

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ПРИРОДНОЙ И ТЕХНОГЕННОЙ СРЕД

ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЛЕСОСТЕПНЫХ ПОЧВ

Лисецкий Федор Николаевич д.г.н., проф.

E-mail: liset@bsuedu.ru

Белгородский государственный национальный исследовательский
университет, Белгород, Россия

С использованием сформированных для условий лесостепи хронорядов почв (с диапазоном их возраста от 7 до 2600 лет) и рядов агрогенных трансформаций почв установлен вклад легко трансформируемой части и подвижного органического вещества в общем его содержании. Показано, что в ряду агрогенных трансформаций лесостепных почв при увеличении содержания органического углерода в 5 раз содержание лабильного гумуса возрастает в 3 раза. Установлена взаимообусловленность двух подвижных групп органического вещества, однако при росте содержания углерода лабильной части в 5 раз отмечается увеличение содержания легко трансформируемой части органического вещества не более чем в 2 раза.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, почвы лесостепи, лабильный гумус, хроноряды почв, ряды агрогенных трансформаций почв

NATURAL AND ANTHROPOGENIC FEATURES OF THE FORMATION OF MOBILE COMPONENTS OF ORGANIC MATTER IN FOREST- STEPPE SOILS

Fedor N. Lisetskii, D.Sc. in Geography, Professor,
Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

E-mail: liset@bsuedu.ru

The contribution of the easily transformable part and mobile organic matter to its total content was established using soil chronoserries (with a range from 7 to 2600 years) and series of agrogenic soil transformations formed for forest-steppe conditions. It was shown that in a series of agrogenic transformations of forest-steppe soils, with an increase in the content of organic carbon by 5 times, the content of labile humus increases by 3 times. The interdependence of two mobile groups of organic matter was established; however, with an increase in the carbon content of the labile part by 5 times, an increase in the content of the easily transformable part of organic matter by no more than 2 times is noted.

Keywords: soil organic matter, forest-steppe soils, labile humus, soil chronoserries, series of agrogenic soil transformations

В настоящее время разработка проблематики, связанной с регулированием углеродного баланса почв, проводится высокими темпами, о чем свидетельствует рост количества профильных научных работ. Обзорное исследование, основанное на библиометрическом анализе 3880 основных

публикаций за период 1994-2024 гг. из поисковой платформы *Web of Science*, показало, что в числе высокочастотных ключевых слов словосочетание «органический углерод почвы» встречается в публикациях 1352 раза, а «секвестрация углерода» – 471 раз [16].

Процесс гумусообразования в природном тренде направлен на селективный отбор наиболее устойчивых соединений ароматической природы, которые определяются как биологически активные соединения [6]. Структурную основу устойчивой системы гуминовых и фульвокислот (ГК и ФК) закладывают трудно разлагающиеся компоненты, притом, что все фракции постоянно обновляются под влиянием современного почво- и гумусообразования [7]. Вклад биологического фактора в гумусообразовании можно оценить, если обратиться к почвенным объектам, которые длительное время находились в условиях погребения. Как показано ранее [3, с. 16], при длительности погребения 2000 лет содержание гумуса в чернозёмах составляло 40% от исходного количества. При этом происходит трансформация структуры основных групп гумусовых веществ (ГК и ФК), что отражается в изменении доли гуминов, т.е. негидролизованного остатка, который представляет собой прочносвязанные с минеральной частью почвы гумусовые вещества и негумусированные остатки [11]. Различие возраста отдельных фракций гуминовых кислот отражается, в частности, в том, что негидролиземый остаток с радиоуглеродным возрастом от 1000 до 4000 лет, как полагают [5], может рассматриваться как биологически инертная часть гуминовых кислот, которая мало активна в процессе метаболизма гумуса. Однако, есть мнение, что почвенное органическое вещество с большими радиоуглеродными датами вполне может содержать существенную долю химически и термодинамически лабильного углерода [19].

К настоящему времени сложилось понимание того, при оценке гумусного состояния почв в агроландшафтах основной проблемой выступает не столько снижение общих потерь почвенного углерода с нарушением устойчивости системы специфических органических соединений, сколько недостаточное воспроизводство лабильной части органического вещества (ОВ), которая определяет жизнь почвы и её важнейшие агрономические свойства [2]. В агропочвах, которым обычно присуща активная минерализация гумуса, подвержены наибольшей трансформации именно компоненты, для которых характерен быстрый и непрерывный оборот – потенциально-минерализуемое ОВ [15], лабильные гумусовые вещества [12]. Поддержание в почве определенного уровня содержания лабильного (подвижного, легкоразлагаемого, активного) пула ОВ, а также оперативного резерва эссенциальных элементов является непременным условием воспроизводства общих запасов ОВ [15]. Ранее было установлено, что лабильные фракции органического углерода, в частности легко окисляемый углерод (ROC), были высокочувствительны к землепользованию из-за сокращения поступления ОВ и микробной активности [20], что определило необходимость отражения вклада лабильного углерода в индексе управления [18]. Как справедливо

отмечено [15], определяя активными фракции «растворенного», «подвижного» и «лабильного» ОВ, извлекаемые водной, солевой и щелочной вытяжками, следует учитывать различия между химической реактивностью и физической лабильностью ОВ с потенциальной питательной и энергетической ценностью этого субстрата с позиции микробиологической значимости. Оценка таких форм ОВ важна для понимания потенциала и особенностей нисходящей миграции органических и органоминеральных соединений, создающих вертикальную дифференциацию почвенного профиля [5].

Объекты, формирующие хроноряд дневных лесостепных почв (общим количеством (n), равным 26), распределены по хроноинтервалам следующим образом: возраст 7-57 лет (7); 200—360 лет (11); 1000-1600 лет (5); 2400-2600 лет (3). Датировки новообразованных почв проводили с использованием исторических и археологических данных. Ряд агрогенных трансформаций лесостепных полновозрастных (голоценовых) почв Белгородской области (n=18) включал: зональные эталоны (почвы целинные под природной растительностью (луговой степью и коренным лесом)) – старопахотные почвы – разновременные постагрогенные почвы. В необходимых случаях отборы образцов проводили по двум слоям, что увеличило объём выборки. В аналитическом блоке исследований использованы четыре метода. Массовую долю ОВ определяли по методу Тюрина, массовую долю общего азота – по Кьельдалю, легко трансформируемый органический углерод – методом экстракции горячей водой (по Кершенсу). Анализ подвижного (лабильного) ОВ выполнен по методу М.Е. Егорова (1938), сжигание по Б.А. Никитину. Этот метод базируется на выделении лабильных веществ из почвы 0,2Н NaOH и окислении их 0,4Н раствором двуххромовоокислого калия в H₂SO₄. Определение проводили титриметрически. По итогу были рассчитаны соотношения C:N (обогащенность гумуса азотом) и соотношение 100*C(ЛГ)/Сорг), которое используется для количественной оценки степени выпаханности почв и диагностирует дефицит лабильных форм ОВ.

Для оценки доли лабильной части ОВ необходимо было обеспечить в формируемой выборке ряда агрогенных трансформаций почв широкий размах величин ОВ (гумуса). Средние величины по выборке (n=30) составили: содержание ОВ 5,15±0,40 (1,04÷8,73) %, содержание органического углерода 3,02±0,23 (0,60÷5,06) %, содержание валового азота 0,34±0,02 (0,09÷0,65) % при соотношении C:N 8,85±0,23 (6,1÷11,7), что в основном укладывается в две категории обогащенности гумуса азотом: высокую (6-8) и среднюю (8-11).

Полученное уравнение связи содержания лабильного гумуса от содержания ОВ в горизонте А (мощностью до 18-22 см), аппроксимируемое линейной функцией (при величине коэффициента корреляции 0,79) (Рис. 1), показало, что в почвах агрогенного ряда при общем увеличении содержания органического углерода с 1 % до 5% (гумуса, соответственно, с 1,7% до 8,6%) содержание лабильного гумуса в среднем возрастает с 0,6% до 1,7%, т.е. в 2,9 раза. Важно отметить, что, если в пахотных почвах в составе лабильного

гумуса преобладают лабильные фульвокислоты, то в условиях целины и пастбища – лабильные гуминовые кислоты [1].

Примечательно, что в лесостепных почвах при рассмотрении верхней части горизонта А (0-11 см) и нижней части этого горизонта (11-22 см) теснота связи между содержанием лабильного гумуса от общего его содержания уменьшается (по коэффициенту корреляции) с 0,66 до 0,42. При увеличении общего содержания углерода с 1% до 5% (гумуса с 1,7% до 8,6% соответственно) содержание легко трансформируемого органического углерода возрастает в 2,7 раза (с 0,38% до 1,05 %) (Рис. 2). По шкале показателей гумусного состояния почв [13] содержание водорастворимых ОВ (в % от Сорг) оценивается как среднее (до 0,5%), выше среднего в пределах величин 0,5-1,0% и высокое при диапазоне величин 1,0-2,0%.

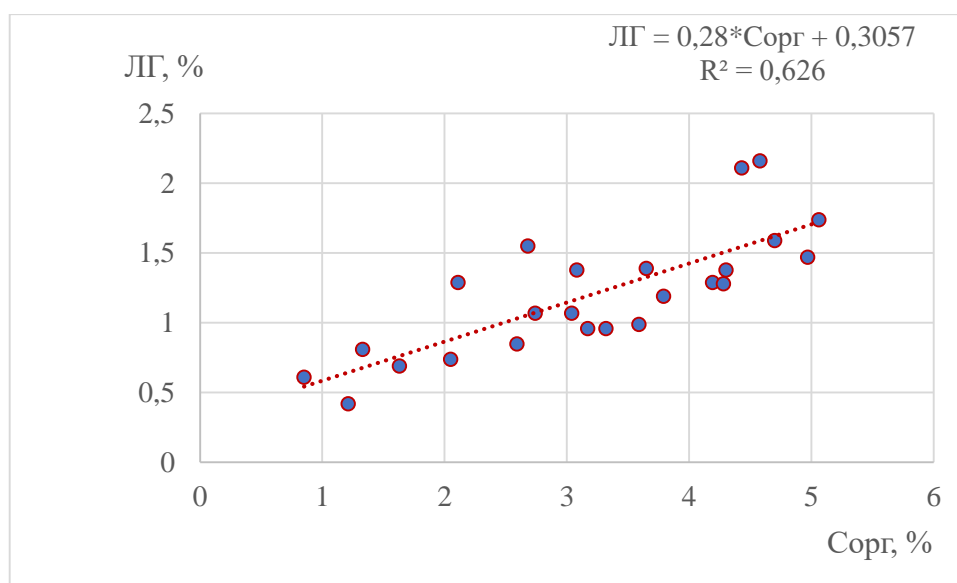


Рис. 1. Зависимость содержания лабильного гумуса (ЛГ) от общего содержания органического углерода (Сорг) в лесостепных почвах, формирующих ряд агрогенных трансформаций.

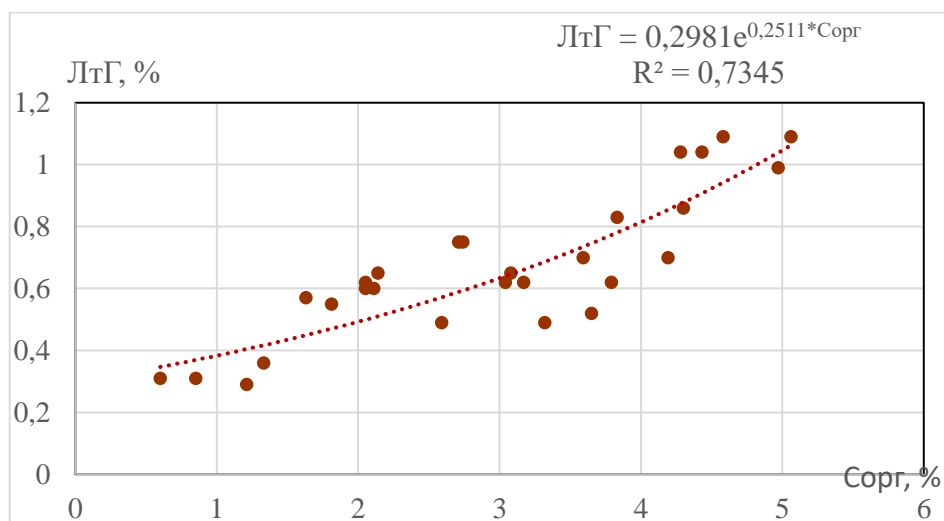


Рис. 2. Зависимость содержания легко трансформируемого органического вещества (ЛТГ) от общего содержания углерода (Сорг) в лесостепных почвах, формирующих ряд агрогенных трансформаций.

Величина коэффициента корреляции между легко трансформируемым органическим углеродом и углеродом лабильного гумуса составляет 0,67, что свидетельствует о генетической взаимообусловленности (на 45%) этих двух подвижных групп ОВ. При увеличении содержания углерода лабильного гумуса с 0,10 до 0,55% содержание легко трансформируемого органического углерода возрастает в среднем в два раза (с 0,05 до 0,11 %).

Сравнение результатов аппроксимации эмпирических данных, представленных на рис. 1 и 2, показывает, что в диапазоне изменения содержания Сорг от 1 до 5% отмечается некоторое опережение роста у содержания ЛГ по сравнению с содержанием ЛТГ (в 1,07 раз).

Процесс закрепления новообразованного ОВ при взаимодействии с минеральной частью почвы с формированием органоминеральных соединений зависит от онтогенетической зрелости почвы [10], что было показано по результатам исследований режимов ренатурации, как эродированных почв, так и постагрогенных почв [8]. При широком размахе возраста почв, сформированных на датированных поверхностях с материнскими породами суглинистого состава (преимущественно лессовидными суглинками) под травянистой растительностью, среднее содержание органического углерода составляло в горизонте А $2,30 \pm 0,11$ ($3,56 \div 1,03$) % ($n=29$) при коэффициенте вариации 26%, а в горизонте АВ – $1,63 \pm 0,13$ ($3,04 \div 0,68$) % ($n=26$) при коэффициенте вариации 39%. Содержание углерода лабильной фракции у почв хроноряда отличалось в гумусово-аккумулятивном горизонте и переходном горизонте почв: в горизонте А оно в среднем составляло $0,10 \pm 0,01$ ($0,192 \div 0,042$) % ($n=29$) при коэффициенте вариации 34%, а в почвах горизонта АВ – $0,07 \pm 0,004$ ($0,113 \div 0,023$) % ($n=26$) при коэффициенте вариации 30%.

Ранее по результатам моделирования процесса формирования гумусового горизонта почв лесостепной зоны [9] было установлено, что средняя скорость формирования гумусового горизонта почв резко снижается от 2 до 0,4 мм/год при увеличении их возраста до 500 лет, в последующие 500 лет – до 0,26 мм/год, а после 1000 лет почвообразования скорость процесса стабилизируется при величине порядка 0,2 мм/год. Разумеется, этим закономерностям в целом соответствуют и долговременные изменения в содержании ОВ. При рассмотрении длительности почвообразовательного процесса эволюционной размерности (сверхвековую периодичность) следует учитывать климатическую обусловленность гумусообразования [4]. Она же проявляется и на уровне внутривековой периодичности педогенеза, так как между дефицитом гумуса и атмосферной увлажненностью наблюдается обратная зависимость [3].

Данные по хроноряду дневных лесостепных почв с диапазоном их возраста от 7 до 2600 лет ($n=26$) показали, что средняя величина доли содержания углерода лабильного гумуса от общего содержания органического

углерода в горизонте А составляет $4,72 \pm 0,30$ ($8,23 \div 2,62$) %. Характерная для хронорядов гетерогенность условий педогенеза (пространственная мозаичность микроформ рельефа, литологии материнских пород, типов сформированных фитоценозов и самих почв (иногда с резкими изменениями даже на сходных стадиях онтогенетического развития)) обуславливает высокую вариабельность содержания углерода лабильной части гумуса почв. Тем не менее, трендовая закономерность, отражаемая графиком на Рис. 3, заключается в том, что по мере увеличения длительности педогенеза и формирования более зрелых и гумусированных почв содержание лабильной фракции уменьшается.

Хотя теснота связи между долей содержания углерода лабильного гумуса от общего содержания органического углерода и возрастом почв сильная (величина коэффициента корреляции составляет 0,74), но показатель $100 * C(ЛГ) / C_{орг}$ в диапазоне возраста почв от 7 до 200-300 лет резко снижается с 8% до 5% с последующей во времени стабилизацией этой величины до уровня 3,5% в горизонте А (Рис. 3). Однако, если привлечь данные по горизонту АВ в том же хроноряду лесостепных почв, то зависимость от возраста почв не обнаруживается, при средней величине показателя $100 * C(ЛГ) / C_{орг}$ $4,59 \pm 0,37$ ($9,61 \div 1,89$) %.

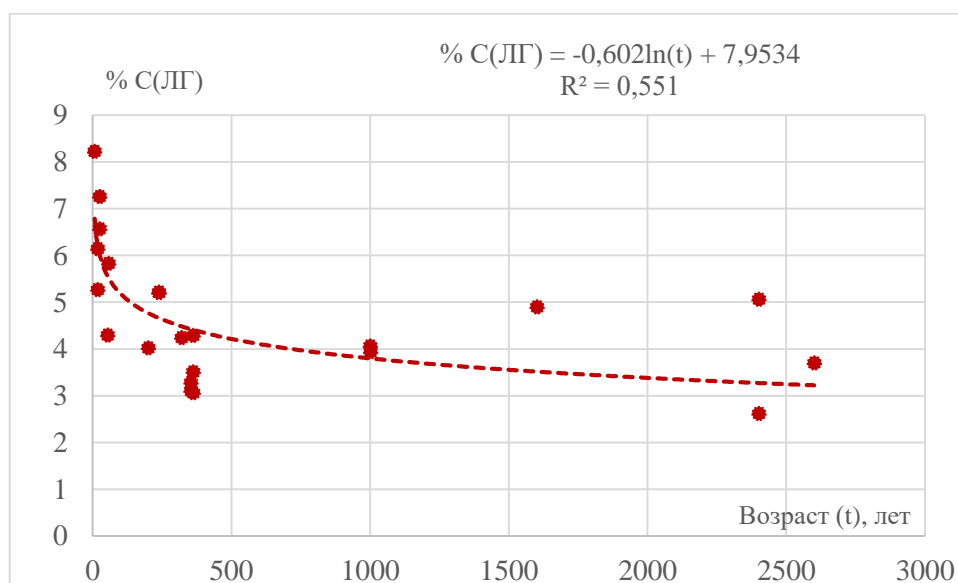


Рис. 3. Зависимость доли содержания углерода лабильного гумуса ($C(ЛГ)$, %) от общего содержания органического углерода ($C_{орг}$, %) в горизонте А ($100 * C(ЛГ) / C_{орг}$) от возраста почв (t , годы) по данным хроноряда лесостепных почв.

Примечательно, что по ранее полученным результатам изучения почв возрастом 24-26 веков на археологических памятниках [9], было показано, что, хотя содержание водорастворимого гумуса в гор. А (мощностью 20-35 см) всегда выше, чем в гор. АВ, но в более зрелых почвах относительная доля водорастворимого гумуса от его общего содержания меньше в гор. А (от 1,1 до 2,9%) по сравнению с долей в гор. АВ (от 2,1 до 6,4%). В полноголоценовых черноземах возраст подвижных гуминовых и фульвокислот меньше, чем

возраст гуминовых кислот, связанных с кальцием и полуторными оксидами [11].

Таким образом, при увеличении обогащенности почв гумусом в широком диапазоне (от 1 до 9 %) отмечается возрастание содержания легко трансформируемого ОВ по экспоненциальному закону и повышение содержания подвижного (лабильного) ОВ по линейной зависимости. При отмеченном увеличении общей гумусированности почв прирост содержания подвижных форм ОВ достигает значительных величин (от 2,7 до 2,9 раз) при опережающем увеличении содержания лабильного гумуса в сравнении с содержанием легко трансформируемого ОВ.

В Белгородской области в результате внедрения мероприятий по биологизации земледелия в 2019-2022 годах [14] средневзвешенное содержание органического вещества в пахотном слое почв увеличилось на 0,3% (до 5,3%) [17]. В этой связи, результаты, полученные нами, позволяют рекомендовать нормативные величины оптимального содержания лабильного гумуса и легко трансформируемого органического вещества, составляющие 1,2% и 0,6% соответственно. Однако при этом должно быть обеспечено поддержание ресурсов потенциального плодородия на уровне гумусированности пахотных почв 5,3% (за счет внесения органических удобрений, увеличения доли многолетних трав в севооборотах, сидеральных культур и др.).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>

Список литературы

1. Глазунов, Г. П. Влияние экспозиции склона на содержание гумуса и активного пула органического вещества в чернозёме типичном / Г. П. Глазунов // Актуальные проблемы земледелия и защиты почв от эрозии : Сборник докладов Международной научно-практической конференции и Школы молодых ученых, посвящённых Году экологии и 50-летию выхода Постановления о борьбе с эрозией почвы, Курск, 13–15 сентября 2017 года / Редакционная коллегия: Д.В. Дубовик, Г.Н. Черкасов, Н.П. Масютенко, М.Ю. Дегтева, В.Г. Вавин, Н.В. Рязанцева. – Курск: ООО "ТОП+", 2017. – С. 97-100.
2. Дедов, А. В., Несмеянова, М. А. Лабильное органическое вещество почв и приёмы его регулирования / А. В. Дедов, М.А. Несмеянова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 5 (67). – С. 8–10.
3. Иванов, И. В. Эволюция почв степной зоны в голоцене. / И. В. Иванов – М.: Наука. 1992. – 144 с.
4. Каганов, В. В. Оценка скорости минерализации органического вещества основных типов почв европейской части России при различных температурных режимах / В. В. Каганов, И. Н. Курганова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 15(110). – С. 145-153.
5. Караваева, Н. А., Таргульян, В. О., Черкинский, А. Е. и др. Элементарные почвообразовательные процессы. Опыт концептуального анализа, характеристика, систематика. – М., 1992. – 184 с.

6. Кленов, Б. М. Гумус как система экологически устойчивых соединений / Б. М. Кленов // Сибирский экологический журнал. – 2007. – Т. 14, № 5. – С. 789–797.
7. Кленов, Б. М. К вопросу об экологической устойчивости в современном учении о почвенном гумусе / Б. М. Кленов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 2. – №. 3. – С. 148-152.
8. Лисецкий, Ф. Н. Оценка изменения органического углерода и плодородия постагрогенных лесостепных почв в районе длительного землепользования / Ф. Н. Лисецкий, А. О. Полетаев, М. Е. Родионова // Материалы I Белорусского географического конгресса : Материалы конгресса к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества. В 7-ми частях, Минск, 08–13 апреля 2024 года. – Минск: Белорусский государственный университет, 2024. – С. 188-192.
9. Лисецкий, Ф. Н. Оценка скорости почвообразовательного процесса и проблема противоэрозионной организации агроландшафтов лесостепной зоны / Ф. Н. Лисецкий // Вісник Харківського національного аграрного університету. – 2009. – № 1. – С. 114–119.
10. Лисецкий, Ф. Н. Управление воспроизводством плодородия эродированных почв / Ф. Н. Лисецкий // Современная география и окружающая среда, Казань, 24–26 сентября 1996 года. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 1996. – С. 117-119.
11. Марголина, Н. Я. Возраст и эволюция почв / Н. Я. Марголина, А. Л. Александровский, Б. А. Ильичев и др. – М.: Наука. – 1988. – 144 с.
12. Назарова, А. В. Лабильные формы гумусовых веществ в гумусовых профилях пахотной и залежных дерново-подзолистых суглинистых почв / А. В. Назарова, Е. А. Попова // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2015. – №. 39. – С. 101-104.
13. Орлов, Д. С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов / Д. С. Орлов, О. Н. Бирюкова, М. С. Розанова // Почвоведение. – 2004. – № 8. – С. 918–926.
14. Савченко, Е. С. Управление режимом органического вещества почвы при биологизации земледелия / Е. С. Савченко, С. В. Лукин // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2024. – № 6. – С. 61–65.
15. Семенов, В. М. Почвенное органическое вещество / В. М. Семенов, Б. М. Когут. – М.: ГЕОС. – 2015. – 233 с.
16. Li, Y. Global research trends on the role of soil erosion in carbon cycling under climate change: a bibliometric analysis (1994–2024) / Y. Li, X. Zhang, Y. Zhao et al. // Atmosphere. – 2025. – V. 16. – No 8. – P. 934.
17. Lukin, S. V. Monitoring of organic carbon content in soils of agroecosystems of the Central Chernozem Region / S. V. Lukin // Doklady Earth Sciences. – Moscow : Pleiades Publishing, 2025. – V. 524. – No. 1. – P. 5.
18. Meena, S. Exploring soil organic carbon fractions, stocks, and carbon management index across land uses in subtropical ecosystems of Tripura, India / S. Meena, K. M. Manjaiah, V. K. Sharma et al. // Front. Sustain. Food Syst. 2025. No. 9. – P. 1604101.
19. Sollins, P. Organic C and N stabilization in a forest soil: Evidence from sequential density fractionation / P. Sollins, C. Swanston, M. Kleber et al. // Soil Biol. Biochem. – 2006. – V. 38. – P. 3313–3324.
20. Zhang, Y. Responses of soil labile organic carbon and carbon management index to different long-term fertilization treatments in a typical yellow soil region / Y. Zhang, Y. Li, Y. Liu et al. // Eurasian Soil Sci. 2021. – V. 54. – P. 605–618.