

In the conditions of the south-east of the Central Black Earth Region, in a long-term stationary experiment of the laboratory of ecological and landscape crop rotations of the Voronezh Federal Scientific Center named after V.V. Dokuchaev, experimental data were obtained on the accumulation of residual biomass in crop rotation links with the inclusion of legume predecessors and winter wheat, the processes of its transformation in the soil by cellulose microorganisms without the application of mineral fertilizers and against the background of $N_{60}P_{60}K_{60}$. The influence of perennial leguminous grasses of different types of use and binary sowing of winter wheat with winter vetch on the intensity of carbon dioxide emission from the soil is shown. As a result of the research carried out in 2020-2022 years it was established that the variants with sainfoin in the link with winter wheat provided 49.8-119.2% more accumulation of plant residues in the soil than the pea predecessor. This contributed to the maintenance of high cellulolytic activity, especially in the upper aerated soil layer 0-10 cm by 18.0-23.0%, amino acid synthesis indicators up to 0.207 opt. units and an increase in CO_2 flows during diffusion from the soil by 13.6%. The application of mineral fertilizers at a dose of $N_{60}P_{60}K_{60}$ enhanced the biological activity of the soil, especially in wet years.

Key words: crop rotation, predecessor, biological activity of the soil, residual biomass, CO_2 emission from soil.

УДК 631.417.1

DOI: 10.25680/S19948603.2024.141.02

ОЦЕНКА ГУМУСИРОВАННОСТИ СЕРЫХ И СВЕТЛО-СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ РАЗНЫХ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП В АГРОЛАНДШАФТАХ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ

А.А. Прохоров*, О.Е. Ефимов, Б.А. Борисов, П.С. Горячев,
Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
Россия, 127434, Москва, Тимирязевская ул., 49
*artem.prokhorov.2016@inbox.ru
* <https://orcid.org/0000-0002-2988-5055>

Работа выполнена в рамках тематического плана-задания на выполнение НИР по заказу Минсельхоза России за счет средств федерального бюджета в 2024 г.

На примере серых лесных почв Калужской области проведена оценка гумусового состояния агроландшафтов. При типизации почв на агроэкологические группы проанализирован вклад экзогенных факторов в формирование углерода гумуса и лабильной фракции РОХС. Установлено, что избыточное количество влаги в поверхностно – глееватых и грунтово – глеевых серых лесных почвах приводит к повышению содержания углерода гумуса в среднем на 15-20%, а содержание $C_{орг}$ на переувлажнённых землях статистически достоверно отличается от содержания $C_{орг}$ на почвах плакорных и эрозийных агроэкологических групп. Пространственная неоднородность фракции РОХС не позволяет выявить существенных различий средних значений в рамках агроэкологических групп земель. Установлено, что фракция $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ наиболее чувствительна к процессу сокращения почвенного углерода. При этом показатели pH_{KCl} , содержание подвижных форм фосфора и калия являются устойчивыми параметрами, а тренд сокращения РОХС нелинейный и для серых лесных почв Калужской области отмечалось наличие тенденции к более быстрому сокращению РОХС в промежутке от максимума до 3-го квартиля по $C_{орг}$, в то время как при сокращении $C_{орг}$ до 50% от фоновых значений отмечается наличие сглаживания и выхода тренда среднего содержания фракции РОХС на плато. В фоновых участках содержание РОХС на 40% выше, чем на пашне, при этом для содержания $C_{орг}$ характерна вариация в 10-15%. Фракции $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ и РОХС намного более чувствительны к землепользованию, чем содержание $C_{орг}$. Однако при этом РОХС характеризуется широкой вариабельностью и пространственная неоднородность содержания фракции РОХС не объясняется принадлежностью почв к агроэкологическим группам, тогда как по величине $C_{орг}$ отмечаются значимые различия средних за счет проявления избыточного гидроморфизма.

Ключевые слова: органическое вещество почв, агроэкологическая оценка, качество почв, устойчивость к деградации.

Для цитирования: Прохоров А.А., Ефимов О.Е., Борисов Б.А., Горячев П.С. Оценка гумусированности серых и светло-серых лесных почв разных агроэкологических групп в агроландшафтах Калужской области// Плодородие. – 2024. – №6. – С. 9-13. DOI: 10.25680/S19948603.2024.141.02.

По современным оценкам почва является крупнейшим на планете резервуаром углерода [11]. При этом сложность, гетерогенность и динамичность системы почвенных органических соединений не позволяют изучать ее напрямую, в связи с чем появляются новые косвенные методы измерения и оценки состояния почвенного органического вещества в наземных экосистемах и агроландшафтах [3,7,8,10].

Важность органического вещества (ОВ) для ключевых функций почвы изучается на протяжении длительного времени как отечественными, так и зарубежными авторами [3-6, 9, 10].

Традиционно, в рамках отечественного почвоведения и методики изучения ПОВ, разрабатываемой в СССР, широко используется химический анализ. Оксидиметрический метод Тюрина в различных его модификациях, в основе которого лежит применение хромовой смеси в качестве окислителя, остается единственным используемым показателем при проведении агрохимического обследования почв [7].

В рамках изучения зональных особенностей накопления ПОВ в нашей стране следует обратить внимание на труды Б.М. Когута. В работе «Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России» [3] приведена

характеристика содержания гумуса в пахотных почвах зонального ряда, основанная на теоретическом и экспертном подходах. Представлен обзор и проведен анализ градаций почв по содержанию гумуса, разработанных Почвенным институтом им. В.В. Докучаева. Одна из наиболее важных особенностей градации – это оценка зависимости степени гумусированности от гранулометрического состава почв. Одной из проблем оценки почвы по степени гумусированности в соответствии с классификацией почв 1977 г. выступал тот факт, что содержание гумуса рассматривается на видовом уровне, в то время как гранулометрический состав никак не учитывает зональные особенности гумусонакопления.

Цель исследований – оценить распределение в агроландшафтах углерода гумуса, а также перманганатно-окисляемого углерода, вклад основных агроэкологических факторов в формирование пространственной неоднородности распределения углерода в почве.

Методика. Анализ почвенно-ландшафтных условий и описание почвенных профилей проведены в полевых условиях в период 14.08.2023-15.09.2023. На основании данных цифровой модели местности (ЦММ) с разрешением 30 м (SRTM-global) был сделан морфометрический анализ исследуемых площадок. Для оценки климатических параметров

использовали набор данных: ERA-5 land за период 2000-2022 г. Данные получены с использованием облачной платформы Google earth engine (GEE).

Исследуемый участок приурочен к северной части Калужской области (Бабынинский район). Территория преимущественно равнинного типа. Для рельефа денудированных равнин свойственны густая и глубокая долинно-балочная сеть и широкое распространение склонов с эродированными почвами.

Геоморфологические условия. Тип рельефа – волнистая эрозийная равнина с четко выраженными водораздельными поверхностями, шлейфами склонов и склоновыми землями. Экспозиция склона оказывает значительное влияние на микроклиматические условия и интенсивность смыва почвы. В период весеннего снеготаяния основной причиной различий в смыве являются неравномерность распределения снега в разных частях склонов разных экспозиций и разная скорость снеготаяния. Для данной зоны характерно усиление эрозийных процессов на склонах южной экспозиции, что связано с более интенсивным снеготаянием, в результате чего увеличивается сток. Данные участки в сравнении со склонами холодной экспозиции менее снабжены влагой и имеют большую теплообеспеченность.

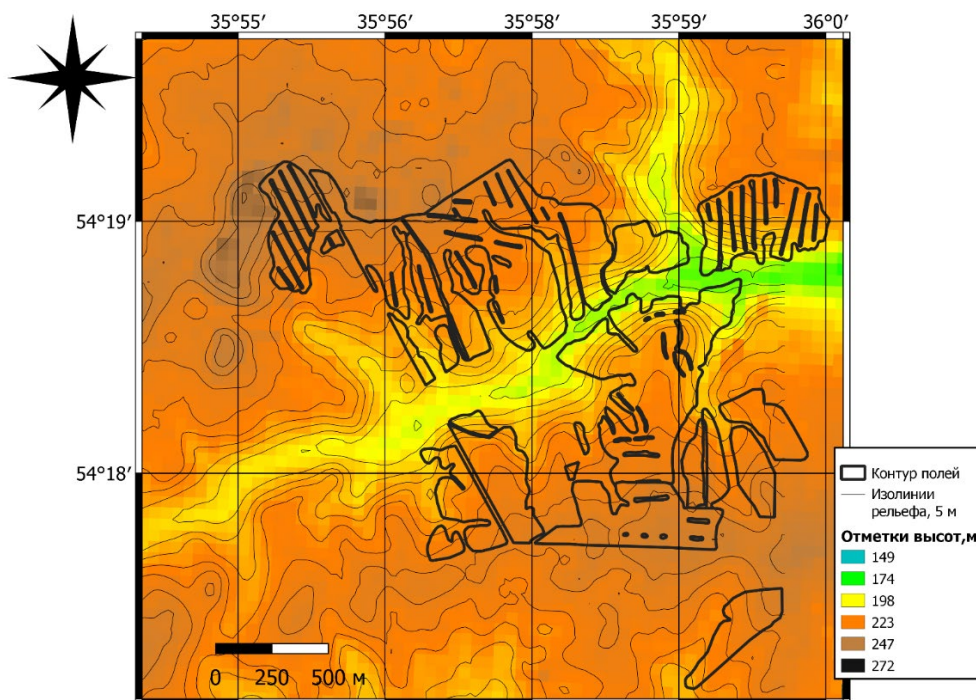


Рис. 1. Исследуемые участки

Климатические условия. При подсчете данных за 2000-2022 г. средняя сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$), рассчитанная по датам устойчивого перехода через 10°C , составляет $2097-2252^{\circ}\text{C}$. Сумма температур $>5^{\circ}\text{C}$ и $>15^{\circ}\text{C}$ составляет $2581-2607^{\circ}\text{C}$ и $1334-1496^{\circ}\text{C}$ соответственно. Согласно многолетним данным (2000-2022 г.), за год в среднем выпадает 633 мм осадков.

Литологические условия. Почвообразующие породы на исследуемой территории объединяются в следующие группы: покровные отложения; делювиальные отложения.

Наиболее распространенными почвообразующими породами являются покровные отложения. Они характеризуются однородностью, тонкостью и сортированностью материала. Представлены по гранулометрическому составу иловато-крупнопылеватыми средними суглинками, иногда песчано-крупнопылеватыми. В грануло-

метрическом составе покровных отложений преобладают крупнопылеватые (0,05-0,01 мм) и иловатые (менее 0,001 мм) фракции.

Среди определяемых агрохимических показателей анализировали: содержание углерода гумуса, подвижных форм фосфора и калия, уровень pH, содержание легкой фракции ($\text{LF} < 1,6 \text{ г/см}^3$) [7], фракции РОХС [9]. Данные приведены для пахотного горизонта почв (глубина отбора проб 0-25 см), общая выборка состояла из 66 наблюдений. При формировании выборки на каждом элементарном участке в трех точках отбирали почву с глубины 0-25 см и формировали средний образец. Названия даны в соответствии с Классификацией и диагностикой почв СССР (1977 г.) [1].

Результаты и их обсуждение. В соответствии с полученными данными и типизацией участков по

агроэкологическим группам [2] установлено, что максимальное содержание углерода гумуса (в среднем 2,4%) было характерно для переувлажнённых земель, почвенный покров которых представлен преимущественно серыми лесными поверхностями – глееватыми и грунтовыми глеевыми почвами. Минимальное содержание

(в среднем 1,85%) отмечено в группе плакорных/эрозионно-переувлажнённых участков, со сложным волнистым рельефом и более интенсивным процессом смыва. Данные по распределению углерода гумуса и фракции РОХС представлены на рисунке 2.

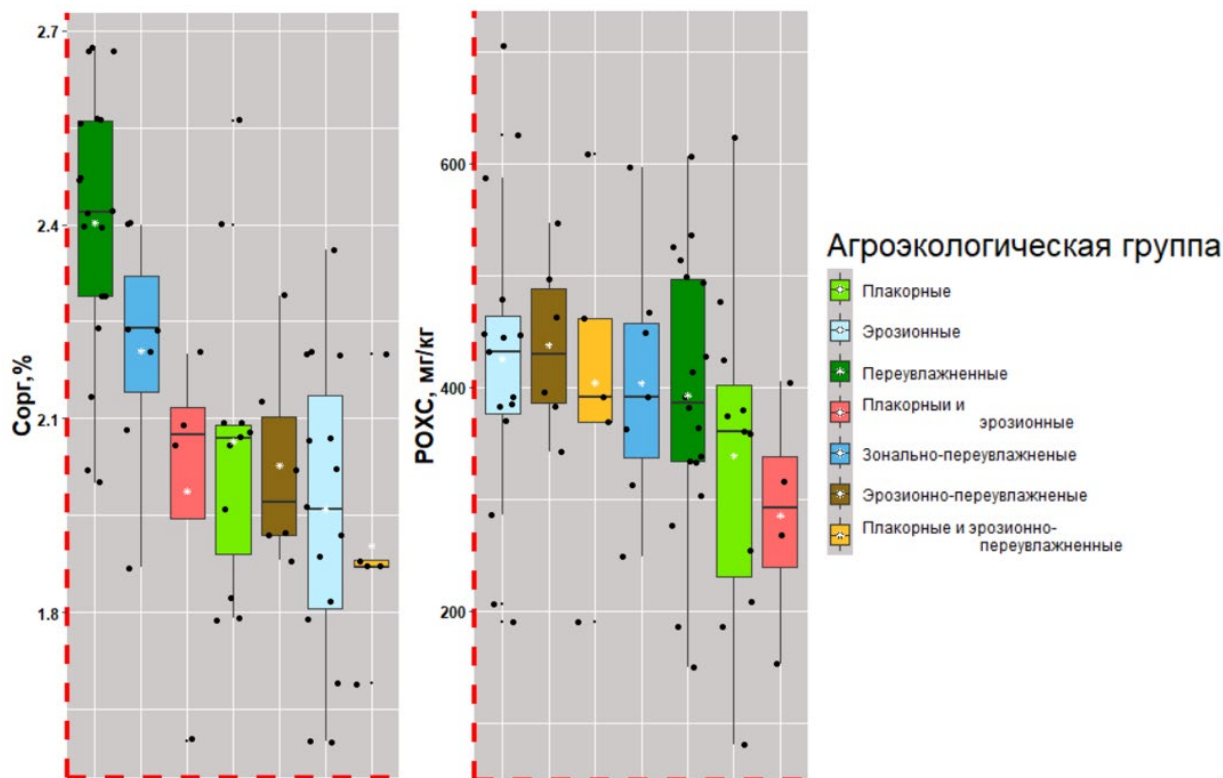


Рис.2. Содержание углерода гумуса и РОХС в исследуемых объектах

Фракция РОХС, как установлено в ряде исследований [6, 7, 9], может выступать как один из маркеров качества земель по аналогии с содержанием гумуса, так как данная фракция ОВ также обладает определенной чувствительностью к землепользованию и смене экзогенного воздействия внешних факторов. В данной работе установлено, что содержание фракции РОХС и углерода гумуса не коррелировали между собой, величина R^2 в линейной модели, построенной по методу наименьших квадратов, менее 0,01 ед. При этом рассеяние наблюдений было хаотичным и какие-либо закономерности отсутствовали (рис. 3).

Данные, полученные в рамках опыта, несколько противоречат ранее проведенным исследованиям на примере почв черноземного типа, где РОХС и содержание почвенного органического углерода (ПОУ) были в значительной степени связаны [6,7]. Однако следует предположить, что при меньшем содержании ПОУ, как например в серых лесных почвах исследуемых участков, степень корреляции и линейность сокращения гумуса и РОХС могут отсутствовать, и минерализация органического вещества при его сокращении может мобилизовать подвижные фракции, к которым следует причислить РОХС. Данные на рисунке 3, где представлены результаты измерений, классифицированные по агроэкологическим группам, показывают, что в среднем максимальное содержание фракции РОХС характерно для почв эрозионной и эрозионно-полугидроморфных агроэкологических групп при величине содержания РОХС

442 и 453 мг/кг соответственно. При этом минимальное содержание фракции РОХС отмечено на плакорном и плакорном в комбинации со слабозероизонными агроэкологическими группами участках при среднем уровне РОХС 341 и 286 мг/кг. Тренды линейного сокращения РОХС и углерода гумуса в рамках агроэкологических групп также отсутствуют.

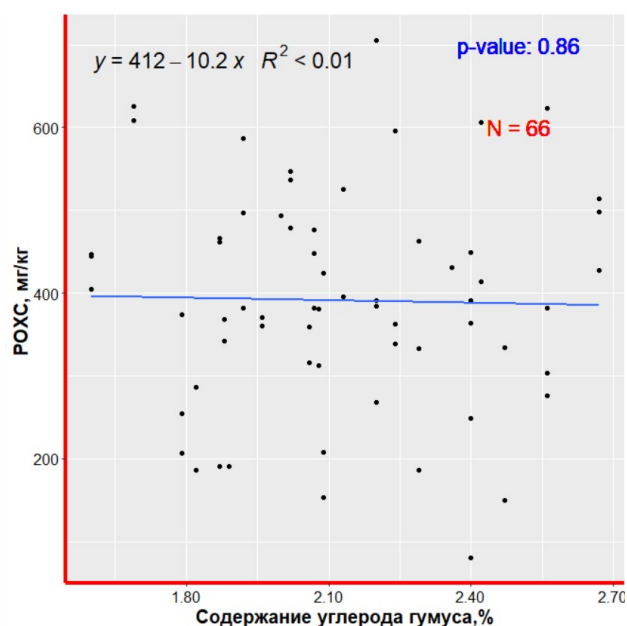
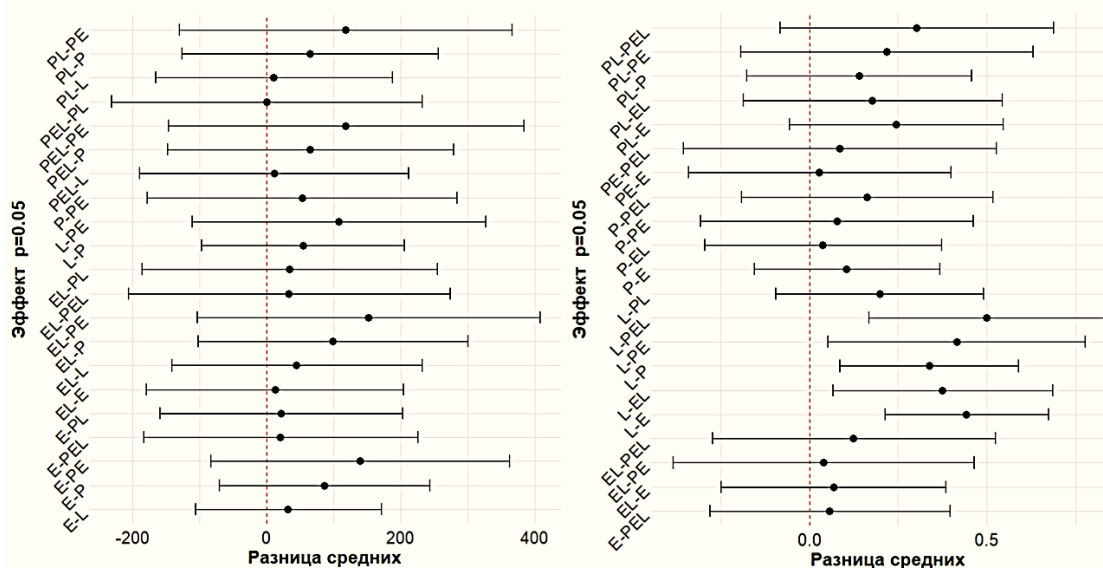


Рис. 3. Линейная модель зависимости углерода гумуса от РОХС

При проведении факторного анализа с использованием критерия Тьюки была проведена оценка разности средних значений РОХС и $C_{орг}$ в почвах разных

агроэкологических групп. Результаты анализа представлены на рисунке 4.



*Р – плакорная агроэкологическая группа, Е – группа эрозионных земель, L – группа переувлажненных земель

Рис. 4. Разница средних, оценка по критерию Тьюки

Установлено, что средние различия по содержанию РОХС между группами не превышают дисперсию пространственной неоднородности внутри групп. При этом для ряда подвыборок отмечены значимые различия в наблюдаемых значениях по содержанию углерода гумуса. Разница в средних (значение не пересекает красную линию) отмечена между переувлажненными землями и зонально-переувлажненными участками, плакорными и эрозионными землями и переувлажненными участками. Таким образом, избыток влаги вносит существенный вклад в процесс накопления углерода гумуса в условиях Калужской области, но при этом совершенно не влияет на накопление фракции РОХС.

В соответствии с методом, предложенным в работе [10], была построена визуализация, характеризующая зависимость сокращения углерода гумуса и изменения других агрохимических показателей (рис. 5).

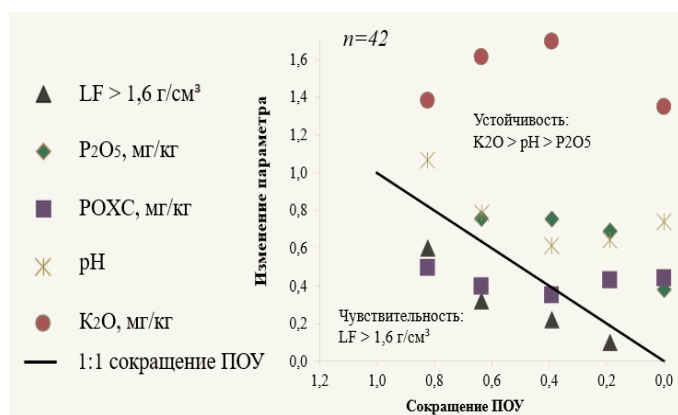


Рис. 5. Чувствительность почвенных параметров к сокращению ПОУ

Если свойство уменьшается пропорционально уменьшению ПОУ (линия тренда на рис. 5), то оно характеризуется такой же чувствительностью к смене режима землепользования, как и ПОУ. Если изменения происходят быстрее, чем ПОУ (левая нижняя часть графика), то это

свойство чувствительно, а если медленнее (правая верхняя часть графика), свойство устойчиво к смене режима землепользования. Нормирование значений в диапазоне 0-1 производили с учетом измерения параметров серой лесной почвы на необрабатываемых участках. При этом участки с переувлажненными землями исключили, так как установлено, что избыточный гидроморфизм вносит существенный вклад в процесс накопления $C_{орг}$ и при нормировании содержание ПОУ на переувлажненных участках было в среднем на 15-20% выше фоновых.

Установлено, что фракция $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ наиболее чувствительна к сокращению углерода гумуса. Самыми устойчивыми были показатели содержания в почве K_2O и pH. При сокращении фракции РОХС для серых лесных почв Калужской области отмечалось наличие тенденции к более быстрому сокращению РОХС в промежутке от максимума до 3-го квартиля, в то время как при сокращении ПОУ до 50% от фоновых значений отмечается наличие сглаживания и выхода тренда среднего содержания фракции РОХС на плато. В фоновых участках содержание РОХС фактически на 40% выше, чем на пашне, при этом содержание $C_{орг}$ составляло 10-15%. Фракции $LF < 1,6 \text{ г/см}^3$ и РОХС намного более чувствительны к землепользованию, чем содержание $C_{орг}$. Однако при этом РОХС характеризуется широкой вариативностью, и пространственная неоднородность содержания фракции РОХС не объясняется принадлежностью почв к агроэкологическим группам, в то время как по величине $C_{орг}$ отмечаются значимые различия средних.

Закключение. Результаты исследования показывают, что на процесс накопления почвенного углерода существенно воздействует избыточный гидроморфизм. Среднее значение $C_{орг}$ на гидроморфных агроэкологических группах существенно отличается от плакорных и эрозионных участков. При этом фракция РОХС, как наиболее подвижная, характеризуется высокой пространственной неоднородностью, а также отсутствием корреляционной связи с содержанием углерода гумуса. При оценке

различий между средним содержанием углерода гумуса и РОХС по агроэкологическим группам почв не установлено, что количественные значения РОХС существенно различались. Из этого следует, что пространственная неоднородность данной лабильной фракции шире и не может быть объяснена усреднением значений по группам земель. Наибольшее накопление фракции РОХС характерно для эрозионных агроэкологических групп, где отмечается минимальное содержание $C_{орг}$. Можно предположить, что сокращение содержания почвенного углерода приводит к некоторой мобилизации активного органического вещества. Однако за счет высокой пространственной неоднородности РОХС в рамках данных исследуемых объектов требуется больше информации для подтверждения или опровержения данной гипотезы. При оценке чувствительности агрохимических свойств к сокращению ПОУ установлено, что фракция $LF < 1,6$ г/см³ наиболее чувствительна к сокращению углерода гумуса. Наиболее устойчивыми были показатели содержания в почве K_2O и pH. При сокращении фракции РОХС для серых лесных почв Калужской области отмечалось наличие тенденции к более быстрому сокращению РОХС в промежутке от максимума до 3-го квартиля, в то время как при сокращении ПОУ до 50% от фоновых значений отмечается наличие сглаживания и выхода тренда среднего содержания фракции РОХС на плато.

Литература

1. Классификация и диагностика почв СССР. – М.: Колос, 1977. EDN: YWWBDV

2. Кирюшин В.И., Иванов А.Л. и др. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий / Методическое руководство МСХ РФ, РАСХН. – М.: Росинформагротех, 2005. – 784 с. EDN: PJRTTN
3. Козут, Б. М. Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России / Б. М. Козут // Почвоведение. – 2012. – № 9. – С. 944. – EDN PANJFH.
4. Козут Б.М., Милановский Е.Ю., Хаматнуров Ш.А. О методах определения содержания органического углерода в почвах (критический обзор). Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023;(114):5-28. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-5-28>
5. Прохоров А.А. Характеристика методов выделения фракций почвенного органического вещества и их использование для оценки гумусового состояния почв [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2022. – № 6. –DOI: 10.51419/202126604.
6. Прохоров А.А., Борисов Б.А., Ефимов О.Е. Индексная оценки степени выпашанности черноземов предкавказской провинции// Агрохимический вестник. – 2023. – №5. – С.50-55. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-5-009 EDN: OXSZRW
7. Семенов, В.М., Козут Б.М., Почвенное органическое вещество; Почвенный институт им. В.В. Докучаева. – М.: Издательство ГЕОС, 2015. – 233 с. – ISBN 978-5-89118-702-3. – EDN VQNCVL.
8. Borisov B.A., Efimov O.E., Eliseeva O.V. [et al.] Organic matter of sod-podzolic soil after transition to a fallow state // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Ussurijsk, 20–21 июня 2021 года. – Ussurijsk, 2021. – P. 022022. – DOI <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012108>
9. Culman S., Freeman M., Snapp S. 2012. Procedure for determination of permanganate oxidizable carbon. Kellogg Biological Station, Michigan State University, Hickory Corners, MI 49060. Found at <http://lter.kbs.msu.edu/protocols/133>.
10. Kuzyakov Y., Gunina A., Zamanian K. [et al.]. (2020). New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation. Frontiers of Agricultural Science and Engineering. 7. 10.15302/J-FASE-2020338. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338>
11. Lal R., Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security, Science, 2004, Vol. 304, pp. 1623–1627.

ASSESSMENT OF HUMUS CONTENT OF GREY FOREST AND LIGHT GREY FOREST SOILS OF DIFFERENT AGRO-ECOLOGICAL GROUPS IN AGROLANDSCAPES OF KALUGA REGION

A.A. Prokhorov*, Ph.D. B.A. Borisov, Ph.D. O.E. Efimov, P.S. Goryachev
Russian State Agrarian University, K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Russia,
127434, Moscow, 49 Timiryazevskaya str.

*artem.prokhorov.2016@inbox.ru
* <https://orcid.org/0000-0002-2988-5055>

The work was carried out within the framework of the thematic plan-assignment for R&D commissioned by the Ministry of Agriculture of Russia at the expense of the federal budget in 2024

On the example of grey forest soils of the Kaluga region, the humus state of agrolandscapes was assessed. The contribution of exogenous factors to the formation of humus carbon and labile POXC fraction was analyzed in the course of soil typing into agroecological groups. It was found that excessive amount of moisture in surface gleyey and ground gleyey grey forest soils leads to increase of humus carbon content on average by 15-20%, and Sorg content on overwatered lands statistically reliably differs from Sorg content on soils of plakor and erosion agroecological groups. Spatial heterogeneity of the POXC fraction does not allow to reveal significant differences of average values within agroecological groups of lands. It is established that the fraction $LF < 1.6$ g/cm³ is the most sensitive to the process of soil carbon reduction. At the same time, the indicators pH_{KCl} , the content of mobile forms of phosphorus and potassium are stable parameters, and the trend of POXC reduction is non-linear, and for grey forest soils of Kaluga region there was a tendency to a faster reduction of POXC in the interval from the maximum to the 3rd quartile of Sorg, while at the reduction of Sorg to 50% of background values there is a smoothing and exit of the trend of the average content of the POXC fraction to a plateau. In background plots, the POXC content is 40% higher than in arable land, while Sorg content is characterized by a variation of 10-15%. Fractions $LF < 1.6$ g/cm³ and POXC are much more sensitive to land use than Sorg content, however, POXC is characterized by wide variability and spatial heterogeneity of POXC fraction content is not explained by soils belonging to agro-ecological groups, while Sorg value shows significant differences in the mean due to excessive hydromorphism.

Keywords: soil organic matter, agroecological assessment, soil quality, resistance to degradation.