

КОНВЕРСИЯ ПАШНИ В ЗАЛЕЖЬ УВЕЛИЧИВАЕТ СТАБИЛЬНОСТЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ

Е. А. Филимоненко¹, М. А. Упорова¹, Е. А. Арбузова¹, К. Ибраева¹, А. О. Константинов¹, И. Н. Курганова^{1,2}, Я. В. Кузяков^{1,3}

¹ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия;

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия;

³Геттингенский университет имени Георга Августа, Геттинген, Германия

E-mail: eafilimonenko@mail.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023, принята к печати 31.08.2023

Оценена микробиологическая активность и термическая стабильность органического вещества пахотных и залежных почв, сформированных на зональных темно-серых почвах подтаежной зоны Западной Сибири. За 30-летний период конверсии пахотной почвы в залежь запасы почвенного углерода, учтенные до глубины 100 см, увеличились на 36%, из которых $\frac{3}{4}$ сосредоточено в пахотном горизонте (0–30 см). В структуре накопленного почвенного органического вещества (ПОВ) преобладает термически лабильный пул (49–51 %), а суммарная доля устойчивого и сверхустойчивого пулов в почве составляет 19% и 29% на глубинах 0–30 и 30–100 см соответственно. Энергия активации термического окисления пулов ПОВ, рассчитанная на основе дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа почв, для лабильного пула составляет 62 кДж моль⁻¹, стабильного – 149 Дж моль⁻¹, устойчивого – 214 кДж моль⁻¹, сверхустойчивого – 306 кДж моль⁻¹. Энергия активации термического окисления ПОВ, количественно оцененная исходя из энергии активации окисления отдельных пулов и их удельной доли в составе ПОВ, при конверсии пашни в залежь увеличилась на 2 кДж моль⁻¹ – с 121 кДж моль⁻¹ до 123 кДж моль⁻¹. Базальное дыхание на единицу почвенного органического углерода в залежах увеличилось в 2,4 раза на глубине до 5 см по сравнению с пахотной почвой и при этом уменьшилось в среднем на 14% на глубине более 30 см, что является маркером увеличения стабильности ПОВ к микробиологическому разложению в более глубоких слоях. При изменении типа землепользования с пашни на залежь установлена экспоненциальная зависимость между термической стабильностью ПОВ и микробиологическими характеристиками почв, отражающая их соответствие друг другу и указывающая на применимость методов термического анализа для оценки устойчивости ПОВ к микробному разложению.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, секвестрация углерода, термическая стабильность, энергия активации.

CONVERSION OF ARABLE LAND INTO ABANDONED INCREASE STABILITY OF SOIL ORGANIC MATTER

Е. А. Filimonenko¹, М. А. Uporova¹, Е. А. Arbuzova¹, К. Ibraeva¹, А. О. Konstantinov¹, I. N. Kurganova^{1,2}, Ya. V. Kuzyakov^{1,3}

¹University of Tyumen (UTMN), Tyumen, Russia;

²Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia;

³University of Goettingen, Göttingen, Germany

E-mail: eafilimonenko@mail.ru

The thermal and microbiological stability of soil organic matter (SOM) of arable and abandoned soils formed on Luvic Phaeozems in the subtaiga zone of Western Siberia were assessed during the study. Over a 30-year period of the arable land conversion to the abandoned, soil carbon stocks to a depth of 100 cm increased by 36%, $\frac{3}{4}$ of which were stored in the topsoil (0–30 cm). The thermally labile pool (49–51%) dominated in the structure of the accumulated SOM, while the total proportion of the stable and overstable pools of the accumulated SOM was 19% and 29% in the topsoil (0–30 cm) and the subsoil (30–100 cm), respectively. The activation energy of the SOM thermal oxidation, calculated from the data of differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis of the soils, was 62 kJ mol⁻¹ for the thermally labile SOM pool, 149 kJ mol⁻¹ for the stable pool, 214 kJ mol⁻¹ for the overstable pool and 306 kJ mol⁻¹ for the super stable pool. The activation energy of SOM thermal oxidation, quantified as the activation energy of individual pools and their contribution to the SOM structure, increased by 2 kJ mol⁻¹ during conversion of the arable soil to the abandoned (from 121 kJ mol⁻¹ to 123 kJ mol⁻¹). Basal respiration per unit of soil organic carbon increased 2.4 times in the top 5-cm depth of the abandoned soil compared to the arable, and decreased by 14% in the subsoil below 30 cm marking an increasing resistance of SOM to microbial decomposition in the deeper soil. The exponential relationship between thermal stability of SOM and microbial respiration was established for both the arable and the abandoned soils. This shows that the thermal analysis approach can be a useful tool for estimating the resistance of SOM to microbial decomposition.

Key words: soil organic matter, carbon sequestration, thermal stability, activation energy.

ВВЕДЕНИЕ

В органическом веществе почвы (ПОВ) содержится больше углерода, чем в атмосфере и наземной биомассе вместе взятых (Stockmann et al., 2013). Поэтому даже относительно небольшие изменения в пуле почвенного углерода оказывают сильный эффект на потоки CO_2 между почвой и атмосферой (Davidson, Janssens, 2006). Одним из факторов, влияющих на динамику почвенного углерода, является изменение типа землепользования. Прекращение ежегодной распашки более 45 млн га, произошедшее в 1990-х годах на территории России, является самым масштабным изменением типа землепользования территорий в северном полушарии в XX веке, оказавшим существенное влияние на глобальный углеродный цикл (Kurganova et al., 2014). Количество поступающих в почву органических веществ увеличивается после прекращения ее распашки и перевода в залежный режим землепользования. При этом до 90 % органического вещества, поступившего в почву, возвращается в атмосферу в результате его микробной минерализации, и лишь малая его часть ($\sim 0,02\text{--}0,05\%$ ежегодно) может быть стабилизирована. Это происходит вследствие усиления защищенности ПОВ от быстрого микробного разложения и приводит таким образом к секвестрации атмосферного углерода в почве (Когут и др., 2021). Для разных типов почв России оценено количество углерода, накопленного в результате 20-летней конверсии пахотных почв в залежные, и даны прогнозные оценки относительно дальнейшего увеличения запасов углерода в течение последующих 30 лет (Kurganova et al., 2014). Дополнение количественных оценок накопления углерода в залежных почвах данными о его устойчивости к микробному разложению является важным для характеристики процесса секвестрации углерода, т.е. его выведения из атмосферы в результате фотосинтеза и последующей стабилизации в почве (Когут и др., 2021).

Устойчивость ПОВ к микробному разложению увеличивается в результате физической окклюзии органических веществ, формирования органоминеральных комплексов и почвенных агрегатов (Lützw et al., 2006). Оценка стабильности органического вещества может быть проведена с помощью физико-химических методов анализа почв, включая методы термического анализа (Doležalová-Weissmannová et al., 2023). Термические методы анализа, сочетающие термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию (ТГ-ДСК), широко применяются для определения кинетических характеристик веществ. Оценка термической стабильности ПОВ основана на увеличении химической устойчивости компонентов ПОВ к разрушению при повышении температуры воздействия на почву (Doležalová-Weissmannová et al., 2023; Plante et al., 2011, 2009; Sokolov et al., 2021; Tokarski et al., 2020).

Цель исследования состояла в оценке термической стабильности ПОВ и его устойчивости к микробному разложению при конверсии пахотных почв в залежные. Задачи исследования включали:

1) количественную оценку термической стабильности ПОВ на основе соотношений между отдельными пулами ПОВ с различной термической устойчивостью, характеризующимися разной энергией активации (E_a) термического окисления; 2) выявление взаимосвязей между термической стабильностью и устойчивостью ПОВ к микробному разложению спустя 25–30 лет после прекращения распашки почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования расположена в пределах северной части Тура-Тавдинского междуречья, в приграничной зоне Нижнетавдинского района Тюменской области и Тавдинского района Свердловской области. Объектом исследования являлись почвы пашни и залежей, обработка которых прекратилась 25–30 лет назад.

Почва активной пашни классифицирована как агрозем текстурно-дифференцированный глееватый (*Gleyic Luvisol (Aric, Cutanic)*) с формулой профиля P-BTg-Cg. Залежные почвы относятся к агроземно-серым типичным постагрогенным (*Luvic Phaeozems (Aric, Cutanic, Densic)*) с формулой профиля W-PUra-PUra,ad-BEL-BT-Bc. Описания разрезов и диагностика почв проведены в соответствии с классификацией почв России (Шишов и др., 2004), названия почв даны в соответствии с Мировой коррелятивной базой данных почвенных ресурсов в редакции 2022 г. (IUSS Working Group WRB, 2022). Выбранные для исследований разрезы являются репрезентативными для агроландшафтов подтаежного Зауралья (Каретин, 1990), характеризующихся преобладанием дерново-подзолистых, серых и темно-серых почв и их агрогенных аналогов.

Отбор проб почв из четырех полнопрофильных разрезов проводился послойно в трех полевых повторностях с глубин 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–70 и 70–100 см. Пробоподготовка почв для изучения их физико-химических, термических и биологических свойств состояла в удалении корней и грубодисперсного органического материала, высушивании, просеивании и гомогенизации. Во всех образцах почв определено содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и общего азота (N) методом сухого каталитического сжигания в токе кислорода на элементном анализаторе Vario Pyro Cube (Elementar, Германия) в трех аналитических повторностях. Запасы органического углерода (C_{stock} , кг С м⁻²) и общего азота (N_{stock} , кг N м⁻²) рассчитаны для слоев 0–30 см и 30–100 см с учетом послойного содержания $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ в почве на соответствующих глубинах, плотности сложения почвы (г м⁻³), установленной методом режущего кольца, и мощности слоя (см).

Термическая стабильность ПОВ определялась методами термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии в одной экспериментальной повторности для каждого почвенного образца. ТГ-ДСК анализ почв проводился при нагревании образцов от 30 до 600°C со скоростью 10°C в минуту в окислительной атмосфере при скорости потока воздуха 200 мл мин⁻¹ (TGA/DSC 3 + Mettler Toledo, Германия). Величины термических потерь массы почв, фиксируемые с частотой 1 запись в

секунду, пересчитывались на кумулятивные потери массы за каждые 10°C повышения температуры. В результате для каждого образца почвы был получен набор значений термических потерь массы, выраженных в мг на 1 почвы, из 57 индивидуальных величин в диапазоне от 30 до 600°C. Наборы из 57 индивидуальных значений термических потерь массы, объединенные с величинами тепловых эффектов, полученными методом ДСК, сгруппированы в четыре

температурных интервала, характеризующие термическую стабильность ПОВ, – термически лабильный пул ПОВ (200–380°C), стабильный (380–460°C), устойчивый (460–520°C) и сверхустойчивый (520–600°C). Границы температурных интервалов для четырех пулов определялись исходя из локальных максимумов скоростей термической деструкции ПОВ и интенсивности экзотермических пиков (рис. 1).

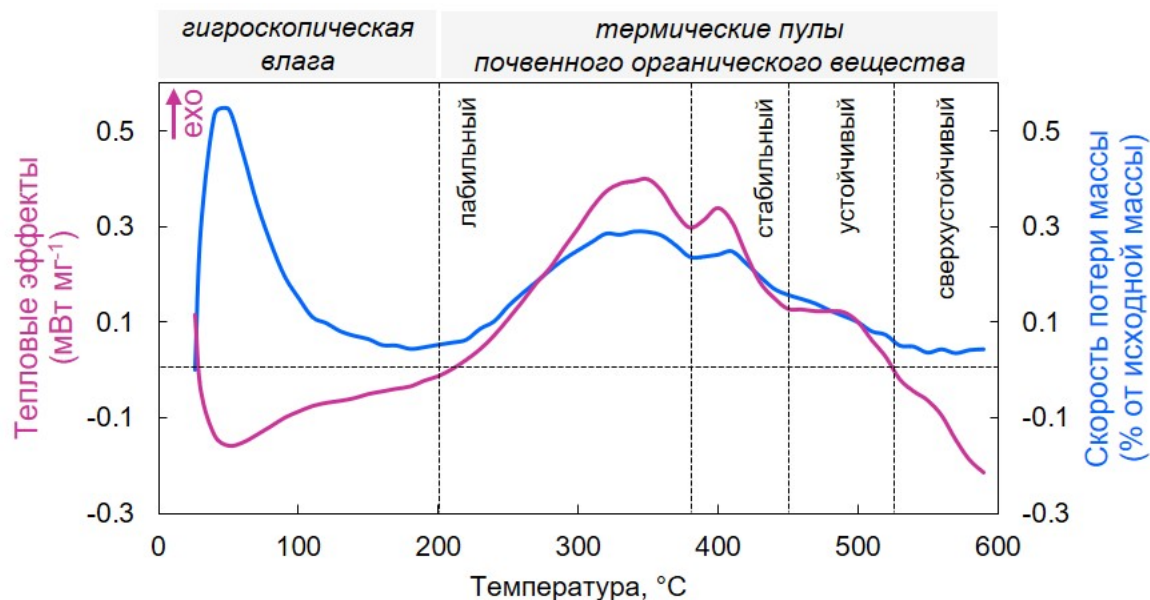


Рис. 1. Кривые, полученные в результате ТГ-ДСК анализа почв, с выделенными температурными интервалами, соответствующими потере почвенной гигроскопической влаги (30–200°C) и термической деструкции почвенного органического вещества (200–600°C), для термически лабильного пула ПОВ (200–380°C), стабильного (380–460°C), устойчивого (460–520°C) и сверхустойчивого (520–600°C)

Для количественной оценки стабильности термических пулов ПОВ на основе результатов, полученных методом ТГ-ДСК, рассчитана энергия активации реакции их термического окисления. Для расчета энергии активации использовался метод Коутса-Редферна (Coats, Redfern, 1964). Считается, что

$$\ln \left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT},$$

где $\alpha = \frac{m_0 - m_i}{m_0 - m_k}$, m_0 – масса начала реакции, кг; m_k – конечная масса процесса, кг; m_i – масса в период времени i , кг; α – степень конверсии; T – температура нагрева, К; A – предэкспоненциальный коэффициент; R – газовая постоянная, Дж моль⁻¹ К⁻¹; E – энергия активации, кДж моль⁻¹; β – скорость реакции, °С мин⁻¹.

Отношения энергии активации к универсальной газовой постоянной ($-E/R$) определяли по наклону кривых, описывающих зависимости ($\ln(-\ln(1-\alpha)/T^2)$) от $1/T$. Полученные значения энергии активации реакции термического окисления отдельных пулов ПОВ использовали для расчета интегральной величины

в процессе термоокисления ПОВ протекают одноступенчатые реакции первого порядка, подчиняющиеся законам Аррениуса. Согласно данному методу, уравнение энергии активации имеет следующий вид:

энергии активации термоокисления органического вещества пахотных и залежных почв.

Скорость базального дыхания (BR) определяли по интенсивности выделения CO₂ из почвы после ее предварительной 7-дневной инкубации при температуре 20 °С и влажности, соответствующей 70% от полной влагоемкости (Курганова и др., 2021). Для измерения концентрации CO₂ использовали ИК-газоанализатор LI-830 (LI-Cor, США). Углерод микробной биомассы (C_{mic}) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (Anderson and Domsch, 1978) при внесении раствора глюкозы (10 мг глюкозы на 1 г почвы) в инкубируемые образцы почв после измерения в них BR. Устойчивость

органического вещества пахотных и залежных почв к микробному разложению оценивали по удельной скорости минерализации ПОВ на основании отношении $BR/C_{орг}$ (Курганова и др., 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прекращение распашки почв способствует увеличению содержания $C_{орг}$ в 1,3 раза на глубине до 30 см (рис. 2). При использовании земель в качестве пашни осуществляется изъятие растительного материала, а в постагрогенных условиях происходит увеличение поступления в почву органических

веществ с наземным и корневым опадом, а также корневыми выделениями (Laganiere et al., 2010; Post, Kwon, 2000). Смена однолетних сельскохозяйственных культур многолетними растениями является существенным фактором повышения содержания $C_{орг}$ в постагрогенных почвах за счет увеличения количества времени, в течение которого в почву поступают корневые выделения, – с 1–2 месяцев для сельскохозяйственных культур до нескольких лет для многолетних трав (Pausch, Kuzyakov, 2018).

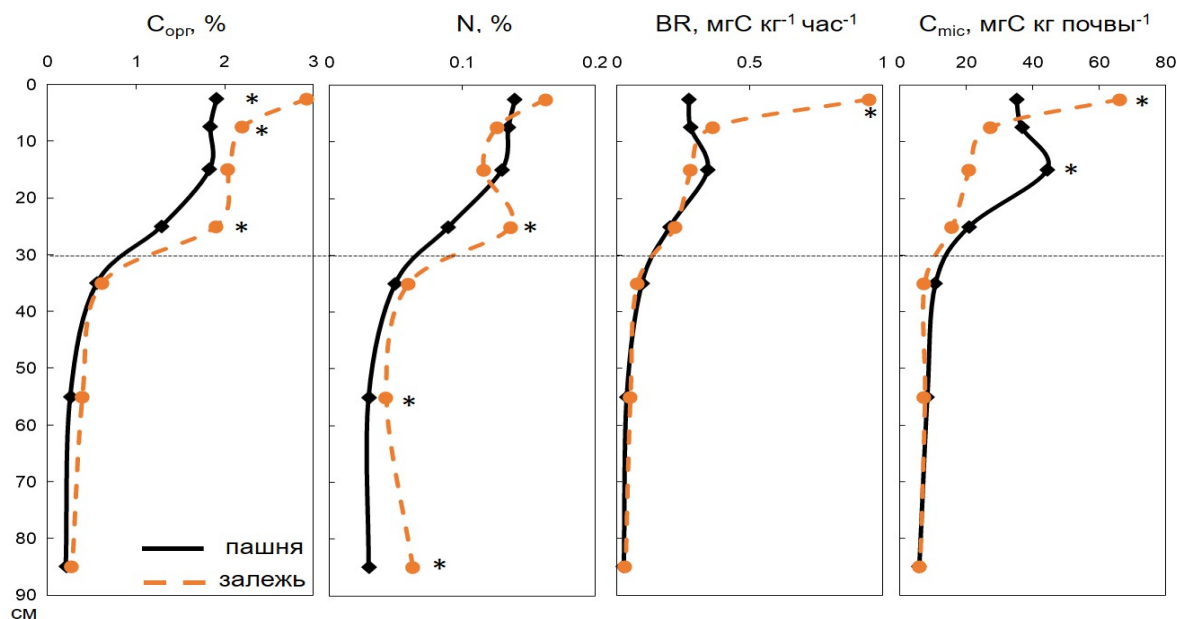


Рис. 2. Химические (содержание органического углерода ($C_{орг}$) и общего азота (N)) и микробиологические (скорость базального дыхания (BR) и содержание углерода микробной биомассы ($C_{мис}$)) свойства почв пашни и 25–30-летней залежи в зависимости от глубины.

Примечание: * – различия являются значимыми ($p < 0,05$)

Увеличение содержания органических веществ в залежных почвах по сравнению с пахотными приводит к повышению их микробной активности – в верхних 10 см постагрогенных почв скорость базального дыхания в 2,4 раза выше по сравнению с пашней (рис. 2). Содержание углерода микробной биомассы в верхних 5 см почвы залежи возрастает в 1,9 раз по сравнению с пашней (рис. 2). Увеличение микробной активности почвы и постагрогенная сукцессия растительного покрова приводят к интенсификации использования почвенного N. Лимитированность почвы по N при постагрогенном накоплении C является причиной различий в распределении содержания $C_{орг}$ и N по глубине профиля залежных почв (рис. 2). Отношение C/N в залежных почвах увеличивается по сравнению с

пашней – с 14 до 17 единиц для верхних 30 см, что свидетельствует о снижении доступности органических веществ для микробного разложения после конверсии пашни в залежь.

Превышение скорости поступления органических веществ в почву над скоростью их микробного разложения приводит к увеличению запасов углерода и азота в постагрогенных почвах по сравнению с пахотными (рис. 3). За период 25–30 лет залежного режима запасы углерода и азота в почве на глубине до 100 см увеличились на 36% по сравнению с пашней. Среднегодовое накопление углерода в почве на глубине до 30 см после прекращения распашки превышает его накопление на глубине 30–100 см в 2,4 раза.

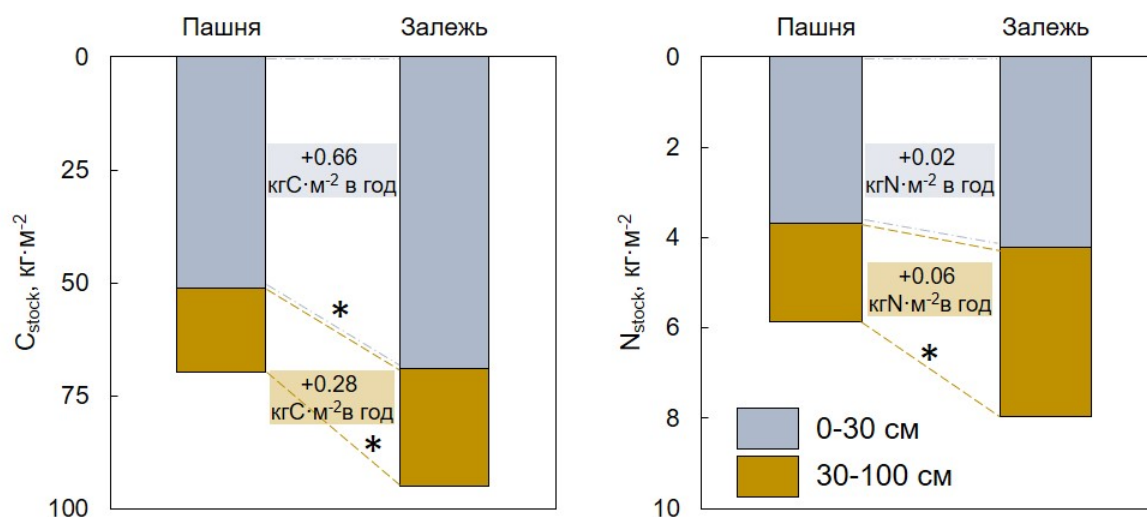


Рис. 3. Запасы органического углерода (C_{stock}) и общего азота (N_{stock}) в почвах пашни и 25–30-летней залежи и среднегодовые скорости накопления углерода и азота на глубине 0–30 см и 30–100 см.

Примечание: * – различия являются значимыми ($p < 0,05$)

Пулы органического вещества почвы с различной стабильностью

В составе ПОВ выделяется четыре пула в соответствии с их устойчивостью к термическому окислению – лабильный пул (термоокисляется при температуре 200–380°C), стабильный (при 380–460°C), устойчивый (при 460–520°C) и сверхустойчивый (при 520–600°C). Размер термически лабильного пула ПОВ в верхних 30 см почвы в 2,4–2,6 раза больше, чем на глубине 30–100 см: 26 и 10 мг_{ПОВ} г_{почвы}⁻¹ в почве пашни, 29 и 12 мг_{ПОВ} г_{почвы}⁻¹ в почве залежи. Градиент снижения размеров пулов термически стабильного, устойчивого и сверхустойчивого ПОВ с глубиной почвы меньше градиента, характерного для лабильного пула, и составляет 1,4 для почвы на глубине до 30 см и 0,9 – на глубине 30–100 см. Термически стабильный пул ПОВ в среднем составляет 11 мг_{ПОВ} г_{почвы}⁻¹, устойчивый – 4,7 мг_{ПОВ} г_{почвы}⁻¹, сверхустойчивый – 2,5 мг_{ПОВ} г_{почвы}⁻¹. Соотношения между пулами ПОВ различаются между

почвой верхних 30 см и почвой на глубине 30–100 см: с увеличением глубины доля термически лабильного пула в составе ПОВ снижается с 58–59% до 39–40%, а суммарная доля стабильного, устойчивого и сверхустойчивого пулов возрастает до 60–61% (рис. 4).

Накопление ПОВ в результате 25–30-летней конверсии пахотных почв в залежные происходит в составе всех выделяемых термических пулов. На глубине 30–100 см доля устойчивого и сверхустойчивого пулов накопленного ПОВ суммарно составляет 29%, что превышает аналогичное значение, характерное для глубины до 30 см, на 10% (рис. 4). Увеличение доли более термически устойчивых пулов ПОВ с глубиной почвы является результатом стабилизации органических веществ на минеральных комплексах с повышенной устойчивостью к термическому окислению (Sanderman, Grandy, 2020).

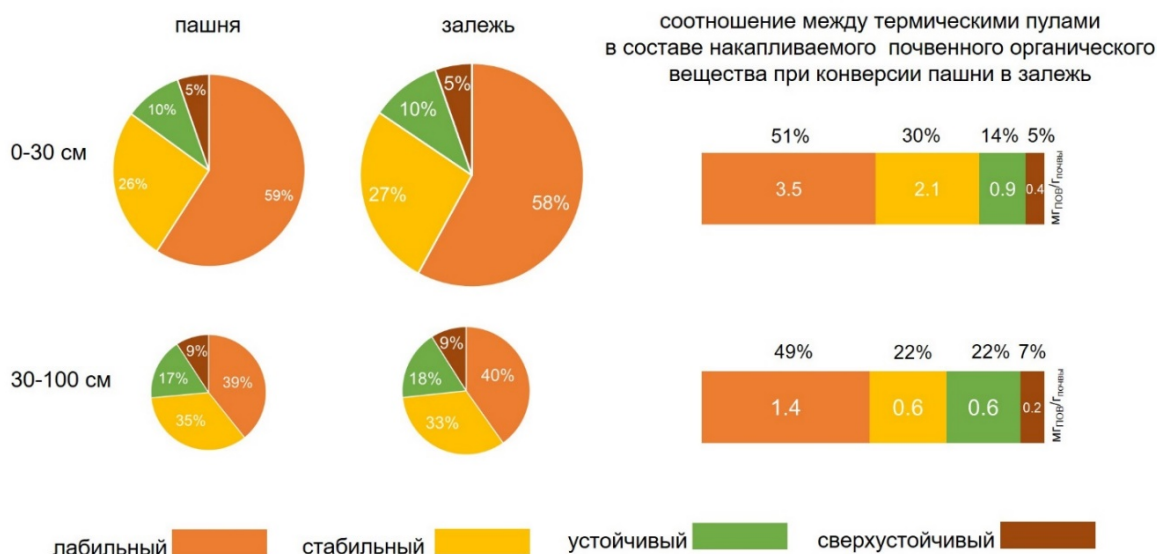


Рис. 4. Доли термических пулов в составе ПОВ пашни и 25–30-летней залежи (размер кругов пропорционален содержанию ПОВ) и соотношение между термическими пулами в составе накапливаемого ПОВ при конверсии пашни в залежь

Энергия активации разложения пулов органического вещества почвы

Энергия активации полного термического окисления ПОВ до CO_2 и H_2O имеет более высокие значения по сравнению с реакциями, протекающими в почвах в естественных или инкубационных лабораторных условиях при участии ферментов, катализирующих реакции разложения биохимически лабильных пулов (Williams, Plante, 2018; Leifeld, Lützow von, 2014). E_a является энергетическим барьером сжигания ПОВ и определяет потенциал сохранения органических веществ в почве (Williams, Plante, 2018). E_a реакции термоокисления отдельных пулов ПОВ не зависит от типа землепользования и глубины почвы (различия являются статистически незначимыми, $p < 0,05$), она представляет собой количественную характеристику внутренней стабильности органического вещества в составе пулов (рис. 5). Являясь маркером термической стабильности пула ПОВ, E_a термического окисления увеличивается с ростом температуры протекания соответствующей термоокислительной реакции – 62 кДж моль⁻¹ для лабильного пула ПОВ, 149 кДж моль⁻¹ для стабильного, 214 кДж моль⁻¹ для устойчивого и 306 кДж моль⁻¹ для сверхустойчивого. Энергия

активации термического окисления ПОВ, рассчитанная как средневзвешенная величина энергий активации окисления отдельных термических пулов и их долей в составе ПОВ, для почвы пашни составляет: на глубине 0-30 см – 121 кДж моль⁻¹, на глубине 30-100 см – 140 кДж моль⁻¹. Постагрогенная почва характеризуется более высокой (на 2 кДж моль⁻¹) энергией активации термического окисления ПОВ в верхних 30 см по сравнению с пахотной почвой (до 123 кДж моль⁻¹), что свидетельствует о стабилизации ПОВ в результате 25-30-летней конверсии пашни в залежь.

Устойчивость органического вещества, накопленного в почве при конверсии пашни в залежь, к микробному разложению характеризуется величиной BR, нормированной на единицу $C_{\text{орг}}$, которая снижается с увеличением термической стабильности ПОВ. Дыхательная активность почвы снижается с увеличением глубины (рис. 2) и экспоненциально зависит от энергии активации термического окисления ПОВ (рис. 6). Снижение скорости микробного дыхания с увеличением энергии активации окисления (рис. 6) отражает взаимосвязь термической стабильности ПОВ и его устойчивости к микробному разложению.

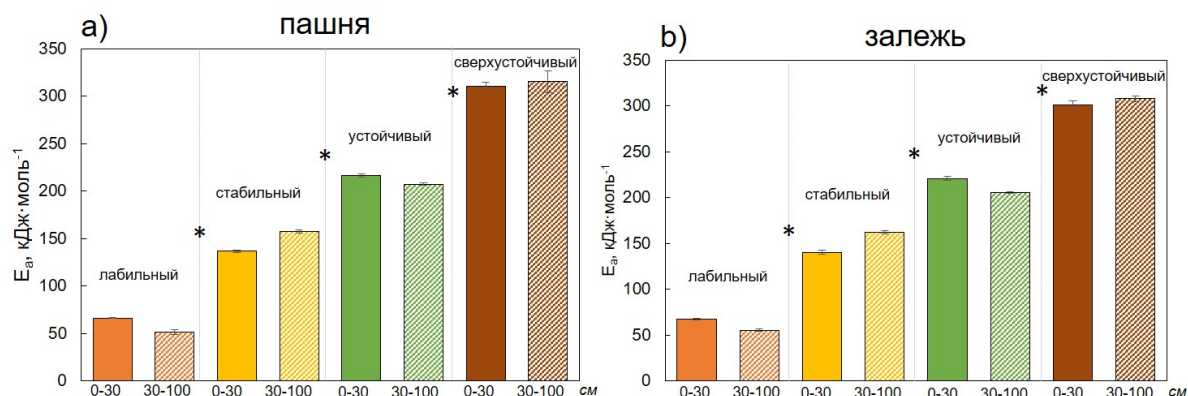


Рис. 5. Энергия активации (E_a) термического окисления органического вещества в составе лабильного, стабильного, устойчивого и сверхустойчивого пулов ПОВ пашни (а) и 25-30-летней залежи (б).

Примечание: * – различия являются значимыми ($p < 0,05$)

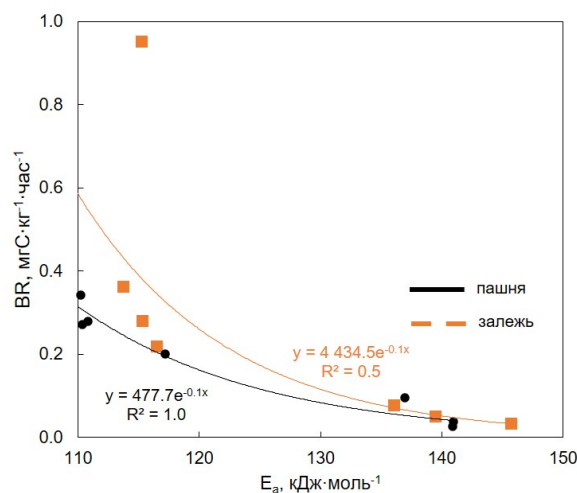


Рис. 6. Зависимость дыхательной активности почвы (скорость базального дыхания, BR) от энергии активации (E_a) термического окисления ПОВ

ВЫВОДЫ

Конверсия пахотных почв в залежные приводит к увеличению запасов углерода на глубине 0–100 см на 36% за 25–30 лет. Накопление ПОВ происходит в составе четырех пулов, выделяемых исходя из параметров их термической стабильности, – термически лабильного, стабильного, устойчивого и сверхустойчивого. С увеличением глубины почвы доля более термически устойчивых пулов ПОВ возрастает. Общая термическая стабильность, оцениваемая по величине энергии активации термоокисления ПОВ, увеличивается на 2 кДж моль⁻¹

после прекращения распашки почвы и определяет устойчивость ПОВ к микробному разложению.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00370 «Термические свойства почв как индикатор стабильности почвенного органического вещества», <https://rscf.ru/project/23-24-00370/>). Авторы выражают благодарность В. Иванову, А. А. Новоселову, Б. Р. Хабибуллаеву, И. А. Миляеву и Н. П. Самохиной за помощь при отборе проб почв и их подготовке к аналитическим исследованиям.

Список литературы

- Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13. DOI: 10.31857/S0002188121050070
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Галлардо Ланчо Х.Ф., Ем К.Т. Оценка скорости минерализации органического вещества почв в лесных экосистемах внутриконтинентального умеренного, средиземноморского и тропического муссонного климата // *Почвоведение*. 2012. № 1. С. 82–94.
- Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес де Гереню В.О., Личко В.И., Караванова Е.И. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // *Почвоведение*. 2021. № 3. С. 287–303. DOI: 10.31857/S0032180X21030102
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. Vol. 10. № 3. pp. 215–221. DOI: 10.1016/0038-0717(78)90099-8
- Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data // *Nature*. 1964. Vol. 201. № 4914. pp. 68–69. DOI: 10.1038/201068a0
- Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // *Nature*. 2006. Vol. 440. № 7081. pp. 165–173. DOI: 10.1038/nature04514
- Doležalová-Weissmannová H., Malý S., Brtnický M., Holátko J., Demyan M.S., Siewert C., Tokarski D., Kameníková E., Kučerík J. Practical applications of thermogravimetry in soil science: Part 5. Linking the microbial soil characteristics of grassland and arable soils to thermogravimetry data // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. № 4. pp. 1599–1611. DOI: 10.1007/s10973-022-11709-6
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. № 3. pp. 938–947. DOI: 10.1111/gcb.12379
- Laganiere J., Angers D.A., Para D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis: SOC accumulation following afforestation // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16. № 1. pp. 439–453. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x
- Leifeld J., Lützw M. von. Chemical and microbial activation energies of soil organic matter decomposition // *Biology and Fertility of Soils*. 2014. Vol. 50. № 1. pp. 147–153. DOI: 10.1007/s00374-013-0822-6
- Pausch J., Kuzyakov Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scales // *Global Change Biology*. 2019. Vol. 24. pp. 1–12. DOI: 10.1111/gcb.13850
- Plante A.F., Fernández J.M., Haddix M.L., Steinweg J.M., Conant R.T. Biological, chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. Vol. 43. № 5. pp. 1051–1058. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.01.024
- Plante A.F., Fernández J.M., Leifeld J. Application of thermal analysis techniques in soil science // *Geoderma*. 2009. Vol. 153. № 1–2. pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.08.016
- Post W.M., Kwon K.C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential: soil carbon sequestration and land-use change // *Global Change Biology*. 2000. Vol. 6. № 3. pp. 317–327. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x
- Sanderman J., Grandy A.S. Ramped thermal analysis for isolating biologically meaningful soil organic matter fractions with distinct residence times // *SOIL*. 2020. Vol. 6. № 1. pp. 131–144. DOI: 10.5194/soil-6-131-2020
- Sokolov D.A., Dmitrevskaya I.I., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Chernikov V.A., Semenov V.M. A study of soil organic matter stability using derivatography and long-term incubation methods // *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. № 4. pp. 487–498. DOI: 10.1134/S1064229321040141
- Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., Courcelles V. de R. de, Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2013. Vol. 164. pp. 80–99. DOI: 10.1016/j.agee.2012.10.001
- Tokarski D., Wiesmeier M., Doležalová Weissmannová H., Kalbitz K., Scott Demyan M., Kučerík J., Siewert C. Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions // *Geoderma*. 2020. Vol. 362. pp. 114–124. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114124

Williams E.K., Plante A.F. A Bioenergetic Framework for Assessing Soil Organic Matter Persistence // *Frontiers in Earth Science*. 2018. Vol. 6. pp. 143. DOI: 10.3389/feart.2018.00143

References

- Kogut B.M., Semenov V.M., Artem'yeva Z.S., Danchenko N.N. Degumusirovaniye i pochvennaya sekvestratsiya ugleroda [Dehumusification and soil carbon sequestration] // *Agrokimiya*, 2021, no. 5, pp. 3–13. DOI: 10.31857/S0002188121050070
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Gallardo Llancho H.F., Yem K.T. Otsenka skorosti mineralizatsii organicheskogo veshchestva pochv v lesnykh ekosistemakh vnutrikontinental'nogo umerennogo, sredizemnomorskogo i tropicheskogo mussonnogo klimata [Assessment of soil organic matter mineralisation rates in forest ecosystems of intracontinental temperate, mediterranean and tropical monsoon climates] // *Pochvovedeniye*, 2012, no. 1, pp. 82–94.
- Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova Ye.I. Dinamika pulov ugleroda i biologicheskoy aktivnosti agrodermno-podzolov yuzhnoy taygi v khode postagrogennoy evolyutsii [Dynamics of carbon pools and biological activity of agrodermno-podzols of the southern taiga during postagrogenic evolution] // *Pochvovedeniye*, 2021, no. 3, pp. 287–303. DOI: 10.31857/S0032180X21030102
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. Vol. 10. № 3. pp. 215–221. DOI: 10.1016/0038-0717(78)90099-8
- Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data // *Nature*. 1964. Vol. 201. № 4914. pp. 68–69. DOI: 10.1038/201068a0
- Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // *Nature*. 2006. Vol. 440. № 7081. pp. 165–173. DOI: 10.1038/nature04514
- Doležalová-Weissmannová H., Malý S., Brtnický M., Holátko J., Demyan M.S., Siewert C., Tokarski D., Kameníková E., Kučerík J. Practical applications of thermogravimetry in soil science: Part 5. Linking the microbial soil characteristics of grassland and arable soils to thermogravimetry data // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. № 4. pp. 1599–1611. DOI: 10.1007/s10973-022-11709-6
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. № 3. pp. 938–947. DOI: 10.1111/gcb.12379
- Laganiere J., Angers D.A., Para D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis: SOC accumulation following afforestation // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16. № 1. pp. 439–453. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x
- Leifeld J., Lützw M. von. Chemical and microbial activation energies of soil organic matter decomposition // *Biology and Fertility of Soils*. 2014. Vol. 50. № 1. pp. 147–153. DOI: 10.1007/s00374-013-0822-6
- Pausch J., Kuzyakov Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scales // *Global Change Biology*. 2019. Vol. 24. pp. 1–12. DOI: 10.1111/gcb.13850
- Plante A.F., Fernández J.M., Haddix M.L., Steinweg J.M., Conant R.T. Biological, chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. Vol. 43. № 5. pp. 1051–1058. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.01.024
- Plante A.F., Fernández J.M., Leifeld J. Application of thermal analysis techniques in soil science // *Geoderma*. 2009. Vol. 153. № 1–2. pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.08.016
- Post W.M., Kwon K.C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential: soil carbon sequestration and land-use change // *Global Change Biology*. 2000. Vol. 6. № 3. pp. 317–327. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x
- Sanderman J., Grandy A.S. Ramped thermal analysis for isolating biologically meaningful soil organic matter fractions with distinct residence times // *SOIL*. 2020. Vol. 6. № 1. pp. 131–144. DOI: 10.5194/soil-6-131-2020
- Sokolov D.A., Dmitrevskaya I.I., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Chernikov V.A., Semenov V.M. A study of soil organic matter stability using derivatography and long-term incubation methods // *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. № 4. pp. 487–498. DOI: 10.1134/S1064229321040141
- Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., Courcelles V. de R. de, Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2013. Vol. 164. pp. 80–99. DOI: 10.1016/j.agee.2012.10.001
- Tokarski D., Wiesmeier M., Doležalová Weissmannová H., Kalbitz K., Scott Demyan M., Kučerík J., Siewert C. Linking thermogravimetric data with soil organic carbon fractions // *Geoderma*. 2020. Vol. 362. pp. 114–124. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114124
- Williams E.K., Plante A.F. A Bioenergetic Framework for Assessing Soil Organic Matter Persistence // *Frontiers in Earth Science*. 2018. Vol. 6. pp. 143. DOI: 10.3389/feart.2018.00143