 74, 151, 179, 196, 208, 224]. Такие результаты характерны для почв под хвойной растительностью [153], где количество медленно разлагаемого опада увеличивается по сравнению с быстро разлагающимися травами и органическими удобрениями на полях [203]. Несмотря на увеличение содержания ОВ в верхних слоях лесных почв, общие запасы углерода в них могут сокращаться. В почвах Приморского края при общей тенденции к увеличению запасов углерода по окончании сельскохозяйственного использования только за первый год в слое 0–50 см содержание углерода снизилось из-за прекращения внесения навоза [122]. Отдельно стоит подчеркнуть, что растительность, а не почвы является основным депозитарием углерода в постагрогенных экосистемах [76].

ФАКТОРЫ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ СВОЙСТВ ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВ

Почвенные исследования агрогенных сукцессий зачастую фокусируются на запасах и балансе углерода. Имеется существенно меньше работ, посвященных временной изменчивости факторов и характеристикам экосистем, определяющих наблюдаемые изменения, особенно детальному анализу межкомпонентных связей в системе растения—подстилка—почва—почвенная биота [54], а также трансформационных изменений состава ПОВ ранее распаханного слоя. Поэтому понимание взаимодействия биотического и абиотического

компонентов в агрогенных хронорядх все еще неполное. Комплексных работ по оценке постагрогенной динамики лесных экосистем хвойно-широколиственной зоны в разных эдафических условиях все еще мало [8, 9, 106, 125, 163, 177], что не позволяет в полной мере охарактеризовать экосистемные изменения, наблюдаемые при естественном лесовосстановлении. По другим ландшафтам России и мира аналогичных по комплексности работ еще меньше. В 20-летнем хроноряду Внутренней Монголии (Китай) с пустынными и степными почвами запасы и содержание ПОВ, надземная и подземная фитомасса, α -разнообразие высших растений увеличились, а плотность сложения и содержание $N_{\text{общ}}$ уменьшились. Разнообразие почвенных бактерий возросло в аридных почвах, оставшись неизменным в степных [249].

Растительность. Состав, содержание, устойчивость и вертикальное распределение ПОВ напрямую зависят от растительного сообщества и опада [11, 115, 161, 191]. Например, лесная подстилка под елью европейской связывает углерод значительно быстрее по сравнению с дубовыми насаждениями [236]. В луговых и лесных экосистемах различаются механизмы формирования и трансформации ПОВ [190, 225], состав, структура и свойства которого, как сложной и неоднородной смеси компонентов растительного и микробного происхождения, зависят от наземной и почвенной биоты, климата и человека [194].

В естественных, дикорастущих или нативных условиях деревья выше, толще, имеют большую биомассу, продуктивность и устойчивость к воздействию негативных факторов среды по сравнению с растениями в агроландшафте [197]. Возраст древостоя бореальных лесов играет важнейшую роль в общем запасе ПОВ и характеристиках лесной подстилки [178, 222]. Относительно агропочв в лесных хуже агрохимические свойства и ниже содержание элементов питания. От почв молодого леса к средневозрастному соотношение C/N увеличивается, что отражает увеличение поступления ОВ и уменьшение скорости его минерализации [27]. Подстилки под дубовыми и еловыми лесами начинают накапливать углерод только в лесах старше 8 лет [235]. Концентрация углерода в верхних 5 см почвы прямо пропорциональна возрасту насаждения [229]. Состав лесной подстилки и большое количество корней в поверхностных горизонтах приводят к изменению свойств почвы, особенно pH, содержания углерода и биохимической активности [44, 117].

В ходе постагрогенной сукцессии меняется качественный и количественный состав растительного опада [7, 39, 86]: при смене луговой растительности лесной преимущественно подземный опад тонких корней замещается более грубым надземным с меньшей зольностью и содержанием Са и

Mg [10]. Кроме того, в Нечерноземье этот процесс сопровождается увеличением доли опада древесных видов, относимых к гумидокатным (по [3]) растениям, более склонным к извлечению из почвы катионогенных элементов, и снижается доля ариданитных, специализирующихся на поглощении элементов, мигрирующих в анионной форме, так как среди травянистых растений (особенно сорных и рудеральных на начальных стадиях сукцессии) весом вклад представителей Амарантовых (в том числе из подсемейства Маревых) и полыней. От типа растительной ассоциации зависит состав поступающего в почву лигнина и, соответственно, ароматической компоненты ПОВ: в хвойных лесах доминируют ванилиновые фенолы, в почвах лиственных лесов близка доля ванилинов и сирингидов, в степях преобладают феруловые фенолы, а в луговых сообществах – циннамиловые структуры. Структура гуминовых кислот напрямую зависит от филогенетического происхождения лигнина [39].

В постагрогенных почвах Центральной Польши под березняками самые высокие концентрации щелочных и щелочноземельных металлов (Na, K, Ca и Mg) наблюдались в молодых насаждениях. С увеличением возраста березняков содержание Cu, Zn, Fe, Pb, Ni и Cr увеличивалось, вероятно, за счет накопления этих катионогенных элементов в надземной и подземной биомассе [148]. Анализ филогенетического и функционального разнообразия растительности в контексте накопления целевых групп веществ успешно применяется для поиска растений-гипераккумуляторов тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) [206], а также выявления более и менее успешных клад при изменении условий среды в ходе первичных [171] и вторичных [215] сукцессий. Однако в контексте связей состава растительности и меняющегося ПОВ такие работы крайне немногочисленны [39].

Почвенная биота прямо и опосредованно влияет на множество процессов, в том числе разложение ОВ и циркуляцию питательных элементов. Почвенные беспозвоночные преобразуют растительные остатки в тесной взаимосвязи с микроорганизмами. Именно через зоомикробные взаимодействия растительный опад превращается в ПОВ [17, 97, 252].

Крупные почвенные сапрофаги, в том числе дождевые черви, выделяемые среди других почвенных беспозвоночных как группа “экосистемных инженеров” за счет высокой преобразующей среды деятельности [182], измельчают, перемешивают, перемещают и затем переваривают растительный опад совместно с микроорганизмами. От разнообразия групп почвенной макрофауны зависит функциональное состояние микробного сообщества [152, 241]. Физиологическая активность микроорганизмов значительно усиливается после прохождения через кишечный тракт дождевых

червей — группы сапрофагов, доминирующей по биомассе в залежных почвах [17, 92].

Почвенная макрофауна. В ходе постагрогенной сукцессии кардинально меняется набор групп почвенной макрофауны в связи с постоянным укрупнением растительного опада и прекращением вспашки. На начальных этапах в залежных землях среди дождевых червей доминируют эндогеи виды [20, 202]. Формирование устойчивого горизонта подстилки за счет опада древесной, кустарниковой и травянистой растительности благоприятствует эпигейной (подстилочной) и эпи-эндогеиной (почвенно-подстилочной) группам сапрофагов [21, 92], прекращение турбации почвы при распашке — восстановлению норных червей, обитающих в многолетних ходах [21] и значимо влияющих в том числе на микробиом почвы [88]. В постагрогенных хронорядях восстановления сосняков, ельников и хвойно-широколиственных лесов Смоленского Поозерья контрастность изменений состава почвенной макрофауны уменьшалась от песчаных к супесчаным альфегумусовым почвам (Arenosols и Podzols) и суглинистым дерново-подзолистым (Retisols) за счет различий в контрастности смены условий среды в почвах с меньшей и большей буферной способностью соответственно [92, 106] (<https://rscf.ru/project/21-74-20171/>). Это вписывается в концепцию [55] о существовании на Восточно-Европейской равнине всего двух хроносерию постагрогенных лесных ландшафтов — еловой на легких породах и дубовой на более тяжелых.

Дождевые черви выступают в качестве предиктора содержания С и N за счет гумификации и биотурбации [54], так как потребляют ОВ с широким соотношением C/N, преобразуя его в ОВ с узким C/N [180], внося вклад в почвенное дыхание, усиливая гумификацию и снижая минерализацию [185], что создает “углеродные ловушки” [253]. Органическое вещество микроагрегатов, оформленных в водоустойчивые копрогенные макроагрегаты, защищено от минерализации микробиотой и может составлять до 22% общего пула углерода [120]. Исключение дождевых червей снижает накопление ПОВ в верхнем 0–40 см слое почвы до 75%, что связано с уменьшением доли копрогенных агрегатов [121].

Почвенная микробиота, выполняющая системобразующие функции в преобразовании ОВ и стимулирующая рост и защитную роль растений [112, 113, 132, 214, 233], — очень чувствительный индикатор состояния экосистемы [230]. Традиционно основным источником ПОВ считают опад растительности и ее корневые выделения [184]. Однако недавние исследования указывают на заметный вклад микроорганизмов, использующих растительный опад для синтеза собственной биомассы, которая после их отмирания накапливается [123, 242],

давая от 10% ОВ в криогенных почвах до 70% в почвах умеренных широт [124, 134, 188] и даже более в супрагличальных системах [60] с высокой вариативностью вклада прокариотической и грибной компоненты [65, 66]. Доля микробного ОВ зависит от скорости минерализации растительных остатков, степени увлажнения, минерального состава почвы и содержания (гидр)оксидов металлов [205, 243, 240, 255]. Высокое содержание углерода, ограничение количества питательных веществ и значительная доля медленно разлагаемых целлюлозы и лигнина — важные факторы накопления мортмассы при ингибировании микробной активности [245].

Количество микробного углерода отражает трансформацию и деградацию почв [218] и весьма чувствительно к смене растительности [119]. Однако состав почвенного микробиома и его метаболические возможности ранее не рассматривали в контексте синтеза и разрушения конкретных групп ОВ старопашотного горизонта. Почвенно-метаболомный анализ чаще используют для выявления семейств-маркеров и более крупных таксонов бактерий и архей, индицирующих внесение удобрений, известкование, иных особенностей залежных земель [63, 109, 140, 149, 162, 221, 238], интегральной характеристики постагрогенной трансформации микробиома [110, 254].

В лесных экосистемах состав почвенного микробиоценоза зависит от породного состава древостоя и содержания физической глины [211]. Даже при традиционной и органической системах земледелия относительно близлежащих условно коренных лесов уменьшается численность почвенных архей. При выращивании зерновых увеличивается количество *Proteobacteria* (преимущественно представители *Pseudomonas*), в то время как *Acidobacteria* обнаруживают исключительно в лесных почвах [199]. Фиксация N₂ почвенными микроорганизмами снижается при систематическом механическом воздействии, а фотосинтез и фиксация углерода увеличиваются при увлажнении [228].

На поздних стадиях лесовосстановления кислые органические горизонты почв хвойных лесов благоприятствуют активности и обилию почвенных грибов, участвующих в минерализации опада [133]. Открытие широкой распространенности микробного продуцирования супероксида (O₂^{*} — слабый окислитель) в почвах [139] изменило представление о метаболических возможностях микробиоты. Грибы [130, 247] и бактерии (особенно представители *Symbiobacterium*, *Geobacter*, *Azospirillum*) способны продуцировать супероксид и другие радикалы, которые после взаимодействия с минералами Fe производят высокоактивные окисляющие гидроксильные радикалы, запускающие *in situ* фентонподобные реакции [142, 247] и образование неселективных, сильно окисляющих гидроксильных радикалов, меняющих круговорот почвенного

углерода [169, 247, 141]. Добавление растительных остатков может дополнительно усилить небиологический катализ и стимулировать эмиссию парниковых газов [142]. Следовательно, трансформация микробиома почвы и продуцируемый им активный О может быть важным фактором, влияющим на цикл углерода [155, 237]. Однако пока отсутствуют детальные исследования связи между (минеральным и биологическим) катализом и круговоротом углерода в почве.

Свойства почв. В умеренном поясе увлажнение является важным фактором, регулирующим накопление ПОВ [77, 117] через влияние на состав древостоя и формирующихся растительных остатков: микробные сообщества листовного опада активнее относительно хвойного [156, 234]. Замедление деструкции в заболоченных позициях повышает содержание стабильных трудноокисляемых форм и всего ОВ [146]. На примере республики Карелии показано, что неучет повышенного накопления ПОВ в органогенных горизонтах полугидроморфных почв занижает запасы углерода на 10–40% [102]. Гумификация лесной подстилки – важнейшее звено в круговороте углерода в лесных и заболоченных экосистемах [127, 186]. Она тесно связана не только с составом опада, но и микробиологической активностью почвы, гранулометрическим составом, кислотностью, катионообменной способностью, содержанием ОВ и элементов питания [174].

По завершении антропогенных вмешательств химический состав постагрогенных почв меняется в тесной связи с сукцессионными изменениями консорциума почвенной биоты и наземной растительности. Так, после прекращения чрезмерного внесения извести и ухудшения дренажа кислородные условия с нейтральной или карбонатной средой могут смениться на кислые глеевые, т.е. поменяется класс геохимического ландшафта с Ca^{2+} на Ca^{2+} - H^+ -класс или H^+ - Fe^{2+} -класс. Такая трансформация условий среды, несомненно, сказывается и на устойчивости ПОВ, так как меняется не только кислотность, но и состав катионов почвенно-поглощающего комплекса. Высокая кислотность вместе с низким содержанием N в детритной (грубой) фракции гумуса [223], накапливающейся в основном в верхней части старопахотного горизонта [23, 24], воздействует на деятельность микроорганизмов, усиливая минерализацию ОВ, несмотря на его большее поступление с опадом [111, 167].

На основе анализа почв с различным соотношением микроэлементов показана высокая роль Са, Mg и Mn в регуляции структуры и функционировании почвенного микробиоценоза [220]. Ризосферные микроорганизмы могут существенно повысить биодоступность элементов. Почвенные минералы и многовалентные оксиды металлов защищают ПОВ от микробного разложения посредством

адсорбции, соосаждения и связывания [168, 213, 250]. В гумидных ландшафтах содержание ПОВ, связанного с минералами Fe, может достигать 70%, не превышая 6% в аридных почвах [173]. Углерод лигнина может преимущественно связываться с Fe [139, 158]. Следовательно (гидр)оксиды этого металла, типоморфного для гумидных ландшафтов Нечерноземья, играют важную роль в ограничении разложения растительного опада или лигнина в почве [39]. Помимо защиты посредством образования комплексов [94], (гидр)оксиды Fe во влажных тропических и субтропических лесных почвах могут катализировать начало фентоноподобных реакций разложения ПОВ [126, 142, 155]. В отличие от поливалентных Fe и Mn, Са физически и химически защищает ПОВ [209, 217, 239]. Однако повышенная активность Са способна стимулировать рост грибов, разлагающих лигнин, т.е. снижать запасы ПОВ [189].

Так как растения поглощают элементы только из почвенных растворов [116, 212], то в условиях промывного водного режима возвращение элементов на поверхность почв с опадом возможно лишь при существенном количестве биодоступных соединений [114, 227], поэтому в контексте ненарушенных экосистем современные исследования поведения ТММ все чаще фокусируются на подвижных соединениях ТММ [147, 216]. Однако радиальную и латеральную дифференциацию ТММ в почвах интерпретируют на основе условий миграции и базовых химических характеристик: кислотности, содержания обменных оснований, гумуса и разнообразных гранулометрических фракций, минеральных фаз-носителей, а сами ТММ редко рассматривают в качестве предикторов протекающих в почве процессов трансформации ОВ.

ПОСТАГРОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СВОЙСТВАХ ПОЧВ

В современной классификации почв России [68, 105] дано определение реградированного и постагрогенного признака, но неясно, как рассматривать постагрогенную почвенную толщу с новообразованной системой горизонтов [101]. При этом стоит отметить, что актуальные российские подходы в сравнении с другими международными и национальными классификациями в наиболее полной мере позволяют принять во внимание наблюдаемые реградационные изменения в постагрогенных почвах [92].

Поскольку 2/3 залежных земель России расположено в лесной зоне [55, 64], основные исследования постагрогенных изменений свойств почв связаны с нечерноземными регионами (табл. 1, S1). В южной тайге изучено много постагрогенных экосистем методом хронорядов. В средней тайге количество подобных работ меньше за

Таблица 1. Показатели, контролируемые в хронорядках постагрогенных экосистем Евразии

Почвы	Регион	Повторность на стадии	Длина хроноряда, лет	Показатели	Источник
Глееземы (Cambisol)	Воркутинский район, Республика Коми	1	14	Раст, рН _в , рН _{КС} , рН _г , Ме, С _{общ} , N _{общ} , Р _{ав} , Кав, численность бактерий и спор грибов, длина грибного мицелия, эколого-трофические группы микроорганизмов, МА	[40, 41]
Подзолистые (Albic Retisols/Luvisols)	Республика Коми	1	85	рН _в , рН _{КС} , рН _г , Ме, С _{общ} , С _{вв} , N _{общ} , N _{вв} , С _{хр} , С _{dens}	[28, 145]
Двуученные	Гатчинский район, Ленинградская область	1	?	рН _в , С _{орг} , С _{ГК} , С _{ФК}	[31]
		1–6	85	рН _{КС} , С _{орг} , Р _{ав}	[26, 135]
Дерново-подзолистые (Albic Retisols/Luvisols)	Центрально-Лесной заповедник, Тверская область	1	170	Микроморфология (структура, органогенные и Fe образования, копролиты, пористость), цвет	[83]
	Боровский район, Калужская область	1–3	120	рН _в , рН _{КС} , С _{орг} , N _{общ} , С _{dens}	[5, 85]
		15–25	50	рН _в , С _{орг} , Ме, Fe _{ав} , Р _{ав} , Кав, влажность	[7]
	Малинское лесничество, Московская область	2	200	Ме, С _{орг} , рН _в	[107]
	Зеленоградский опорный пункт, Московская область	3–9	250–300	С _{орг} , ГС, спектральная отражательная способность горизонтов, рН _{КС} , рН _г , плотность	[84]
Новгородская область	Нагорский район, Кировская область	1–2	180	Раст, ГС, С _{орг} , рН _в , рН _{КС} , рН _г , Ме, ЕКО, Fe _{ох} , Fe _d , Alo _х , N _{общ} , Р _{общ} , Кав	[55]
	Валдайский район, Новгородская область	1	200	Раст, ГС, С _{орг} , рН _в , рН _{КС} , рН _г , Ме, ЕКО, Fe _{ох} , Fe _d , Alo _х , N _{общ} , Р _{общ} , Кав, карбонаты	[55, 164]
	Парфеньевский район, Костромская область	1	100	С _{орг} -вв, С _{dens}	[33]
	Смоленское Поозерье, Смоленская область	3–5	400	Раст, окраска, структура, граница и признаки оподзоливания в горизонте А, состав почвенной макрофауны, С _{орг} , мощность горизонтов О и А, С _{общ} , N _{общ} , Р _{ав} , Кав, Ме, плотность	(a)
Республика Удмуртия		3	40	Раст, продуктивность травянистой растительности, рН _{КС} , рН _г , ЕКО, С _{орг} , Ме, АС	[48]

Почвы	Регион	Повторность на стадию	Длина хроноряда, лет	Показатели	Источник
Дерново-подзолистые и подзолы (Arenosols, Podzols, Retisols)	Мантуровский район, Ко- стромская область	1	100	$C_{орг}$, $N_{общ}$, pH_{KCl}	[8, 9, 91]
	Смоленское Поозерье, Смо- ленская область	4–18	66	pH_v , $ЕС_{вв}$, ОВП	[32]
Дерново-подзолистые (Al- bic Retisols/Luvisols) и дер- ново-подбуры (Arenosols, Podzols)	Тункинская котловина, Ре- спублика Бурятия	1	150	АС, pH_v , $C_{орг}$, $N_{общ}$, $C_{ГК}$, $C_{ФК}$	[103]
	Картаполье, Архангельская область	1	140	$C_{орг}$, pH_v , pH_{KCl} , pH_g , Me , EKO , $N_{общ}$, $P_{общ}$, $K_{ав}$	[55]
Brunic Arenosols	Валдайский район, Новго- родская область	1	170		
	Мантуровский район, Ко- стромская область	1	100	$C_{орг}$, $N_{общ}$, $N_{орг}$	[47, 89, 90, 91]
	Смоленское Поозерье, Смо- ленская область	3	100	$C_{общ}$, $N_{общ}$, $P_{ав}$, $K_{ав}$, Me , плотность	[92, 106, (a)]
	Центральная Польша	?	40	Пулы углерода, фракционный, элементный и качественный состав ОВ	[161]
Дерново-подзолистые, подзолы и глееземы	Латвия	1	20	Раст, pH_v , $C_{орг}$, $N_{общ}$, $P_{общ}$, Me , $ГС$	[210]
	Палкинский район, Псковская область	1–2	130	Раст, $ГС$, $C_{орг}$, pH_v , pH_{KCl} , pH_g , Me , EKO , $Feox$, Fed , $Alox$, $K_{ав}$, $C_{ГК}$, $C_{ФК}$, карбонаты	[55]
Серые лесные (Luvisols, Retisols)	Серпуховский район, Мо- сковская область; Борисов- ский район, Белгородская область	1	65 и 40	Раст, $C_{орг}$, $N_{орг}$, обогатенность гумуса N , pH_{KCl}	[8, 9, 89, 91]
	Ясногорский район, Туль- ская область	1	9	$C_{орг}$, pH_v , pH_{KCl} , pH_g , Me , $P_{ав}$, $K_{ав}$, плотность, влажность, АС, объем и масса корней, поч- венное дыхание	[46]
	Орловская область	1–2	100	Раст, $ГС$, $C_{орг}$, pH_v , pH_{KCl} , Me , EKO , $Feox$, Fed , $Alox$, $K_{ав}$, $C_{ГК}$, $C_{ФК}$, плотность	[55]
	Заказник «Лес на Ворскле», Белгородская область	1	45	$C_{орг}$, $C_{общ}$, $N_{общ}$, C_{dens}	[67]

Продолжение табл. 1

Почвы	Регион	Повторность на стадии	Длина хронорядов, лет	Показатели	Источник
	Север лесостепи Западной Сибири	?	40	ГС, $C_{\text{общ}}$, $C_{\text{ГК}}$, $C_{\text{ФК}}$, $N_{\text{общ}}$, $P_{\text{ав}}$, $K_{\text{ав}}$, NO_3^-	[35]
	Емельяновский, Козульский и Большемуртинский районы; Красноярский край	1	10	$C_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$, рНв, рНГ, рН _{KCl} , Ме, NH_4^+ , NO_3^- , $P_{\text{ав}}$, $K_{\text{ав}}$	[93]
	Заларинский район, Иркутская область	3	110	Раст, $C_{\text{ГК}}$, $C_{\text{ФК}}$, $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$, рНв, рН _{KCl} , плотность	[34]
Подбелы (Gleyic Cambisols)	Уссурийский городской округ, Приморский край	1–3	60	АС, $C_{\text{орг}}$, $C_{\text{ГК}}$, $C_{\text{ФК}}$, ФА	[71, 122]
Черноземы промывные (Calcisols/Chernozems)	Тугуйская котловина, Республика Бурятия	1	20	$C_{\text{орг}}$, рН, ЕКО, Ме, ГС	[104]
Черноземы оподзоленные (Calcisols/Chernozems/Phaeozems)	Искитимский район, Новосибирская область	1–3	30	$C_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$, $K_{\text{ав}}$, $P_{\text{ав}}$, ФА, NO_3^-	[108]
Черноземы выщелоченные (Calcisols/Chernozems/Phaeozems)	Искитимский район, Новосибирская область	1	10	Раст, надземная фитомасса, $C_{\text{орг}}$, $C_{\text{общ}}$, $C_{\text{орг}}$, $C_{\text{вв}}$, ГС, АС	[176]
Черноземы выщелоченные, типичные и обыкновенные (Calcisols/Chernozems/Phaeozems)	Ровенский, Белгородская область	1–5	77	$C_{\text{орг}}$, $C_{\text{орг}}$ лабильный, рНв, рН _{KCl} , $K_{\text{ав}}$, $P_{\text{ав}}$, $N_{\text{ав}}$, $N_{\text{общ}}$, ЕКО	[56]
	Ракитянский район, Белгородская область	1–5	75	$C_{\text{орг}}$, $C_{\text{орг}}$ лабильный, рНв, рН _{KCl} , $K_{\text{ав}}$, $P_{\text{ав}}$, $N_{\text{ав}}$, $N_{\text{общ}}$, ЕКО	[56]
Черноземы типичные (Calcisols/Chernozems/Phaeozems)	Медвенский район, Курская область	1–3	58	Раст, ГС, $C_{\text{орг}}$, рНв, рН _{KCl} , Ме, ЕКО, Feох, Fed, Alox, $P_{\text{общ}}$, $P_{\text{ав}}$, $K_{\text{ав}}$, $K_{\text{общ}}$, $C_{\text{ГК}}$, $C_{\text{ФК}}$, карбонаты, плотность	[55]
	Курская биосферная станция ИГ РАН, Курская область	1	50	Мезо- и микроморфология, $C_{\text{орг}}$, рНв, ГС, карбонаты	[15]
	Заповедник «Стрелецкая степь», Курская область	1	60	$C_{\text{орг}}$, $C_{\text{общ}}$, $N_{\text{общ}}$, C_{dens}	[67]
Черноземы обыкновенные (Calcisols/Chernozems/Phaeozems)	Агробиостанция ЮФУ, Ростовская область	1	81	Раст, $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{орг}}$, $C_{\text{микробный}}$, почвенное дыхание	[8, 9, 53]
	Степь Приазовская, Ростовская область	(4–6)?	83	Раст, твердость, рНв, ФА, $C_{\text{орг}}$, влажность, плотность	[1, 62]

Окончание табл. 1

Почвы	Регион	Повторность на стадию	Длина хроноряда, лет	Показатели	Источник
Черноземы обыкновенные и южные (Calcisols/Chetnozems/ Phaeozems)	Укрепление Подкумское-3, Малокарачаевский район, Карачаево-Черкесская Ре- спублика	?	$n \times 10^2 - 10^3$	pH, ФА, $C_{орг}$, NH_4^+ , NO_3^- , P _{ав} , P	[129]
Черноземы южные (Cal- cisol/Chetnozems/Phae- ozems)	Беляевский район, Орен- бургская область	?	16	АС, плотность, пористость, влагоемкость, $C_{орг}$ нитраты, P _{ав} , K _{ав} , Nav, ЕКО	[49]
н.д.	Токай – Хедьяля (Токай Wine Region), Венгрия	2	200	pH, $C_{орг}$, $C_{общ}$, $N_{общ}$, P _{общ} , карбонаты	[226]
Каштановые промытые (Kastapozems)	Тугуйская котловина, Ре- спублика Бурятия	1	20	$C_{орг}$ pH, ЕКО, Me, ГС	[104]
Светло-каштановые, орошаемые в прошлом (Kastapozems)	Черноярский район, Астра- ханская область	1	10	Раст, ГС, $C_{орг}$, pH, Me, ЕКО, карбонаты, лег- корастворимые соли	[55]
Светло-каштановые (Kastapozems)			30	Раст, ГС, $C_{орг}$, pH, pH_{KCl} , Me, ЕКО, $N_{общ}$, P _{общ} , K _{ав} , карбонаты, легкорастворимые соли, влажность	
Солонцы (Solonetz)			40	$C_{орг}$ pH, $N_{общ}$, NH_4^+ , NO_3^- ,	[187]
Calcisols	Центр Лёссового плато, Ки- тай	1	150	Микробиом (бактерии, грибы), pH, влаж- ность, плотность, ГС, $C_{орг}$, $N_{общ}$, P _{общ} , NH_4^+ , NO_3^-	[207]
Степные и пустынные	Внутренняя Монголия, Ки- тай	н.д.	н.д.	Раст, надземная и подземная биомасса, водозпасы, $C_{орг}$, $N_{общ}$, плотность сложения	[249]
Бурые аридные песчаные (Gypsisols)	Енотаевский район, Астра- ханская область	1	50	Раст, ГС, $C_{орг}$ pH, pH_{KCl} , Me, ЕКО, $N_{общ}$, P _{общ} , P _{ав} , K _{ав} , карбонаты, легкорастворимые соли, влажность	[55]
Желто-бурые	Провинция Дзянсу, Китай	3	65	Particulate $C_{орг}$ легкая фракция $C_{орг}$ ТОС, $C_{орг}$ вв, P _{ав} , K _{ав} , NH_4^+	[137]

Примечание. Без работ по чисто углеродной тематике. Показатели: АС – агрегатный состав, вв – водорастворимые соединения, ГК – гумусовые кислоты, ГС – гранулометрический состав, ЕКО – емкость катионного обмена, МА – микробиологическая активность почв, $N_{общ}$ – общее содержание, ОВП – окислительно-восстановительный потенциал, ППК – почвенно-поглощающий комплекс, Раст – видовой состав растительности, ФА – ферментативная активность, ФК – фульвокислоты, ав – доступные соединения, Sdens – денситметрические фракции ОВ, $C_{орг}$ – органическое вещество, Схр – хроматографические фракции ОВ, d – дитионитрастворимые соединения в вытяжке Мера-Джексона, ЕС – электропроводность, Me – обменные основания (Ca^{2+} , Mg^{2+} , в отдельных публикациях – Al^{3+} и Na^+), ox – оксалаторастворимые соединения в вытяжке Тамма, pH – гидротическая кислотность, pH_{KCl} – обменная кислотность.
Н.д. – нет данных. ИГ РАН – Институт географии РАН. ЮФУ – Южный федеральный университет. (a) – <https://rscf.ru/project/21-74-2017/>.

счет преимущественного исследования почв полерубочных экосистем [13, 29, 52, 143, 144]. В результате в контексте постагрогенной реградаци наиболее изучены (дерново-)подзолистые почвы европейской части России при единичных работах в азиатской части страны. Несколько меньше исследованы постагрогенные черноземы. Зато по ним шире географический охват. Существенно меньше подобного рода работ по почвам в зоне распространения широколиственных лесов [8, 9, 22, 34, 35, 46, 55, 67, 91]. Единичны исследования постагрогенных почв в тундре [40, 41, 72, 109], которые по понятным причинам реже вовлекались в сельскохозяйственный оборот. Отсутствуют данные по заброшенным почвам вулканических регионов Камчатки и Курильских островов. Очень слабо исследованы постагрогенные хроносери гидроморфных [57, 58, 192] и полугидроморфных почв [55, 40, 71, 122], что не позволяет в должной мере оценить вклад степени увлажнения в скорость реградационных изменений почв. При этом в абсолютном большинстве работ отсутствует истинная биологическая или географическая повторность (по [43, 80, 87, 159]) для одной и той же стадии, т.е. опробование компонентов экосистем на разных площадках, разнесенных между собой на расстояние как минимум в сотни метров и находящихся в разных геоботанических выделах. Кроме того, в фокусе один или, в лучшем случае, два компонента экосистемы. Чаще всего объектом исследований является почва и растительность, а почвенному микробиому (археям, бактериям и грибам), микро-, мезо- и макрофауне не уделяют достаточно внимания. Отдельно стоит отметить исследование 11 хроносери на 9 ключевых участках (постагрогенные экосистемы возрастом до 200 лет от средней тайги до полупустынь на Восточно-Европейской равнине) [55], позволившее обозначить в лесных ландшафтах два типа сукцессии: еловую, разделяемую на два подтипа в соответствии с гранулометрическим составом пород, и дубовую. В целом временной интервал, охватываемый хронорядами, снижается в несколько раз от почв гумидных ландшафтов к аридным.

Помимо содержания и запасов ПОВ, в постагрогенных хронорядах почв подробно изучено изменение агрохимических показателей: кислотности, содержания обменных оснований, элементов питания (N, P, K) и форм Fe. Считается, что в пределах одной ландшафтной зоны от хроносери с наиболее бедным субстратом к более богатым снижается степень изменения кислотности, содержания и запасов ПОВ, его обогащенность N [55, 91], а наиболее контрастные изменения проявляются в самой верхней части некогда распаиваемого горизонта. В ряду постагрогенных песчаных и супесчаных почв тайги и подтайги — суглинистых почв тайги и подтайги — суглинистых почв

лесостепи и степи этот тренд четко прослеживается (табл. 2). В хронорядах песчаных почв тайги и подтайги России значения pH снижаются при естественном лесовосстановлении. В суглинистых почвах указанного региона данная закономерность прослеживается слабее, а в лесостепных и степных почвах величина pH оказывается достаточно консервативным показателем. Распределение содержания ПОВ и N схоже в постагрогенных хронорядах: в песчаных почвах тайги и подтайги в равной мере отмечают как уменьшение, так и увеличение содержания обоих элементов. В суглинистых почвах этого региона, а также в темногумусовом горизонте почв лесостепи и степи чаще отмечают повышение содержания или отсутствие значимых изменений в ходе постагрогенной реградаци. Вероятно, за счет прекращения внесения минеральных удобрений и активного выноса в условиях промывного водного режима содержание подвижного K, как правило, снижается в песчаных и суглинистых почвах тайги и подтайги. По почвам с темногумусовым горизонтом данных пока недостаточно. Снижение содержания подвижного P и обменных оснований выражено слабее даже в песчаных почвах. В суглинистых почвах чаще обнаруживается отсутствие изменений.

ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ХОДЕ ПОСТАГРОГЕННОЙ РЕГРАДАЦИИ СТАРОПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА

Прогресс в методах анализа ОВ дает больше возможностей и для исследования ПОВ [39, 98], что позволило углубить представление о трансформации состава ПОВ при смене вариантов землепользования. В контексте постагрогенных реградационных изменений почв пока выполнены лишь пилотные оценки трансформации состава ОВ.

Агрогумусовый горизонт почв Нечерноземья. В ряду постагрогенных почв Коми (до 85 лет в залежном состоянии) ход распределения экстрагируемого ОВ совпадал с трендом, характерным для общего углерода ($C_{\text{общ}}$): содержание гидрофильных соединений ПОВ выше в почвах старовозрастных лесов финальных стадий восстановления. В почвах свежих залежей минимально содержание C и N в тяжелой денситметрической фракции с плотностью $>1.6 \text{ г/см}^3$ и в легкой фракции окклюдируемого ОВ [28, 145]. В молекулярной структуре гуминовых кислот пахотного горизонта разновозрастных (до 90 лет) залежей Новгородской области уменьшалась ароматичность и увеличивалась алифатичность [38].

В агродерново-подзолистой реградированной почве Московской области (22 года в залежном состоянии) достоверно увеличились содержание и запасы $C_{\text{общ}}$ по сравнению с пахотным аналогом

Таблица 2. Тренды изменений свойств верхней части старопашотного горизонта в хронорядах длительностью от 40 лет

Горизонт	Регион	pH	C _{орг}	N _{общ}	P _{ав}	K _{ав}	Me	Длина хроноряда, лет	Источник
Yп	Архангельская область	↘	↘	↘	↘	↑	↑	140	[55]
	Костромская область	↘	↗	↗				100	[8, 9, 91]
	Костромская область	↘	↗	↗	↑	↑		100	[47, 89, 90, 91]
	Новгородская область	↘	↗	↑	↘	?	↘	170	[55, 164]
	Республика Коми	↑	↑	↗			↑	85	[28, 30, 145]
	Смоленская область	↘	↘	↘	↘	↘	↘	100	[92, 106, (a)]
	Смоленская область	↗	↘	↘	↘	↘		100	(a)
	Смоленская область	↘						66	[32]
Yс	Белгородская область	↘	↑	↑				40	[91]
	Калужская область	↘?	↑		↑	↑	↘?	50	[7]
	Кировская область	↘	↑	↑	↘	↘	↘	65	[55]
	Московская область	↑	↗				↑	200	[107]
	Московская область	?	↗					250–300	[84]
	Московская область	↑	↗	↗				65	[8, 9, 89, 91]
	Провинция Дзянсу, Китай	↑		↗	↗	↗		65	[137]
	Псковская область	↑	↑		↘	↘	↑	130	[55]
	Республика Бурятия	↑	↑	↑				150	[103]
	Смоленская область	↘	↗	↑	↘	↑	↑	400	(a)
	Смоленская область	↑						66	[32]
	Тверская область	↗	↗	↗					[5]
	Удмуртия	↘	↗				↘	↗	[48]
	Ус		↗	↗				↗	[67]
Uс	Белгородская область	↑	↑	↑	↑	↑		77	[56]
	Белгородская область	↑	↑	↑	↗	↑		75	[56]
	Иркутская область	↑	↗	↗				110	[34]
	Курская область	↑	↑		↑	↑	↘?	58	[55]
	Курская область	↑	↑					50	[15]
	Курская область		↗	↗				60	[67]
	Орловская область	↑	↗?		↘	↑	↑	100	[55]
	Приморский край		↗					60	[71, 122]
	Ростовская область	↑	↗	↗				81	[8, 9, 53]
	Ростовская область	↘	↑					83	[1, 62]
	н.д.		↗	↗	↘			200	[226]
	Яп	↘	↗	↗	↑	↑	↑	50	[55]

Примечание. Восстанавливающийся гумусовый горизонт: Y – серогумусовый, U – темногумусовый, J – светлогумусовый, п – песчаный и супесчаный, с – суглинистый. н.д. – нет данных. ↑ – без монотонных трендов, ↗ – возрастает, ↘ – снижается, ? – возможно отсутствие значимых трендов, так как данных недостаточно. (a) – <https://rscf.ru/project/21-74-20171/>.

преимущественно за счет легкоразлагаемых ОВ. Относительно пахотной, залежная почва содержала больше агрономически ценных (0.25–10 мм), водоустойчивых и крупных (>0.05 мм) агрегатов, водоэкстрагируемого ОВ из микроагрегатов, что обусловлено повышенным количеством поступающих растительных остатков и замедлением их минерализации по сравнению с пахотной почвой [14]. Сходные результаты (повышение содержания свободной и агрегированной фракции органических веществ) получены при сравнении четырех пар агродерново-подзолистых почв под пашней и лесом на Звенигородской биостанции и центре “Чашниково” МГУ им. М.В. Ломоносова, а также Зеленоградском стационаре Почвенного института им. В.В. Докучаева и биогеоценологической станции “Малинки” Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН [6].

В илистой фракции диаметром <1 мкм и мелкозем, не разделенном на гранулометрические фракции, дерново-подзолистых почв Центрально-Лесного заповедника увеличивалось содержание ПОВ в ходе постагрогенной сукцессии. В этом хроноряду длительностью 100 лет увеличилась степень пептизации коллоидных систем и уменьшился средний диаметр органо-глинистых комплексов [5].

Агротемногумусовый горизонт почв черноземных регионов. Реградация черноземов и темно-серых почв Белгородской и Курской областей сопровождалась увеличением содержания С и N во всех денситметрических фракциях. Наиболее разительные постагрогенные изменения в содержании ПОВ и N, а также углерода денситметрических фракций проявились в верхнем 0–5 см слое гумусового горизонта. В ходе постагрогенной сукцессии в почвах обоих хронорядов возросла доля свободной фракции ОВ с плотностью <1.6 г/см³ при постоянстве содержания окклюзированной фракции с плотностью <2.0 г/см³ [67]. Повышение доли близкой (<1.8 г/см³) денситметрической фракции ОВ отмечено и в постагрогенных степных почвах заповедника “Аркаим” [69]. На Лёссовом плато Китая под разновозрастными (до 42 лет) лесами в ходе восстановления леса из акации (*Robinia pseudoacacia*) и плосковеточника (*Platycladus orientalis*) в песчаной и пылеватой фракции гумусового горизонта Calcic Cambisols увеличилось содержание ОВ, извлекаемого Na₄P₂O₇ [150, 187].

Высокое содержание (3–4% от массы почвы) углерода фитолитовой фракции органического вещества с плотностью 1.8–2.0 г/см³ является отличительной чертой черноземов луговых степей [94] и целинных почв под осоково-злаковым разнотравьем. Связано это с обильным опадом злаков и подтверждается данными микроскопии. В распахиваемых выщелоченных и обыкновенных черноземах доля фитолитовой фракции органического

вещества <1.5% [42]. Снижение поступления растительных остатков и изменение их видового состава при распашке способствует выносу N легко-разлагаемых соединений органических остатков и гумусовых веществ илистой фракции [94].

От распахиваемых черноземов к залежным и степным возросло содержание метилфурфурола и N-содержащих ароматических соединений при отсутствии различий вклада фурфурола, ациклических и полисахаридных веществ [99]. В распахиваемых черноземах при деградации ПОВ обеднялся состав жирных кислот. Накопление ОВ способствовало увеличению разнообразия жирных кислот, что, вероятно, коррелирует с α-разнообразием произрастающей растительности, которое снижается в агроценозах за счет доминирования целевой культуры. По составу жирных кислот предложено классифицировать черноземы по преобладающим процессам трансформации ОВ. В качестве биомаркеров перехода типичного чернозема в залежное состояние предложено рассматривать присутствие эйкозапентаеновой кислоты, содержащейся в микроводорослях, и дигомогаммалинолевой, синтезируемой грибами рода *Mortierella* [95].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Региональные оценки баланса углерода значительно различаются из-за разнообразных природных и антропогенных факторов, поэтому важны комплексные исследования механизмов минерализации и гумификации ОВ. До сих пор отсутствует глубокое понимание механизмов естественной трансформации ОВ в ходе постагрогенной реградаций почв, что существенно затрудняет эффективную реализацию национальной политики углеродной нейтральности.

В абсолютном большинстве изученных постагрогенных хронорядов почв отсутствует истинная повторность для одной и той же стадии и изучается один или, в лучшем случае, два компонента экосистемы – почва и растительность. Временной интервал, охватываемый хронориями в классических почвенных исследованиях, снижается от почв гумидных ландшафтов к аридным с 200–300 лет до 80 лет в степных регионах и 50 – в пустынных. Почвенно-археологические исследования позволяют расширять данный интервал до тысяч лет. Очень слабо изучены постагрогенные хроносери тундры, гидроморфных и полугидроморфных почв, что не позволяет в должной мере оценить вклад степени увлажнения в скорость реградационных изменений почв. Больше работ посвящено почвам широколиственных лесов. Наиболее изучена постагрогенная дифференциация черноземов и особенно – текстурно-дифференцированных почв.

В пределах одной ландшафтной зоны от хроносери песчаных пахотных горизонтов к глинистым

снижается контрастность изменения кислотности, содержания и запасов ПОВ, обогащенности гумуса N. Этот тренд свойственен и ряду постагрогенных почв: песчаные и супесчаные тайги и подтайги — суглинистые тайги и подтайги — суглинистые почвы лесостепи и степи. В хронорядх песчаных почв тайги и подтайги значения величины pH, содержание подвижного K, в меньшей мере подвижного P и обменных оснований снижаются при естественном лесовосстановлении, отмечаются разнонаправленные тренды изменения содержания ПОВ и N. В суглинистых почвах этого же региона содержание подвижного K и, как правило, величина pH снижаются в ходе лесовосстановления, содержание ПОВ и N повышается или не меняется, подвижного P и обменных оснований остается неизменным. В лесостепных и степных почвах содержание ПОВ и N повышается или не меняется, величина pH остается неизменной.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор благодарен А.П. Гераськиной, П.Р. Енчилик, А.И. Кузнецовой, А.В. Титовец, Е.В. Тихоновой, В.А. Холодову и Г.-Х. Ю за обсуждение отдельных разделов данного обзора и помощь с подбором литературы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 21-74-20171.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X25010097>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаренко М.А., Казеев К.Ш., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение растительного покрова и биологических свойств черноземов в постагрогенный период // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1412–1422. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110039>

2. Азаренко Ю.А., Бефус М.В. Плодородие пахотных и залежных лугово-черноземных почв агроландшафтов южной лесостепи Омского Прииртышья // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2024. № 1(53). С. 5–15.
3. Айвазян А.Д., Касимов Н.С. О геохимической специализации растений (на примере Мугоджар) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1979. № 3. С. 42–47.
4. Анапин Б.Ф., Васильев А.М. Морфологические и физико-химические особенности залежных дерново-подзолистых почв на двучленных породах Новгородской области // Преобразование почв Нечерноземья при сельскохозяйственном освоении. М.: Почв. ин-т., 1981. С. 7–20.
5. Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Данченко Н.Н., Когут Б.М., Таллер Е.Б. Физико-химические характеристики органо-глинистых комплексов хроноряда дерново-подзолистых почв методами динамического светорассеяния и светорассеяния с анализом фаз // Почвоведение. 2020. № 4. С. 421–429. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040036>
6. Артемьева З.С., Рыжова И.М., Силева Т.М., Ерохова А.А. Стабилизация органического углерода в микроагрегатах дерново-подзолистых почв в зависимости от характера землепользования // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2013. № 3. С. 19–26.
7. Архипова М.В., Исаченкова Л.Б. Динамика почвенно-растительного покрова экосистемы сосново-еловых лесов (на примере юго-западного Подмосковья) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013. № 6. С. 491–501.
8. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Цветкова Ю.Д. Изменение агрегатного состава различных типов почв в ходе залежной сукцессии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В.Докучаева. 2017. Т. 88. С. 47–74.
9. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Телеснина В.М. Сравнительная оценка содержания углерода в постагрогенных почвах различных природно-климатических зон // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28. № 2. С. 27–39. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-2-27-39>
10. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 376 с.
11. Басова Е.В., Лукина Н.В., Кузнецова А.И., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Тихонова Е.В., Гераськина А.П., Браславская Т.Ю., Тебенькова Д.Н., Луговая Д.Л. Качество древесного опада как индикатор функциональной классификации лесов // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 3. С. 113.

12. Беляева Н.В., Данилов Д.А., Кази И.А. Особенности естественного возобновления ели европейской на постагрогенных землях // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 6–10.
13. Бобровский М.В. Лесные почвы Европейской России. Биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 395 с.
14. Борисов Б.А., Ефимов О.Е., Елисеева О.В. Органическое вещество и физические свойства постагрогенной эродированной дерново-подзолистой почвы в сравнении с пахотным аналогом // Почвоведение. 2022. № 7. С. 909–917.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070036>
15. Булышева А.М., Хохлова О.С., Бакунович Н.О., Русаков А.В., Мякишина Т.Н. Изменение свойств почв залежного ряда Курской области и тренды восстановления постагрогенных почв лесостепной и степной зон // Почвоведение. 2021. № 8. С. 983–998.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21080049>
16. Бурдуковский М.Л., Тимофеева Я.О., Голов В.И., Киселева И.В., Тимошинов Р.В. Динамика реакции почвенной среды, структурно-агрегатного состояния и запасов углерода агротемногумусовых подбелов в ходе постагрогенного развития // Почвоведение. 2022. № 12. С. 1505–1513.
17. Бызов Б.А. Зоомикробные взаимодействия в почве. М.: ГЕОС, 2005. 213 с.
18. Владыченский А.С., Телеснина В.М., Чалая Т.А. Влияние растительного опада на химические свойства и биологическую активность постагрогенных почв южной тайги // Почвоведение. 2012. № 1. С. 3–10.
19. Владыченский А.С., Телеснина В.М., Румянцева К.А., Чалая Т.А. Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги на примере Костромской области // Почвоведение. 2013. № 5. С. 518–529.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X1305016X>
20. Гераськина А.П. Население дождевых червей (Lumbricidae) на зарастающих полях // Зоологический журнал. 2009. Т. 88. № 8. С. 901–906.
21. Гераськина А.П. Экологическая оценка динамики комплекса дождевых червей (Lumbricidae) в ходе восстановительных сукцессий. Смоленск: Смоленский государственный медицинский университет, 2016. 148 с.
22. Гиниятуллин К.Г., Сахабиев И.А., Рязанов С.С., Смирнова Е.В., Тишин Д.В., Латыпова Л.И. Возможность использования зонирования залежной растительности по вегетационным индексам для оценки накопления органического вещества в постагрогенных почвах // Почвоведение. 2023. № 8. С. 970–980.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2360018X>
23. Гиниятуллин К.Г., Хузиева М.Р., Окунев Р.В., Смирнова Е.В. Текстульная дифференциация старопахотных горизонтов разновозрастных залежных светло-серых лесных почв // Ученые записки казанского университета. 2015. Т. 157. С. 67–76.
24. Гиниятуллин К.Г., Шинкарев А.А., Фазылова А.Г., Кузьмина К.И., Шинкарев А.А. (мл.) Пространственная неоднородность вторичной аккумуляции гумуса в старопахотных горизонтах залежных светло-серых лесных почв // Учен. Зап. Казан. Ун-та. Сер. Естеств. Науки. 2012. Т. 154. Кн. 4. С. 61–70.
25. Голубева Л.В., Наквасина Е.Н., Минин Н.С. Продуктивность и качество древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в постагрогенных насаждениях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 215. С. 19–29.
<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.19-29>
26. Данилов Д.А., Зайцев Д.А., Януш С.Ю., Яковлев А.А., Иванов А.А., Вайман А.А. Агрохимическое состояние постагрогенных почв на плакорной возвышенности юго-запада Ленинградской области // J. Agriculture Environment. 2022. № 8(28).
<https://doi.org/10.23649/jae.2022.28.8.011>
27. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Сидорова В.А., Туюнен А.В., Карпечко А.Ю., Геникова Н.В., Медведева М.В., Мамай А.В., Толстогозов О.В., Кулакова Л.М. Влияние типа землепользования на свойства почв и структуру экосистемных запасов углерода в среднетаежной подзоне Карелии // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1392–1406.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21110058>
28. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 318 с.
<https://doi.org/10.34756/GEOS.2020.10.37828>
29. Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Изменение органического вещества таежных почв в процессе естественного лесовозобновления растительности после рубок (средняя тайга республики Коми) // Почвоведение. 2014. № 1. С. 39–47.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14010043>
30. Дымов А.А., Михайлова Е.Н. Свойства лесных и постагрогенных почв, развивающихся на песчаных и суглинистых отложениях республики Коми // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2017. № 3 (31). С. 24–33.
31. Елькина Г.Я., Лаптева Е.М., Лиханова И.А., Холопов Ю.В. Трансформация органического вещества в постагрогенных почвах средней тайги // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2019. № 3(152). С. 100–107.
<https://doi.org/10.36305/2019-3-152-100-107>
32. Енчилик П.Р., Клинк Г.В., Пеунова А.А., Прилипова Е.С., Сергеева Е.А., Соболев Н.С., Семенов И.Н. Постагрогенная динамика pH, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала в почвах различного гранулометрического состава национального парка “Смоленское Поозерье” (Россия) // Вестник Томск. гос. ун-та. Биология. 2023. Т. 4. № 64. С. 6–29.
<https://doi.org/10.17223/19988591/64/1>

33. Ерохова А.А., Макаров М.И., Моргун Е.Г., Рыжова И.М. Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308–1314. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14110045>
34. Зорина С.Ю., Соколова Л.Г., Казановский С.Г., Дорофеев Н.В. Изменение состава растительности и свойств почв в ходе их постагрогенного развития в лесостепной зоне Прибайкалья // Siberian J. Life Scie. Agriculture. 2023. Т. 15. № 5. С. 74–96. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-5-927>
35. Игнатьев Л.А., Кленов Б.М., Артымук С.Ю. Почвенная и агрохимическая характеристика залежных старопахотных серых оподзоленных почв северной лесостепи Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2004. Т. 11. № 3. С. 419–424.
36. Исаченкова Л. Б., Герасимова М. И., Богданова М. Д., Терская Е. В. Отражение недавней истории землепользования в свойствах дерново-подзолистых почв Сатинской учебно-научной станции // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2019. № 6. С. 113–121.
37. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580–594. <https://doi.org/10.7868/80032180X17050070>
38. Кечайкина И.О., Рюмин А.Г., Чуков С.Н. Постагрогенная трансформация органического вещества дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1178–1192.
39. Ковалев И.В. Биохимия лигнина в почвах. Дис. ... докт. с.-х. наук. М., 2015. 447 с.
40. Ковалева В.А., Денева С.В., Виноградова Ю.А., Панюков А.Н., Лаптева Е.М. Влияние ландшафтных условий на функционирование микробных сообществ постагрогенных почв тундровой зоны // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 157–165. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-157-165>
41. Ковалева В.А., Денева С.В., Лаптева Е.М. Микробиологическая характеристика целинных и постагрогенных тундровых почв (на примере арктической зоны Республики Коми) // Тр. Карельского НЦ РАН. Сер. Экологические исследования. 2020. № 5. С. 5–16. <https://doi.org/10.17076/eco1162>
42. Козут Б.М., Травникова Л.С., Титова Н.А., Куваева Ю.В., Ярославцева Н.В. Влияние длительного применения удобрений на содержание органического вещества в легких и илистых фракциях черноземов // Агрохимия. 1998. № 5. С. 13–20.
43. Козлов М.В. Мнимые повторности (pseudoreplication) в экологических исследованиях: проблема, не замеченная российскими учеными // Журнал общей биологии. 2003. Т. 64. № 4. С. 292–307.
44. Кондратова А.В., Абрамова Е.Р. Особенности формирования тонких корней на различных стадиях восстановления постагрогенных экосистем в зоне южной тайги // Успехи современного естествознания. 2018. № 9. С. 18–22.
45. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
46. Кузнецова И.В., Тихонравова П.И., Бондарев А.Г. Изменение свойств залежных серых лесных почв // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1142–1150.
47. Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес де Гереню В.О., Личко В.И., Овсепян Л.А. Изменение запасов углерода, микробной и ферментативной активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2022. № 7. С. 825–842. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070073>
48. Леднев А.В., Дмитриев А.В. Современные почвообразовательные процессы в постагрогенных дерново-подзолистых почвах Удмуртской республики // Почвоведение. 2021. № 7. С. 884–896. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2107008X>
49. Ледовский Н.В., Абаимов В.Ф., Ходячих И.Н. Агрохимическая характеристика залежей степной зоны Южного Урала // Вестник Оренбургского гос. педаг. ун-та. Электронный научный журнал. 2012. № 3 (3). С. 32–35.
50. Литвинович А.В. Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв Северо-Запада Нечерноземной зоны // Агрохимия. 2009. № 7. С. 85–93.
51. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы на залежи // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1323–1329.
52. Лиханова Н.В., Бобкова К.С. Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников средней тайги Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 91–100. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-091-100>
53. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Ермолаев А.И., Кузяков Я.В. Изменение пулов органического углерода при самовосстановлении пахотных черноземов // Агрохимия. 2009. № 5. С. 5–12.
54. Лукина Н.В., Кузнецова А.И., Гераськина А.П., Смирнов В.Э., Иванова В.Н., Тебенькова Д.Н., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Тихонова Е.В. Неучтенные факторы, определяющие запасы углерода в лесных почвах // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 92–110. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-10-92-110>

55. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
56. Малышев А.В. Особенности воспроизводства почв на залежах в различных физико-географических условиях Белгородской области // Региональные геосистемы. 2021. Т. 45. № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2021-45-1-40-50>
57. Маслов А., Гульбе А., Гульбе Я., Медведева М., Сирин А. Оценка ситуации с зарастанием сельскохозяйственных земель лесной растительностью на примере Угличского района Ярославской области // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4. С. 6–14.
58. Маслов М.Н., Поздняков Л.А., Маслова О.А. Нитрификация в эутрофных торфяниках разного типа землепользования // Почвоведение. 2022. № 8. С. 1023–1034. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2208010X>
59. Матинян Н.Н., Бахматова К.А., Алексеев С.С. Постагрогенная трансформация почв, сформированных на контрастных по гранулометрическому составу породах // Гумус и почвообразование. СПб., Пушкин: СПбГАУ, 2007. С. 52–60.
60. Мергелов Н.С., Горячкин С.В., Зазовская Э.П., Карелин Д.В., Никитин Д.А., Кутузов С.С. Супрагляциальные почвы и почвоподобные тела: разнообразие, генезис, функционирование (обзор) // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1522–1561. <https://doi.org/10.1134/S1064229323602330>
61. Мошкина Е.В., Медведева М.В., Туунен А.В., Карпечко А.Ю., Геникова Н.В., Дубровина И.А., Мамай А.В., Сидорова В.А., Толстогозов О.В., Кулакова Л.М. Особенности естественного восстановления лесных экосистем на бывших сельскохозяйственных землях (на примере Южного агроклиматического района Карелии) // Биосфера. 2019. Т. 11. № 3. С. 134–145. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v11i3.506>
62. Мясникова М.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние возраста залежей на биологические свойства постагрогенных почв Ростовской области. Ростов-на-Дону: Южный федеральный ун-т, 2015. 129 с.
63. Налиухин А.Н., Хамитова С.М., Глинушкин А.П., Авдеев Ю.М., Снетилова В.С., Лактионов Ю.В., Суров В.В., Силуянова О.В., Белозеров Д.А. Изменение метагенома прокариотного сообщества как показатель плодородия пахотных дерново-подзолистых почв при применении удобрений // Почвоведение. 2018. № 3. С. 331–337. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030073>
64. Нечаева Т.В. Залежные земли России: распространение, агроэкологическое состояние и перспективы использования (обзор) // Почвы и окружающая среда. 2023. Т. 6. № 2. С. 5. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.215>
65. Никитин Д.А., Лысак Л.В., Бадмадашиев Д.В., Холод С.С., Мергелов Н.С., Долгих А.В., Горячкин С.В. Биологическая активность почв в условиях покровного оледенения в северной части архипелага Новая Земля // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1207–1230.
66. Никитин Д.А., Лысак Л.В., Зазовская Э.П., Мергелов Н.С., Горячкин С.В. Микробиом супрагляциальных систем на ледниках Альдегонда и Бертиль (о. Западный Шпицберген) // Почвоведение. 2024. № 4. С. 570–594. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24040048>
67. Овсепян Л.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Русаков А.В., Кузяков Я.В. Изменение денситометрического фракционного состава органического вещества почв лесостепной зоны в процессе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2020. № 1. С. 56–68. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20010128>
68. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
69. Приходько В.Е., Манахов Д.В. Изменение органического вещества почв степного Зауралья при переводе в заповедный режим // Почвоведение. 2014. № 4. С. 401–409.
70. Прищепов А.В., Мюллер Д., Дубинин М.Ю., Бауманн М., Раделофф В.К. Детерминанты пространственного распределения заброшенных сельскохозяйственных земель в европейской части России // Пространственная экономика. 2013. № 3. С. 30–62.
71. Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Бурдуковский М.Л. Состояние гумуса в некоторых типах залежных почв приморья // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2019. № 2. С. 46–54. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-2-46-54>
72. Романовская А.А. Аккумуляция углерода в болотных низинных почвах залежных земель Мурманской области // Экология. 2006. № 6. С. 1–5.
73. Романовская А.А. Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
74. Романовская А.А., Коротков В.Н., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С. Динамика элементов баланса углерода на неиспользуемых пахотных угодьях Валдайской возвышенности // Экология. 2012. № 5. С. 347–352.
75. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1435. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>
76. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307–317.

77. Рыжова И.М., Подвезенная М.А., Кириллова Н.П. Вариабельность запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесных экосистем Европейской территории России: сравнительный статистический анализ // Вестник Моск. ун-та. Серия 17, почвоведение. 2022. № 2. С. 20–27.
78. Рыжова И.М., Подвезенная М.А., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Семенюк О.В. Оценка запасов углерода и потенциала продуцирования CO_2 почвами хвойно-широколиственных лесов // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1143–1154. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600713>
79. Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020100>
80. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 164–182.
81. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
82. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес Де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н. Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023. Т. 6. № 1. С. e199. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199>
83. Скворцова Е.Б., Баранова О.Ю., Нумеров Г.Б. Изменение микростроения почв при зарастании пашни лесом // Почвоведение. 1987. № 9. С. 101–109.
84. Сорокина Н.П., Козлов Д.Н., Кузнецова И.В. Оценка постагрогенной трансформации дерново-подзолистых почв: картографическое и аналитическое обоснование // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1193–1205.
85. Таллер Е.Б., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Данченко Н.Н. Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества хроноряды дерново-подзолистых почв в процессе лесовосстановления // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 77–104. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-77-104>
86. Таргульян В.О., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Гольева А.А., Грачева Р.Г., Замотаев И.В., Александровский А.Л. и др. Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий. М.: ЛКИ, 2008. 687 с.
87. Татарников Д.В. О методических аспектах постановки экологических экспериментов (реплика на статью М. В. Козлова) // Журнал общей биологии. 2005. Т. 66. № 1. С. 90–93.
88. Тиунов А.В., Кузнецова Н.А. Environmental activity of earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) and the spatial organization of soil communities // Известия РАН. Сер. биологическая. 2000. № 5. С. 607–616.
89. Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И., Маслов М.Н. Динамика поступления растительного опада и некоторых свойств лесных подстилок при постагрогенном лесовосстановлении в условиях южной тайги // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2019. № 4. С. 3–10.
90. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 115–129. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16010111>
91. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мишин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120115>
92. Терехова Д.А., Смирнова М.А., Гераськина А.П., Шопина О.В., Кузнецова А.И., Бавшин И.М., Клиник Г.В., Енчилик П.Р., Хохряков В.Р., Герасимова М.И., Семенов И.Н. Макрофауна и органическое вещество в постагрогенных песчаных и супесчаных почвах северо-запада Смоленской области (Россия) // Почвоведение. 2023. № 8. С. 981–996. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600105>
93. Токавчук В.В., Сорокина О.А. Оценка влияния леса на агрохимические свойства почв залежей лесостепной зоны // Вестник КрасГАУ. 2009. № 6 (33). С. 9–17.
94. Травникова Л.С., Рыжова И.М., Силева Т.М., Бурякова Ю.В. Исследование органического вещества черноземов Приволжской лесостепи методами физического фракционирования // Почвоведение. 2005. № 4. С. 430–437.
95. Фарходов Ю.Р., Иванов В.А., Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Куликова Н.А. Жирные кислоты как биомаркеры типичных черноземов разного вида использования // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2019. № 1. С. 17–22.
96. Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Хохлов С.Ф., Ильин Б.С., Лазарев В.И., Холодов В.А. Выход денсиметрических фракций из типичных черноземов разного землепользования // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. № 103. С. 85–107. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-85-107>
97. Фролов О.А., Якушев А.В. Влияние на бактериальный гидролитический комплекс гумусо-аккумулятивного горизонта техноурбанозема пассажа через кишечник дождевого червя *Aporrectodea caliginosa* // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Т. 94. С. 57–73. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-57-73>

98. Холодов В.А., Рогова О.Б., Лебедева М.П., Варламов Е.Б., Волков Д.С., Зиганшина А.Р., Ярославцева Н.В. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 52–100.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-117-52-100>
99. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Иванов А.Л., Куликова Н.А. Термолabile и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020. № 8. С. 970–982.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20080080>
100. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Зиганшина А.Р., Максимович С.В. Неоднородность органического вещества агрегатов типичных черноземов // Почвоведение. 2022. № 7. С. 940–946.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070061>
101. Хохлов С.Ф. Постагрогенные дерново-подзолистые почвы под лесом и лугом в подмосковье: свойства, эволюция и элементы водного баланса. Дис. ... канд. с.-х. наук. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2015. 158 с.
102. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20030028>
103. Черкашина А.А., Голубцов В.А., Силаев А.В. Постагрогенная трансформация почв Тункинской котловины (юго-западное Прибайкалье) // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 11. С. 128–14
104. Чимитдоржиева Э.О. Углерод гумуса постагрогенных почв западного Забайкалья // Агрохимия. 2018. № 3. С. 3–11.
105. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
106. Шопина О.В., Гераськина А.П., Кузнецова А.И., Тихонова Е.В., Титовец А.В., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенов И.Н. Стадии постагрогенного восстановления компонентов экосистем сосновых лесов национального парка «Смоленское Поозерье» // Почвоведение. 2023. № 1. С. 20–34.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22600706>
107. Якименко Е.Ю. Особенности почвообразования на суходольных лугах // Почвоведение. 1987. № 5. С. 15–25
108. Якутина О.П., Данилова А.А., Нечаева Т.В. Комплексная оценка состояния залежных почв эродированного склона на юге Западной Сибири // Проблемы агрохимии и экологии. 2022. № 1. С. 21–28.
<https://doi.org/10.26178/AE.2022.23.73.005>
109. Abakumov E., Kimeklis A., Gladkov G., Andronov E., Morgun E., Nizamutdinov T. Microbiome of abandoned soils of former agricultural cryogenic ecosystems of central part of Yamal region // Czech polar reports. 2022. V. 12. № 2. P. 232–245.
<https://doi.org/10.5817/CPR2022-2-17>
110. Abakumov E.V., Gladkov G.V., Kimeklis A.K., Andronov E.E. The Microbiomes of Various Types of Abandoned Fallow Soils of South Taiga (Novgorod Region, Russian North-West) // Agronomy. 2023. V. 13. P. 2592.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13102592>
111. Allison S.D., Wallenstein M.D., Bradford M.A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology // Nat. Geosci. 2010. V. 3. № 5. P. 336–340.
112. Baldrian P. Forest microbiome: diversity, complexity and dynamics // FEMS Microbiology Reviews. 2016. V. 41. № 2. P. 109–130.
<https://doi.org/10.1093/femsre/fuw040>
113. Baldrian P. Microbial activity and the dynamics of ecosystem processes in forest soils // Current Opinion in Microbiology. 2017. V. 37. P. 128–134.
<https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.06.008>
114. Barman T., Barooah A.K., Goswami B.C., Sharma N., Panja S., Khare P., Karak T. Contents of chromium and arsenic in tea (*Camellia sinensis* L.): extent of transfer into tea infusion and health consequence // Biol. Trace. Elem. Res. 2020. V. 196. P. 318–329.
<https://doi.org/10.1007/s12011-019-01889-y>
115. Berg B., McLaugherty C. Plant Litter. Switzerland, Cham: Springer, 2020. 332 p.
116. Bilecikova J., Fialkova V., Duranova H., Kovacikova E., Forgacs Z., Gren A., Massanyi P., Lukac N., Roychoudhury S., Knazicka Z. Copper affects steroidogenesis and viability of human adrenocortical carcinoma (NCI-H295R) cell line *in vitro* // J. Environ. Sci. 2020. V. 55. P. 1070–1077.
117. Błonska E., Lasota J. Soil Organic Matter Accumulation and Carbon Fractions along a Moisture Gradient of Forest Soils // Forests. 2017. V. 8. P. 448.
118. Błonska E., Lasota J., Gruba P. Enzymatic activity and stabilization of organic matter in soil with different detritus inputs // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2017. V. 63. P. 242–247.
119. Bosatta E., Agren G.I. Theoretical analysis of microbial biomass dynamics in soil // Soil Biol. Biochem. 1994. V. 26. P. 143–148.
120. Bossuyt H., Six J., Hendrix P.F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. P. 251–258.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.035>
121. Briones M.J.I., Schmidt O. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis // Global Change Biology. 2017. V. 23(10). P. 4396–4419.

122. *Burdukovskii M., Kiseleva I., Perepelkina P.A. Koshel'eva Y.* Impact of different fallow durations on soil aggregate structure and humus status parameters // *Soil Water Res.* 2019. V. 15. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.17221/174/2018-SWR>
123. *Camenzind T., K. Mason-Jones, I. Mansour, M.C. Rillig, J. Lehmann.* Formation of necromass-derived soil organic carbon determined by microbial death pathways // *Nature Geoscience.* 2023. V. 16. P. 115–122. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01100-3>
124. *Cao Y., Ding J., Li J., Xin Z., Ren S., Wang T.* Necromass-derived soil organic carbon and its drivers at the global scale // *Soil Biol. Biochem.* 2023. V. 181. P. 109025. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109025>
125. *Che Y., Cai H., Jin G.* Scale-dependent effects of vegetation attributes and soil fertility on productivity in two temperate forests in Northeast China // *Catena.* 2024. V. 245. P. 108331. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108331>
126. *Chen C. Hall S.J., Coward E., Thompson A.* Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection // *Nature Commun.* 2020. V. 11. P. 2255. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16071-5>
127. *Chen M., Zhu X., Zhao C., Yu P., Abulaizi M., Jia H.* Rapid microbial community evolution in initial Car- ex litter decomposition stages in Bayinbuluk alpine wetland during the freeze–thaw period // *Ecol. Indic.* 2020. V. 121. P. 107180.
128. *Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A.* Historical trends in the amount and structure of organic carbon stocks in natural and managed ecosystems in European Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 5th International Conference “Ecosystem dynamics in the Holocene”. 2020. V. 438. P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012005>
129. *Chernysheva E., Khomutova T., Fornasier F., Kuznetsova T., Borisov A.* Effects of long-term medieval agriculture on soil properties: A case study from the Kislovodsk basin, Northern Caucasus, Russia // *J. Mountain Sci.* 2018. V. 15. P. 1171–1185. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4666-7>
130. *Chi Z.-L., Yu G.-H., Kappler A., Liu C.-Q., Gadd G. M.* Fungal-mineral interactions modulating intrinsic peroxidase-like activity of iron nanoparticles: Implications for the biogeochemical cycles of nutrient elements and attenuation of contaminants // *Environ. Sci. Technol.* 2022. V. 56(1). P. 672–680.
131. *Collins H.P., Elliot E.T., Paustian K., Bundy L.G., Dick W.A., Huggins D.R., Smucker A.J. M., Paul E.A.* Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems // *Soil Biol. Biochem.* 2000. V. 32. № 2. P. 157–168.
132. *Condrón L., Stark C., O'Callaghan M., Clinton P., Huang Z.* The Role of Microbial Communities in the Formation and Decomposition of Soil Organic Matter // *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production.* Dordrecht: Springer, 2010. P. 81–118. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9479-7_4
133. *Creamer C.A., de Menezes A.B., Krull E.S., Sander- man J., Newton-Walters R., Farrell M.* Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming // *Soil Biol. Biochem.* 2015. V. 80. P. 175–188. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.008>
134. *Dai X.Y., Ping C.L., Hines M.E., Zhang X.D., Zech W.* Amino sugars in arctic soils // *Communications Soil Sci. Plant Analysis.* 2002. V. 33. P. 789–805. <https://doi.org/10.1081/CSS-120003066>
135. *Danilov D.A., Zaytsev D.A., Vajman A.A., Yanush S.Yu., Ivanov A.A.* Potassium regime in postagrogenic soils that came out of cultivation at different time periods and are currently at different vegetation cover succession stages // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2021. V. 876. P. 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012020>
136. *De P., Deb S., Deb D., Chakraborty S., Santra P., Dut- ta P., Hoque A., Choudhury A.* Soil quality under different land uses in eastern India: Evaluation by using soil indicators and quality index // *PLOS One.* 2022. V. 17. P. e0275062. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275062>
137. *Deng W., Wang X., Hu H., Zhu M., Chen J., Zhang S., Cheng C., Zhu Z., Wu C., Zhu L.* Variation Characteristics of Soil Organic Carbon Storage and Fractions with Stand Age in North Subtropical *Quercus acutis- sima* Carruth. Forest in China // *Forests.* 2022. V. 13. P. 1649. <https://doi.org/10.3390/f13101649>
138. *Deng L., Zhu G.-Y., Tang Z.-S., Shangguan Z.-P.* Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks // *Glob. Ecol. Conserv.* 2016. V. 5. P. 127–138.
139. *Diaz J.M., Hansel C.M, Voelker B.M, Mendes C.M, Andeer P.F, Zhang T.* Widespread production of extra- cellular superoxide by heterotrophic bacteria // *Sci- ence.* 2013. V. 340. P. 1223–1226. <https://doi.org/10.1126/science.1237331>
140. *Domnariu H., Reardon C.L., Manning V.A., Golla- ny H.T., Trippe K.M.* Ecosystems and Environment Legume cover cropping and nitrogen fertilization in- fluence soil prokaryotes and increase carbon content in dryland wheat systems // *Agriculture.* 2024. V. 367. P. 108959.
141. *Dong H., Zeng Q., Sheng Y., Chen C., Yu G., Kappler A.* Coupled iron cycling and organic matter transforma- tion across redox interfaces // *Nature Reviews Earth Environment.* 2023. V. 4. P. 659–673. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00470-5>
142. *Du H.-Y., Chen C.-M., Yu G.-H., Polizzotto M.L., Sun F.-S., Kuzyakov Y.* An iron-dependent burst of hydroxyl radicals stimulates straw decomposition and CO₂ emission from soil hotspots: Consequences of

- Fenton or Fenton-like reactions // *Geoderma*. 2020. V. 375. P. 114512.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114512>
143. Dymov A.A. Changes in the soils of boreal ecosystems under the impact of environmental factors: a review // *Eurasian Soil Sc.* 2023. V. 56. P. S5–S23.
 144. Dymov A.A. Secondary soil successions // *Eurasian Soil Sc.* 2023. V. 56. P. S131–S137.
<https://doi.org/10.1134/S1064229323700230>
 145. Dymov A.A. Soils of postagrogenic ecosystems // *Eurasian Soil Sc.* 2023. V. 56. P. S114–S130.
<https://doi.org/10.1134/S1064229323700229>
 146. Enchilik P., Aseyeva E., Semenov I. Labile and stable fractions of organic carbon in a soil catena (the Central Forest Nature Reserve, Russia) // *Forests*. 2023. V. 14. № 7. P. 1367. <https://doi.org/10.3390/f14071367>
 147. Enchilik P.R., Semenov I.N. Vertical and spatial distribution of major and trace elements in soil catena at the Central Forest State Nature Biosphere Reserve (SE Valdai Hills, Russia). Geography, environment, sustainability. 2022. V. 15. P. 99–119.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-038>
 148. Gawęda T., Matek S., Błńska E., Jagodziński A.M., Bijak S., Zasada M. Macro- and micronutrient contents in soils of a chronosequence of naturally regenerated birch stands on abandoned agricultural lands in Central Poland // *Forests*. 2021. V. 12. P. 956.
<https://doi.org/10.3390/f12070956>
 149. Geisseler D., Scow K.M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review // *Soil Biol. Biochem.* 2014. V. 75. P. 54–63.
 150. Ghani M.I., Wang J., Li P., Pathan S. I., Sial T. A., Datta R., Mokhtar A., Ali E. F., Rinklebe J., Shaheen S. M., Liu M., Abdelrahman H. Variations of soil organic carbon fractions in response to conservative vegetation successions on the Loess Plateau // *Int. Soil Water Conservation Research*. 2023. V. 11. P. 561–571.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.05.002>
 151. Guidi C., Vesterdal L., Gianelle D., Rodighero M. Changes in soil organic carbon and nitrogen following forest expansion on grassland in the Southern Alps // *Forest Ecol. Manag.* 2014. V. 328. P. 103–116.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.025>
 152. Gong X., Jiang Y., Zheng Y., Chen X., Li H., Hu F., Liu M., Scheu S. Earthworms differentially modify the microbiome of arable soils varying in residue management // *Soil Biol. Biochem.* V. 121. P. 120–129.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.011>
 153. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis // *Glob. Chang., Biol.* 2002. V. 8. P. 345–360.
 154. Guo N., Shi X., Zhao Y., Xu S., Wang M., Zhang G., Wu J., Huang B., Kong C. Environmental and anthropogenic factors driving changes in paddy soil organic matter: a case study in the Middle and Lower Yangtze River Plain of China // *Pedosphere*. 2017. V. 27. P. 926–937.
 155. Hall S.J., Silver W.L. Iron oxidation stimulates organic matter decomposition in humid tropical forest soils // *Global Change Biology*. 2013. V. 19. P. 2804–2813.
 156. Hansson K., Olsson B.A., Olsson M., Johansson U., Kleja D.B. Differences in soil properties in adjacent stands of Scots pine, Norway spruce and silver birch in SW Sweden // *For. Ecol. Manag.* 2011. V. 262. P. 522–530.
 157. Helfrich M., Ludwig B., Buurman P., Flessa H. Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state C-13 NMR spectroscopy // *Geoderma*. 2006. V. 136. P. 331–341.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.048>
 158. Huang W., Hammel K.E., Hao J., Thompson A., Timokhin V.I., Hall S.J. Enrichment of Lignin-Derived Carbon in Mineral-Associated Soil Organic Matter // *Environ Sci Technol.* 2019. V. 53. P. 7522–7531.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01834>
 159. Hurlbert S.H. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments // *Ecological Monographs*. 1984. V. 54. P. 187–211.
 160. Huppmann D., Rogelj J., Kriegler E., Krey V., Riahi K. A new scenario resource for integrated 1.5°C research // *Nature Clim Change*. 2018. V. 8. P. 1027–1030.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0317-4>
 161. Joneczak J., Oktaba L., Pawłowicz E., Chojnacka A., Regulski E., Słowińska S., Olejniczak I., Oktaba J., Kruczkowska B., Kondras M., Jankiewicz U., Wójcik-Gront E. Soil organic matter transformation influenced by silver birch (*Betula pendula* Roth) succession on abandoned from agricultural production sandy soil // *Eur. J. Forest Res.* 2023. V. 142. P. 367–379.
<https://doi.org/10.1007/s10342-022-01527-8>
 162. Kakirde S.K.S., Parsley L.C., Liles M.R. Size does matter: Application-driven approaches for soil metagenomics // *Soil Biol. Biochem.* 2010. V. 42. P. 1911–1923.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.07.021>
 163. Kalinina O., Chertov O., Frolov P., Goryachkin S., Kuner P., Küper J., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Lyuri D., Rusakov A., Kuzyakov Y., Giani L. Alteration process during the post-agricultural restoration of Luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia // *Catena*. 2018. V. 171. P. 602–612.
 164. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics // *Geoderma*. 2009. V. 152. P. 35–42.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014>
 165. Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // *Catena*. 2015. V. 129. P. 18–29.

166. *Kebonye N.M., Eze P.N., Ahado S.K., John K.* Structural equation modeling of the interactions between trace elements and soil organic matter in semiarid soils // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2020. V. 17. P. 2205–2214.
167. *Kirkby C.A.* Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils // *Soil Biol. Biochem.* 2014. V. 68. P. 402–409.
168. *Kleber M., Eusterhues K., Keiluweit M., Mikutta C., Mikutta R., Nico P. S.* Chapter one – mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments // *Advances in Agronomy*. Academic Press, 2015. P. 1–140.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>
169. *Kleber M., Bourg I.C., Coward E.K., Hansel C.M., Myneni S.C.B., Nunan N.* Dynamic interactions at the mineral–organic matter interface // *Nature Rev. Earth Environ.* 2021. V. 2. P. 402–421.
<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y>
170. *Kolár L., Kužel S., Horáček J., Cechová V., Borová-Batt J., Peterka J.* Labile fractions of soil organic matter, their quantity and quality // *Plant Soil Environ.* 2009. V. 55. P. 245–251.
171. *Klink G.V., Semenov I.N., Nukhimovskaya Y.D., Gasanova Z.U., Stepanova N.Yu., Konyushkova M.V.* Temporal change in plant communities and its relationship to soil salinity and microtopography on the Caspian Sea coast // *Sci Rep.* 2022. V. 12. P. 18082.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-19863-5>
172. *Kopecký M., Kolár L., Perná K., Váchalová R., Mráz P., Konvalina P., Murindangabo Y.T., Ghorbani M., Menšík L., Dumbrovský M.* Fractionation of Soil Organic Matter into Labile and Stable Fractions // *Agronomy.* 2022. V. 12. P. 73.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12010073>
173. *Kramer M.G., Chadwick O.A.* Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale // *Nature Climate Change.* 2018. V. 8. P. 1104–1108.
174. *Krishna M.P., Mohan M.* Litter decomposition in forest ecosystems: A review. *Energy Ecol. Environ.* 2017. V. 2. P. 236–249.
175. *Krull E.S., Baldock J.A., Skjemstad J.O.* Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover // *Functional Plant Biology.* 2003. V. 30. P. 207–222.
<https://doi.org/10.1071/FP02085>
176. *Kudryashova Ya.S., Chumbaev A.S., Tanasienko A.A., Solovyev S.V., Miller G.F., Bezborodova A.N., Filimonova D.A.* Post-agrogenic dynamics of soil properties of eroded agrochernozems in the forest-steppe zone of Western Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021. V. 8. P. 012101.
177. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena.* 2015. V. 133. P. 461–466.
178. *Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V., Smirnov V.E., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Gornov A.V., Ruchinskaya E.V., Tebenkova D.N.* Linking vegetation, soil carbon stocks, and earthworms in upland coniferous–broadleaf forests // *Forests.* 2021. V. 12. № 9. P. 1179. <https://doi.org/10.3390/f12091179>
179. *La Mantia T., Gristina L., Rivaldo E., Pasta S., Novara A., Rühl J.* The effect of post-pasture woody plant colonization on soil and aboveground litter carbon and nitrogen along bioclimatic transect // *iForest.* 2013. V. 6. P. 238–246.
<https://doi.org/10.3832/for0811-006>
180. *Lang L., Sun Z., Chen Y., Zhang Y., Li M.* Effects of earthworms and bacteria on carbon transformation and microbial community of soda saline-alkali soil by improvements of straw and manure mixture // *J. Agric. Resources Environ.* 2023. V. 40. P. 412–422.
181. *Lasota J., Błomska E., Łyszczyk S., Tibbett M.* Forest humus type governs heavy metal accumulation in specific organic matter fractions // *Water Air Soil Pollut.* 2020. V. 231. P. 80.
<https://doi.org/10.1007/s11270-020-4450-0>
182. *Le Bayon R.-C., Bullinger-Weber G., Schomburg A.C., Turberg P., Schlaepfer R., Guenat C.* Earthworms as ecosystem engineers: a review // Horton G. C. (Ed.) *Earthworms. Types, roles and research. Insects and other terrestrial Arthropods: biology, chemistry and behavior.* N.Y.: Nova Science Publishers, Inc., 2017. P. 129–177.
183. *Le Quéré C., Raupach M.R., Canadell J.G., Marland G., Bopp L., Ciais P., et al.* Trends in the sources and sinks of carbon dioxide // *Nature Geoscience.* 2009. V. 2. P. 831–836. <https://doi.org/10.1038/ngeo689>
184. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature.* 2015. V. 528. P. 60–68.
<https://doi.org/10.1038/nature16069>
185. *Lejoly J., Quideau S., Laganière J., Karst J., Martineau C., Swallow M., Norris C., Samad A.* Earthworm-invaded boreal forest soils harbour distinct microbial communities // *Soil.* 2023. V. 9. P. 461–478.
<https://doi.org/10.5194/soil-9-461-2023>
186. *Li F., Hu J., Xie Y., Yang G., Hu C., Chen X., Deng Z.* Foliar stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in wetland sedge *Carex brevicuspis* along a small-scale elevation gradient // *Ecol. Indic.* 2018. V. 92. P. 322–329.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.059>
187. *Li C., Li C., Zhao L., Ma Y., Tong X., Deng J., Ren C., Han X., Yang G.* Dynamics of storage and relative availability of soil inorganic nitrogen along revegetation chronosequence in the loess hilly region of China // *Soil Till. Res.* 2019. V. 187. P. 11–20.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.006>
188. *Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kaestner M., Kaestner M.* Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter // *Global Change Biology.* 2019. V. 25. P. 3578–3590.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14781>

189. Lovett G.M., Arthur M.A., Crowley K.F. Effects of calcium on the rate and extent of litter decomposition in a northern hardwood forest // *Ecosystems*. 2016. V. 19. P. 87–97. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9919-0>
190. Lugato E., Lavallee J., Haddix M., Panagos P., Cotrufo M. F. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter // *Nature Geoscience*. 2021. V. 14. P. 295–300. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>
191. Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Shashkov M., Knyazeva S. Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia // *Forests*. 2020. V. 11. P. 979.
192. Maslov M.N., Maslova O.A. Soil nitrogen mineralization and its sensitivity to temperature and moisture in temperate peatlands under different land-use management practices // *Catena*. 2022. V. 210. P. 105922. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105922>
193. Matasov V.M. How natural and positional factors influenced land-use change during the last 250 years in temperate Russia // *Landscape Patterns in a Range of Spatio-Temporal Scales*. Landscape Series. Cham: Springer, 2020. V. 26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31185-8_23
194. McDonald S., A.G. Bishop, P.D. Prenzler, K. Robards. Analytical chemistry of freshwater humic substances // *Analytica Chimica Acta*. 2004. V. 527. Is. 2. P. 105–124. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.10.011>
195. Muñoz-Rojas M. Soil quality indicators: Critical tools in ecosystem restoration // *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*. 2018. V. 5. P. 47–52.
196. Ojha R.B., Kristiansen P., Atreya K., Wilson B. Changes in soil organic carbon fractions in abandoned croplands of Nepal // *Geoderma Regional*. 2023. V. 33. P. e00633. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00633>
197. Panwar P., Mahalingappa D.G., Kaushal R., Bhardwaj D.R., Chakravarty S., Shukla G., Thakur N.S., Chavan S.B., Pal S., Nayak B.G. Biomass Production and Carbon Sequestration Potential of Different Agroforestry Systems in India: A Critical Review // *Forests*. 2022. V. 13. P. 1274. <https://doi.org/10.3390/f13081274>
198. Paustian K., Elliott E.T., Petersen G.A., Killian K. Modeling climate, CO₂ and management impacts on soil carbon in semi-arid agroecosystems // *Plant and Soil*. 1996. V. 187. P. 351–365.
199. Pershina E., Valkonen J., Kurki P., Ivanova E., Chirak E., Korvigo I., Provorov N., Andronov E. Comparative analysis of prokaryotic communities associated with organic and conventional farming systems // *PloS One*. 2015. V. 10. P. e0145072. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145072>
200. Pham T.G., Nguyen H.T., Kappas M. Assessment of soil quality indicators under different agricultural land uses and topographic aspects in Central Vietnam // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2018. V. 6. P. 280–288.
201. Pickett S.T.A. Space-for-time substitution as an alternative to long-term studies // *Long-Term Studies in Ecology*. N.Y.: Springer, 1989. P. 110–135. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7358-6>
202. Pižl V. Succession of earthworm populations in abandoned fields // *Soil Biol. Biochem.* 1992. V. 24. P. 1623–1628. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90160-Y](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90160-Y)
203. Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., van Wese-mael B., Schumacher J., Gensior A. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach // *Global Change Biology*. 2011. V. 17. P. 2415–2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>
204. Polyakov V., Abakumov E. Estimation of carbon stocks and carbon sequestration rates in abandoned agricultural soils of northwest Russia // *Atmosphere*. 2023. V. 14. P. 1370. <https://doi.org/10.3390/atmos14091370>
205. Prescott C.E. Litter decomposition: What controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? // *Biogeochemistry*. 2010. V. 101. P. 133–149.
206. Rajput V., Minkina T., Semenov I., Klink G., Tarigholizadeh S., Sushkova S. Phylogenetic analysis of hyperaccumulator plant species for heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons // *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. V. 43. P. 1629–1654. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00527-0>
207. Ren C., Liu W., Zhao F., Zhong Z., Deng J., Han X., Yang G., Feng Y., Ren G. Soil bacterial and fungal diversity and compositions respond differently to forest development // *Catena*. 2019. V. 181. P. 104071. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104071>
208. Risch A.C., Jurgensen M.F., Page-Dumroese D.S., Wildi O., Schütz M. Long-term development of above- and below-ground carbon stocks following land-use change in subalpine ecosystems of the Swiss National Park // *Can. J. For. Res.* 2008. V. 38. P. 1590–1602. <https://doi.org/10.1139/X08-014>
209. Rowley M.C., Grand S., Verrecchia É.P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon // *Biogeochemistry*. 2018. V. 137. P. 27–49. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>
210. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinskis R., Prižavoi D., Bojāre D., Brūmelis G. Soil–vegetation interactions in abandoned farmland within the temperate region of Europe // *New Forests*. 2016. V. 47. P. 587–605. <https://doi.org/10.1007/s11056-016-9532-x>
211. Russo S.E., Legge R., Weber K.A., Brodie E.L., Goldfarb K.C., Benson A.K., Tan S. Bacterial community structure of contrasting soils underlying Bornean rain forests: Inferences from microarray and next-generation sequencing methods // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 55. P. 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.05.021>

212. Sarikurkcü C., Akata I., Guven G., Tepe B. Metal concentration and health risk assessment of wild mushrooms collected from the Black Sea region of Turkey // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. V. 27. P. 26419–26441. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09025-3>
213. Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. V. 478. P. 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
214. Schulz S., Brankatschk R., Dümig A., Kögel-Knabner I., Schloter M., Zeyer J. The role of microorganisms at different stages of ecosystem development for soil formation // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 3983–3996. <https://doi.org/10.5194/bg-10-3983-2013>
215. Semenov I.N., Klink G.V., Lebedeva M.P., Krupskaya V.V., Chernov M.S., Dorzhieva O.V., Kazinskiy M.T., Sokolov V.N., Zavadskaya A.V. The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. P. 11077. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90712-7>
216. Semenov I.N., Konyushkova M.V. Geochemical partition of chemical elements in Kastanozems and Solonetz in a local catchment within a semiarid landscape of SW Russia // *Catena*. 2022. V. 210. P. 105869. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105869>
217. Shabtai I.A., Wilhelm R.C., Schweizer S.A., Höschen C., Buckley D.H., Lehmann J. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter // *Nat Commun.* 2023. V. 19. № 14. P. 6609. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42291-6>
218. Shao P., Liang C., Lynch L., Xie H., Bao X. Reforestation accelerates soil organic carbon accumulation: Evidence from microbial biomarkers // *Soil Biology and Biochemistry*. 2019. V. 131. P. 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.01.012>
219. Shao P., Liang C., Rubert-Nason K., Li X., Xie H., Bao X. Secondary successional forests undergo tightly-coupled changes in soil microbial community structure and soil organic matter // *Soil Biol. Biochem.* 2019. V. 128. P. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.10.004>
220. Shepherd R.M., Oliverio A.M. Micronutrients modulate the structure and function of soil bacterial communities // *Soil Biol. Biochem.* 2024. V. 192. P. 109384. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109384>
221. Shopina O.V., Bondar A.I., Tikhonova E.V., Titovets A.V., Semenov I.N. The soil bacterial communities show resilience in composition and function for 30 years of pine self-reforestation on agricultural lands in Western Russia // *Applied Soil Ecology*. 2024. V. 202. P. 105570. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105570>
222. Shrestha B.M., Chen H. Y. H. Effects of stand age, wildfire and clearcut harvesting on forest floor in boreal mixedwood forests // *Plant and Soil*. 2010. V. 336. P. 267–277. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0475-2>
223. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 2002. V. 241. P. 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
224. Smal H., Olszewska M. The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus // *Plant Soil*. 2008. V. 305. P. 171–187. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9538-z>
225. Sollins P., Homann P., Caldwell B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls // *Geoderma*. 1996. V. 74. P. 65–105. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5)
226. Spohn M., Novák T. J., Incze J., Giani L. Dynamics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in calcareous soils after land-use abandonment – A chronosequence study // *Plant Soil*. 2016. V. 401. P. 185–196. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2513-6>
227. Souza R., Favas P., Varun M., Paul S. Dynamics of Trace Element Bioavailability in Soil (Chapter 13) // *Medical Geology: En route to One Health* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2023. <https://doi.org/10.1002/9781119867371.ch13>
228. Stevens B. Soil organic carbon dynamics at the regional scale as influenced by land use history: a case study in forest soils from southern Belgium // *Soil Use Management*. 2008. V. 24. № 1. P. 69–79. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00135.x>
229. Stone M.M., de Forest J.L., Plante A.F. Changes in extracellular enzyme activity and microbial community structure with soil depth at the Luguillo Critical Zone Observatory // *Soil Biol. Biochem.* 2014. V. 75. P. 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.04.017>
230. Terhonen E., Blumenstein K., Kovalchuk A., Asiegbu F.O. Forest tree microbiomes and associated fungal endophytes: Functional roles and impact on forest health // *Forests*. 2019. V. 10. P. 42.
231. Urbanski L., Kalbitz K., Rethemeyer J., Schad P., Kögel-Knabner I. Unexpected high alkyl carbon contents in organic matter-rich sandy agricultural soils of Northwest Central Europe // *Geoderma*. 2023. V. 439. P. 116695. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116695>
232. Valle S.R., Carrasco J. Soil quality indicator selection in Chilean volcanic soils formed under temperate and humid conditions // *Catena*. 2018. V. 162. P. 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.024>
233. Veen (Ciska) G. F., De Long J.R., Kardol P., Sundqvist M.K., Snoek L. B., Wardle D.A. Coordinated responses of soil communities to elevation in three subarctic

- vegetation types // *Oikos*. 2017. V. 126. P. 1586–1599.
<https://doi.org/10.1111/oik.04158>
234. *Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B.D., Gundersen P.* Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? // *For. Ecol. Manag.* 2013. V. 309. P. 4–18.
235. *Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P.* Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land // *For. Ecol. Manag.* 2002. V. 169. P. 137–147.
236. *Wall A., Hytönen J.* Soil fertility of afforested arable land compared to continuously // *Plant Soil* 2005. V. 275. P. 247–260.
237. *Wang B., Lerdau M.T., He Y.* Widespread production of nonmicrobial greenhouse gases in soils // *Global Change Biology*. 2017. V. 23. P. 4472–4482.
238. *Wang J., Zhang B., Wang J., Zhang G., Yue Z., Hu L., Yu J., Liu Z.* Effects of different agricultural waste composts on cabbage yield and rhizosphere environment // *Agronomy*. 2024. V. 14. P. 413.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14030413>
239. *Wang S., Jia Y., Liu T., Wang Y., Liu Z., Feng X.* Delineating the role of calcium in the large-scale distribution of metal-bound organic carbon in soils // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. P. e2021GL092391.
240. *Wang X., Wang C, Fan X, Sun L., Sang C., Wang X, Jiang P., Fang Y., Bai E.* Mineral composition controls the stabilization of microbially derived carbon and nitrogen in soils: Insights from an isotope tracing model // *Global Change Biology*. 2024. V. 30. P. e17156.
<https://doi.org/10.1111/gcb.17156>
241. *Wani K.A., Mamta Shuab R., Lone R.A.* Earthworms and associated microbiome: Natural boosters for agro-ecosystems // *Probiotics in Agroecosystem*. Singapore: Springer, 2017. P. 469–489.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-4059-7_252017
242. *Whalen E.D., Grandy A.S, Sokol N.W, Keiluweit M, Ernakovich J, Smith R.G., Frey S.D.* Clarifying the evidence for microbial- and plant-derived soil organic matter, and the path toward a more quantitative understanding // *Global Change Biology*. 2022. V. 28. P. 7167–7185. <https://doi.org/10.1111/gcb.16413>
243. *Xiao K.-Q., Zhao Y., Liang C., Zhao M., Moore O.W., Otero-Fariña A., Zhu Y.-G., Johnson K., Peacock C.L.* Introducing the soil mineral carbon pump // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. V. 4. P. 135–136.
<https://doi.org/10.1038/s43017-023-00396-y>
244. *Xiao L., Zhao R., Zhang X.* Crop cleaner production improvement potential under conservation agriculture in China: A meta-analysis // *J. Cleaner Production*. 2020. V. 269. P. 122262.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122262>
245. *Xu C., Chen Z., Xia S., Zhao W., Zhang Q., Teng J., Yu X.* The initial mass of residue can regulate the impact of *Phragmites australis* decomposition on water quality: A case study of a mesocosm experiment in a wetland of North China // *J. Freshw. Ecol.* 2021. V. 36. P. 49–62.
246. *Xavitt J.B., Pipes G.T., Olmos E.C., Zhang J., Shapleigh J.P.* Soil organic matter, soil structure, and bacterial community structure in a post-agricultural landscape // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 590103.
247. *Yu G.-H., Kuzyakov Y.* Fenton chemistry and reactive oxygen species in soil: Abiotic mechanisms of biotic processes, controls and consequences for carbon and nutrient cycling // *Earth-Science Reviews*. 2021. V. 214. P. 103525.
248. *Zamulina I.V., Gorovtsov A.V., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Burachevskaya M.V.* The influence of long-term Zn and Cu contamination in Spolic Technosols on water-soluble organic matter and soil biological activity // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2021. V. 208. P. 111471.
249. *Zhang B., Zhang F., Wang X., Chen D., Tian Y., Wang Y., Zheng J., Li Sh., Li Zh., Han G., Zhao M.* Secondary succession of soil, plants, and bacteria following the recovery of abandoned croplands in two semi-arid steppes // *Land Degradation and Development*. 2023. V. 35. № 1. P. 296–307.
250. *Zhang Y., Hobbie S.E., Schlesinger W.H., Berg B., Sun T., Zhu J.* Exchangeable manganese regulates carbon storage in the humus layer of the boreal forest // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2024. V. 121. P. e2318382121.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2318382121>
251. *Zhang C., Liu G.B., Xie S., Zhang C.S.* Characteristics of soil microelements contents in the rhizospheres of different vegetation in hilly-gully region of Loess Plateau // *Chinese J. Appl. Ecology*. 2012. V. 23. P. 645–650.
252. *Zhang H., Xue D., Huang X., Wu H., Chen H.* Earthworms Modify the Soil Bacterial Community by Regulating the Soil Carbon, Enzyme Activities, and pH // *J. Soil Sci. Plant Nutrition*. 2023. V. 23. P. 5360–5373.
253. *Zhang W., Hendrix P.F., Dame L.E., Burke R.A., Wu J., Neher D.A., Li J., Shao Y., Fu S.* Earthworms facilitate carbon sequestration through unequal amplification of carbon stabilization compared with mineralization // *Nat Commun*. 2013. V. 4. P. 2576.
<https://doi.org/10.1038/ncomms3576>
254. *Zhelezova A., Chernov T., Nikitin D., Tkhakakhova A., Ksenofontova N., Zverev A., Kutovaya O., Semenov M.* Seasonal Dynamics of soil bacterial community under long-term abandoned cropland in boreal climate // *Agronomy*. 2022. V. 12. P. 519.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12020519>
255. *Zhu Y., Zhang Q., Li Y., Pan Z., Liu C., Lin D., Gao J., Tang Z., Li Z., Wang R., Sun J.* Role of soil and foliar-applied carbon dots in plant iron biofortification and cadmium mitigation by triggering opposite iron signaling in roots // *Small*. V. 19. P. 2301137.
<https://doi.org/10.1002/sml.202301137>

Regradational Changes in the Chemical Properties of Postagrogenic Soils (Review)

I. N. Semenov^{a, b, *}

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117997 Russia*

**e-mail: semenkov@geogr.msu.ru*

This review summarizes information about the properties of postagrogenic soils with a focus on the composition of soil organic matter (SOM) during the natural self-revegetation. Within one landscape zone, from the chronoseris of the plowed horizon with the poorest substrate to the richest, the contrast in changes in acidity, content and reserves of SOM, and its enrichment in N decreases. This trend is also typical for the series of postagrogenic soils “sandy and sandy loam in (sub)taiga – loamy in (sub)taiga – loamy in (forest-)steppe.” In the previously plowed horizon, with the natural self-revegetation, the pH value and the content of mobile K decreases in the (sub)taiga and remains unchanged in the (forest)steppe. The content of mobile P and exchangeable Ca and Mg decreases slightly in the sandy soils of the (sub)taiga and is constant in the loamy soils of the (sub)taiga and (forest)steppe. For the content of SOM and total N, multidirectional trends were noted in the sandy soils at the (sub)taiga and at the loamy soils, an increase or uniform distribution during the self-revegetation in (sub)taiga and (forest)steppe. The mobile fractions of transition metals and Ca as well as active forms of O play an important but not fully understood role in the stabilization and destruction of SOM. In the context of postagrogenic regradative changes in soils, only pilot assessments of the transformation of SOM composition have been carried out.

Keywords: carbon cycle, chronosequence, space-for-time substitution, ecological indicators, soil microbiome, earthworms, fungi, vegetation